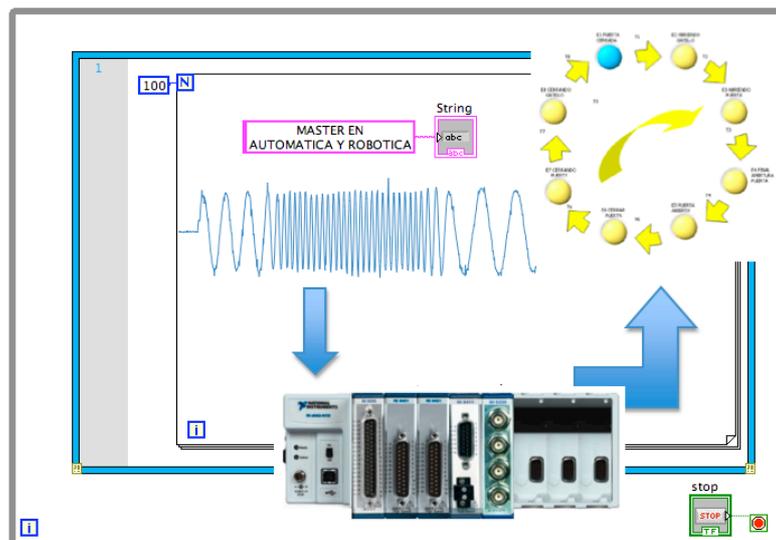

PHM Basado en Modelo Híbrido para Sistema Supervisor Utilizando Labview

PHM - Prognosis and Health Management

Máster en Automática y Robótica • Claudia Maria García España • 8 de enero de 2010



PHM Basado en Modelo Híbrido para Sistema Supervisor Utilizando Labview

Claudia Maria García España

2010

Universitat Politècnica de Catalunya

Departament d'Enginyeria de Sistemes Automàtics i
Informàtica Industrial de Terrassa

Abstract

This work is move for the increasing dependence of modern society in autonomous systems and complex technological processes, where availability, reliability and security are strategic words in the highly competitive industry. To meet these requirements maintenance becomes an essential part.

In the industrial world the cost of maintenance is an important part of total operating costs and a system fundamental part to function correctly, with the growing maintenance demand. For this reason is presented a methodologies study for predicting the machines operating conditions, that methodologies are based in hybrid systems approach and neural networks associates with direct prediction step strategies, able to predict the future state of the whole group.

This study presents a Prognosis and Health Management method (PHM), where data used to characterize the hybrid model became from a real system, in which various analogue and digital sensors was installed to extract the system features. The acquisition system is designed in LABVIEW language, with it, is possible collect all the observations variables available in the system, and extracts the amount of information necessary to build prediction models.

The results show that the prediction model based on hybrid system can track and supervise the change in machine condition and has the potential for using as a tool to prognosis and early faults diagnosis.

For this work have been used various tools, the most important one is LabView software, followed by MatrixX from National Instruments company. As well for simulations, pre-processing and data study has been used MATLAB.

Resumen

Este trabajo está motivado por la creciente dependencia de la sociedad moderna de los sistemas autónomos y procesos tecnológicos complejos, donde disponibilidad, fiabilidad y seguridad son palabras estratégicas en la alta competencia industrial. Para cumplir estos requisitos el mantenimiento se convierte en parte imprescindible.

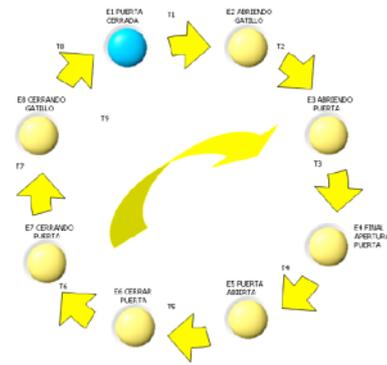
En el mundo industrial el coste de mantenimiento es una parte importante del total de los costos operativos y una parte fundamental para que los sistemas funcionen correctamente, con la creciente demanda de un buen mantenimiento. Por este motivo se presenta un estudio de metodologías que permitan predecir las condiciones de funcionamiento de los componentes del sistema, dichas metodologías se basan en sistemas híbridos y redes neuronales en asociación con estrategias de predicción, capaces de predecir el estado futuro del conjunto.

En este estudio se presenta un método de *Prognosis and Health Management*, donde los datos utilizados para caracterizar el modelo híbrido provienen de un sistema real, en el cual se han instalado diversos sensores analógicos y digitales para extraer sus características de funcionamiento. Se ha utilizado un sistema de adquisición basado en LabView mediante el cual es posible recoger las observaciones disponibles en el sistema, y extraer la información necesaria para diseñar modelos de predicción.

Los resultados muestran que el modelo de predicción basado en un sistema híbrido puede seguir el estado del sistema y tiene el potencial para ser usado como herramienta de pronóstico y diagnóstico precoz de fallas.

Para la elaboración del trabajo se han utilizado diversas herramientas informáticas, la más importante ha sido LabView, software de National Instruments, y MartixX de la misma compañía, asimismo se ha utilizado MATLAB para las simulaciones, pre-procesado y estudio de datos.

Contenido



Capítulo 1	5
Introducción	5
1. Motivación	7
2. Objetivos	8
3. Limitaciones	9
4. Área de investigación	10
<i>Preguntas de investigación</i>	10
<i>Validez y Fiabilidad</i>	14
Capítulo 2	17
Teoría	17
1. Falla y avería	17
2. Mantenimiento	18
<i>Mantenimiento Correctivo</i>	20
<i>Mantenimiento Preventivo</i>	20
<i>Mejora del Mantenimiento</i>	21
3. PHM - Prognosis and Health Management	22
4. Diagnostico y Pronostico	24
<i>Estudio de Técnicas de Diagnosis</i>	24
<i>Estudio de Técnicas de Prognosis</i>	27
5. Supervisión	30
6. Herramientas de modelado	32
<i>Sistemas Híbridos</i>	32
<i>PHM Basado en Modelo Híbrido para Sistema Supervisor Utilizando Labview</i>	1

Redes Neuronales	35
Capítulo 3	41
Caso de Estudio	41
1. Sensores instalados	41
2. Sistema de adquisición de datos	44
NI cDAQ-9172	44
NI 9205 Modulo de Entradas de Canales Analógicos	44
NI 9401 Modulo de Entrada/Salida de Canales Digitales	45
3. Caso de estudio	45
Descripción de los Escenarios	46
Escenario 1: Escenario sin Fallos	47
Escenario 2: Escenario de Deterioro de la Guía	51
Escenario 3: Escenario de Fatiga	53
Escenario 4: Otras Observaciones	53
Capítulo 4	56
Aplicación de Técnicas de PHM	56
1. Modelo híbrido	56
Definición de los Estados	57
Definición de las Transiciones	58
Modelos Híbrido	61
Relaciones Redundantes	62
2. Pronosticador Neuronal	64
Capítulo 5	71
Programación de técnicas de PHM	71
1. Programación del software de monitorización	72
Adquisición de Datos	73
Statechart	73
Pronostico	78
<i>PHM Basado en Modelo Híbrido para Sistema Supervisor Utilizando Labview</i>	<i>2</i>

<i>Sub-Funciones</i>	79
2. Red neuronal	81
3. Interficie usuario, Panel frontal	85
<i>Pantalla Principal</i>	85
<i>Pantallas de sub-Funciones</i>	89
Capítulo 6	94
Resultados	94
1. Escenario 1: validación	94
2. escenario 2: Objeto impide la apertura de la puerta	96
3. escenario 3: problemas en el cierre	98
4. Red Neuronal	98
Capítulo 7	104
Discusión	104
Capítulo 8	109
Conclusiones	109
Capítulo 9	113
Trabajo Futuro	113
Bibliografía	117
Anexos	121
1. Introducción a LabView	121
2. Tablas caracterisitcas del Statechart	128
3. Programas	130
4. Introducción a MatrixX	133

Capítulo 1

Introducción

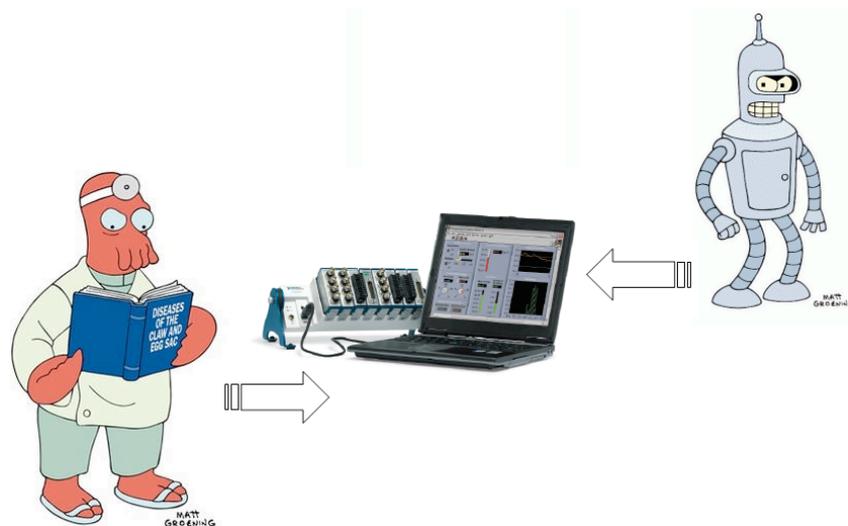


Fig. 1. 1 Mantenimiento basado en LabView

Debe tenerse en cuenta que en el mundo industrial el coste de mantenimiento es una parte importante del total de los costos operativos y una parte fundamental para que el conjunto funcione correctamente.

Dependiendo del tipo de procesos los costes de mantenimiento pueden variar entre 15 y el 60 por ciento del coste de producción. En el año 2004, en Europa el costo de mantenimiento fue del 21%, y en USA en las industrias relacionadas con la alimentación tuvieron una media de un

15% del producto final, mientras, en industrias del hierro, acero o papel ascendió a un 60% del total de los costos de producción (Mobley 2002).

Pero, ¿cuál es el objetivo del mantenimiento? El objetivo del mantenimiento, según se indica en (Mobley 2002), es el de mejorar la calidad y la seguridad de los productos y de las instalaciones, como así también, asegurar y mejorar el valor económico de los productos o sistemas y colaborar de forma efectiva en la generación de beneficios.

Con el paso de los años el campo del mantenimiento ha ido evolucionando y ganando cada vez más importancia, desde aquel mantenimiento correctivo mejorado por la detección y aislamiento de fallos pasando por el mantenimiento preventivo más cuadrulado y planificado, en busca del mantenimiento predictivo actualmente en estudio. Por el camino, se han planteado nuevas metodologías como el Prognosis and Health Management (PHM) que, a través de medidas y modelos, permiten efectuar la detección de fallos, la evaluación del estado del sistema así como la predicción de la progresión de avería o anomalía (P.W. Kalgren 2006).

A lo largo de la tesis de máster aparecerán palabras como *fallo temprano*, estado de un componente justo cuando empieza la degradación y que puede convertirse en avería de sistema, o términos como *Detectar* definido como el reconocimiento del deterioro en una determinada variable monitorizada que delimita el estado normal de operación del sistema (P.W. Kalgren 2006).

A su vez conviene conocer la definición de diagnosis y prognosis dentro del ámbito de estudio, definidas como:

Diagnosis: Se entiende como la identificación, localización y determinación de la severidad de la evolución del estado de avería (P.W. Kalgren 2006).

Prognosis: Pretende detectar y diagnosticar, con la utilización de métodos automatizados, la degradación física de las prestaciones de los componentes de un sistema anticipándose a futuros fallos y proyectando el tiempo de vida útil restante del sistema en condiciones de *PHM Basado en Modelo Híbrido para Sistema Supervisor utilizando Labview*

funcionamiento aceptable antes de entrar en estado de avería o de una degradación de prestaciones inaceptable para la funcionalidad del sistema (S. Katipamula 2005).

En este proyecto se presentarán un conjunto de metodologías que permitirán realizar un mantenimiento avanzado basado en pronóstico, así como el estudio realizado para ser aplicado a un caso concreto y su implementación.

1. 1. MOTIVACIÓN

Con el incremento del grado de dependencia de la sociedad moderna de los sistemas autónomos y procesos tecnológicos complejos (redes de distribución y producción de energía, agua, etc.), su disponibilidad, fiabilidad y seguridad se ha convertido en una cuestión estratégica. Un incorrecto funcionamiento puede provocar pérdidas económicas, peligro para los operadores, inconvenientes para los usuarios, etc. Además, la automatización de los mismos mediante lazos de control automático, si bien ha permitido liberar a los operadores humanos de su control y operación manual, no los ha inmunizado frente a los fallos. Entendiéndose por fallo 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 2006).

Con el objetivo de minimizar, reducir y/o evitar la incidencia de los fallos en los sistemas controlados, actualmente destacamos dos áreas de trabajo muy activas.

Por un lado existe una creciente necesidad e interés en desarrollar sistemas de control que puedan operar de forma aceptable incluso después de la aparición de un fallo y que sean capaces de parar el proceso antes de que se originen daños irreparables en el mismo. A este tipo de sistemas de control se les denomina tolerantes a fallos. La tolerancia a fallos se entiende pues como la capacidad de un sistema de control para mantener los objetivos de control a pesar de la aparición de un fallo, admitiéndose una cierta degradación de sus prestaciones. Debido a que los fallos ocurren generalmente de forma aleatoria pueden ser modelados como un sistema de eventos discretos, un sistema de control tolerante a fallos puede considerarse como un sistema de naturaleza híbrida, en el que conviven partes

continuas y partes discretas, ello conlleva que el análisis y el diseño no sea trivial y que deban utilizarse herramientas desarrolladas en el campo de los sistemas híbridos (Cassandras 1995; Antsaklis 2002; Morari 2003).

Por otro lado, se está trabajando en aumentar la fiabilidad de los sistemas implantando estrategias de mantenimiento predictivo, cuyo objetivo es minimizar la aparición de los fallos mediante la planificación de las tareas de mantenimiento realizando un seguimiento del envejecimiento de los componentes constituyentes del sistema (Mobley 2002). Por ejemplo, en (Fu 2004) la integración la realiza utilizando herramientas de inteligencia, control, mantenimiento y gestión de sistemas; en (Byngton 2002) se presenta una revisión de las técnicas de pronóstico y el beneficio que aporta en la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento; en (Yan 2007) se presenta un método mixto de evaluación y predicción del rendimiento en tiempo real de la vida de un herramienta de perforación utilizando señales de vibración.

1. 2. OBJETIVOS

El proyecto que se ha desarrollado, se enmarca en el campo de Prognosis and Health Management (PHM), y tiene como objetivo principal estudiar y analizar las nuevas metodologías de monitorización y supervisión de sistemas que integren aspectos de prognosis, detección y aislamiento de fallos con el fin de incrementar la disponibilidad, fiabilidad y seguridad de los sistemas y procesos tecnológicos.

Con el fin de conseguir el objetivo principal de este proyecto se desarrollarán tres líneas principales que delimitan su alcance. Las líneas de trabajo serán:

- Estudio de metodología para el pronóstico del estado de vida útil de sistemas así como la detección precoz de fallos. Un aspecto importante en la explotación de sistemas y procesos industriales es el de conocer el estado de todos los componentes que lo integran y prever cuanto legos estamos de que ocurra un determinado fallo. Ello puede conseguirse obteniéndose modelos de comportamiento y evaluando las tendencias de los mismos.

- Diseño de modelos híbridos dedicados al pronóstico y la detección precoz de fallos. En los últimos años, los sistemas híbridos han atraído la atención tanto de los investigadores como de la industria (Red Europea de Excelencia HYCON). El nombre de híbrido proviene precisamente que en este tipo de sistemas combina dinámica continua descrita mediante ecuaciones diferenciales con dinámica discreta descrita mediante máquinas de estado y/o reglas lógicas. Estos modelos mixtos permiten representar sistemas con distintos modos de operación. La aportación en esta línea será la integración de herramientas que permitan caracterizar el comportamiento de sistemas mediante modelos denominados híbridos con el objetivo de ser aplicados tanto en pronóstico como detección de fallos.

- Desarrollo de un nuevo mecanismo de monitorización y supervisión avanzada utilizando la herramienta de programación en tiempo real Labview, que incluya la predicción del comportamiento de la planta o sistema así como la detección y aislamiento de fallos. Para garantizar las prestaciones de funcionamiento y la disponibilidad/seguridad de un sistema. Las decisiones a tomar pueden ser desde planificar un paro del sistema para realizar tareas de mantenimiento a modificar la estrategia de control para finalizar una determinada acción.

A fin de poder implementar adecuadamente el sistema de monitorización y supervisión avanzado se requerirá realizar complementariamente a los puntos anteriores las siguientes tareas:

- Conocimiento y modelización de los procesos de estudio.

- Dominio de herramientas informáticas (como Labview) que se utilizarán para el diseño del sistema de monitorización y supervisión en tiempo real.

1. 3. LIMITACIONES

Primera, el estudio realizado en esta tesis de máster, no implica la creación de nuevas técnicas, pero si la utilización, selección e integración de algunas ya existentes. La metodología más apropiada ya existe, el mayor problema es encontrar y adaptar la técnica con la que poder alcanzar la solución para cada problema.

Segunda, el estudio se centrará en metodología y técnicas de monitorización para un único caso de estudio, un banco de pruebas, uno de los sistemas facilitados por el grupo de investigación SAC (Sistemas Avanzados de Control). Un motor que activa una puerta automática.

Tercera, las decisiones sobre el hardware y software utilizados vienen delimitadas por el tipo de planta que se ha utilizado en el estudio. Al ser un proyecto de investigación no se han tenido en cuenta limitaciones de precio o tamaño para los sistemas de sensorización y monitorización.

1. 4. ÁREA DE INVESTIGACIÓN

Para mostrar el área de investigación de este proyecto en el contexto de los objetivos descritos anteriormente y mostrar el potencial beneficio de su resolución en aplicar PHM en el sistema puerta observar la figura Fig 1.2.

La investigación se centra en evaluar las posibilidades de utilizar PHM para mejorar la gestión del mantenimiento en los sistemas de elevación, así como estrategias para mejorar la comunicación entre el personal de mantenimiento y el sistema.

Preguntas de investigación

- ¿Como se puede monitorizar y mejorar el estado de funcionamiento de la puerta automática a través de tecnologías de PHM?
- ¿Qué tipo de información se puede extraer de las medidas del sistema/banco de pruebas?
- ¿Cuáles son los beneficios de utilizar técnicas de PHM para la monitorización y supervisión del sistema?

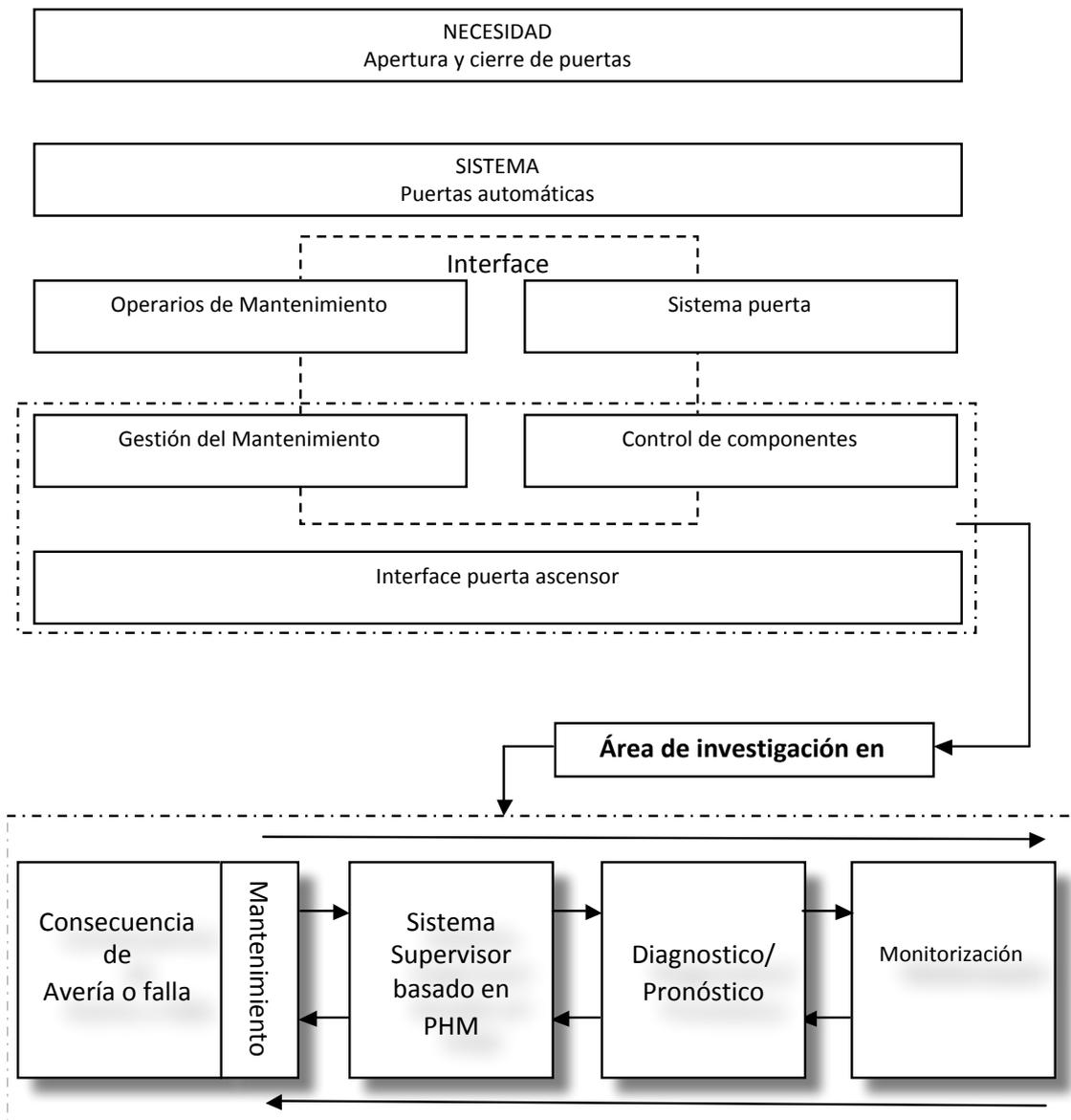


Fig. 1. 2 Área de investigación centrada en un sistema supervisor capaz de gestionar el mantenimiento del sistema puerta ascensor para un funcionamiento más efectivo gracias a la aplicación del PHM.

Enfoque de Investigación

Hay diferentes maneras de abordar el área de investigación. Con un enfoque deductivo o inductivo. La inducción llega a conclusiones empíricas sacadas de la experiencia, la deducción establece conclusiones lógicas basadas en teorías generales.

A partir del trabajo deductivo teórico, sobre toda la literatura científica, el área fue reducida a la necesidad de una tecnología de monitoreo y supervisión. A partir de aquí, el trabajo empírico inductivo se inició con estudios de casos relacionados con técnicas para aplicar PHM compatibles con el sistema en cuestión introduciendo la teoría híbrida, véase la Figura 1.3.

El proceso de investigación efectuado se ilustra en la Figura 1.3.

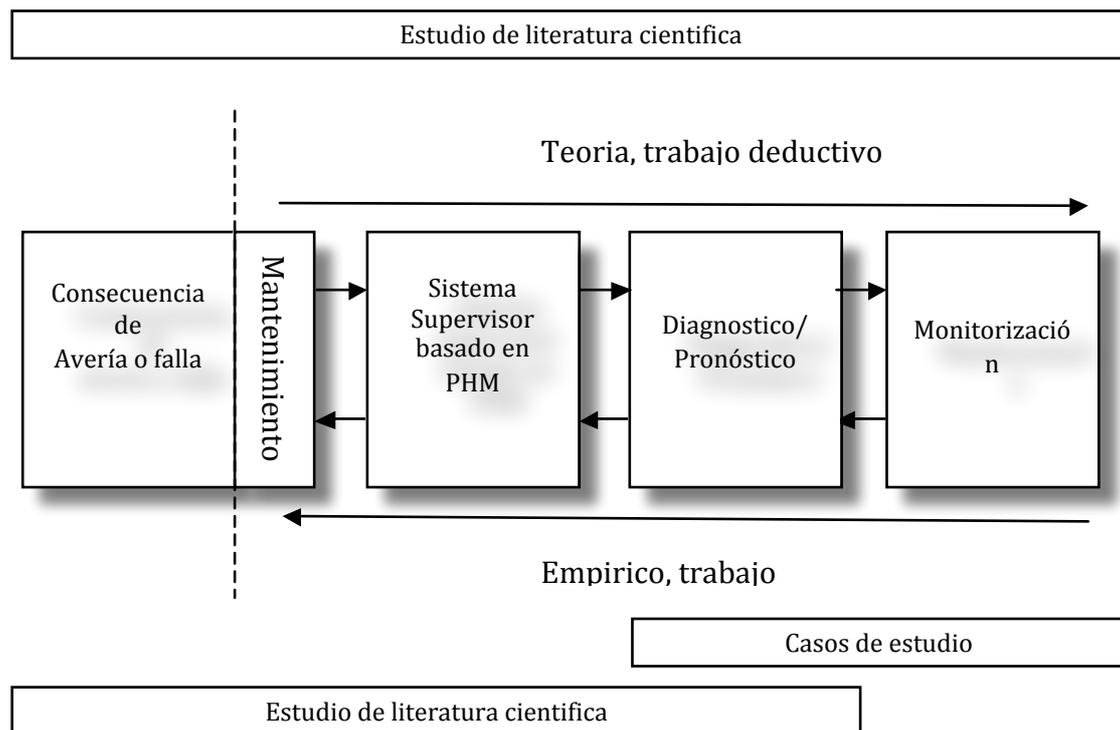


Fig. 1. 3 El proceso de investigación aplicada en el trabajo de tesis.

La investigación se debe dividir en dos campos, el *cualitativo* y el *cuantitativo*. Normalmente la información cuantitativa viene definida por números y la información cualitativa viene descrita por palabras.

El enfoque de investigación es fundamentalmente *cualitativo* pero apoyado por bases *cuantitativas* con el objetivo de identificar las áreas problemáticas, investigación descriptiva, analizar las variables del sistema, investigación analítica, y aplicación de tecnologías para su evaluación, investigación experimental. Todas dentro del ámbito cuantitativo.

Un enfoque cuantitativo se aplica para evaluar la fiabilidad y la validez de los datos de medición recogidos por los diferentes sensores disponibles para aplicar PHM. Además, este enfoque también es utilizado para evaluar la utilidad de los datos para la toma de decisiones de apoyo al mantenimiento a través del pronóstico.

Recopilación de datos

En este punto se describen los métodos para la recopilación de la literatura así como los casos estudiados.

Estudio de literatura

Hay diferentes formas de recogida de datos cualitativos, a partir de: documentación, registros de archivos, entrevistas y observaciones (Yin 2005).

La literatura estudiada fue recopilada a través de ‘bibliotecnia’ el sistema digital de bibliotecas de la UPC (Universitat Politècnica de Catalunya), posibilitando la búsqueda de libros y artículos científicos, que incluyen literatura extranjera en formato papel o digital y que está suscrita a otros buscadores de bibliografía científica como ‘Elsevier Science Direct’ a través de la cual se pueden descargar artículos y bibliografía sin ningún coste.

Para apoyar la búsqueda en las bases de datos, se han utilizado algunas palabras clave relevantes para el ámbito de la investigación. Cabe mencionar que la mayor parte de la bibliografía se encuentra en inglés. Las palabras clave que se han utilizado solas o en diferentes combinaciones entre sí son: ‘PHM’, ‘prognosis’, ‘predictive maintenance’, ‘dignosis’, ‘hybrid system’, ‘neural networks’, ‘artificial intelligence’, ‘maintenance strategy’ y ‘forecast’.

Estudio Empírico

Todos los datos numéricos fueron recogidos por las mediciones realizadas en el banco de pruebas facilitado por el grupo de investigación SAC. Para ello ha sido diseñado un programa de recogida y tratamiento previo de datos en Labview compatible con el sistema de adquisición CompactDaq de National Instruments.

Los datos han sido recogidos diferentes días bajo diferentes características y escenarios para disponer de un conjunto de datos rico. El banco de pruebas consta de redundancia de sensores que permiten detectar si alguna de las medidas es incoherente.

Estos datos en extensión TDMS son fácilmente convertibles en XLS compatibles con Microsoft Excel o Matlab para su estudio off-line.

Al trabajar con hardware de National Instruments se ha elegido software de la misma compañía por la facilidad de integración de software y hardware en tiempo real. Se han utilizado programas como LabView, DIAdem, MatrixX todos con licencia estudiantil perteneciente a la comunidad UPC.

Validez y Fiabilidad

Los datos recopilados en el banco de pruebas han sido recogidos siguiendo el croquis de la Figura 1.4, donde para obtener las características de la puerta se validan los datos de dos maneras.

Primero comparando las señales de sensores redundantes, y segundo recopilando los datos sin procesar y hacer su procesamiento off-line para comparar con los resultados on-line en tiempo real. Este enfoque se cree que reforzará la validez de los datos.

Un enfoque utilizado para fortalecer la construcción de validez se llama triangulación, que pretende utilizar métodos comunes para recopilar los datos (Yin 2005).

La fiabilidad determina el número de errores y tendencias del estudio. Es importante que los métodos aplicados para la recopilación de datos sean descritos por tal de conseguir un alto grado de fiabilidad (Yin 2005). En este proyecto la metodología de recogida de datos se encuentra descrita en el capítulo 5

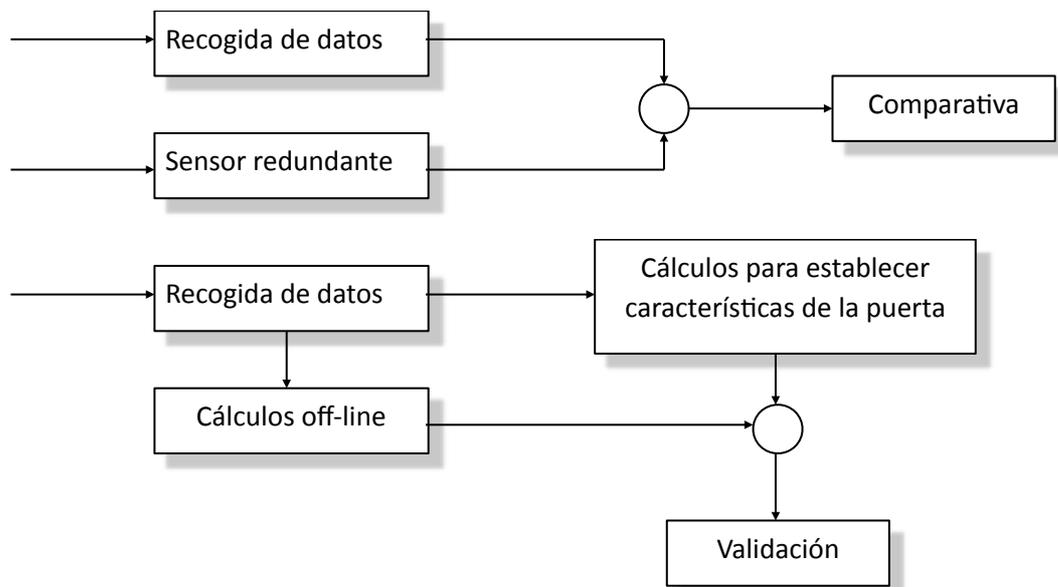


Fig. 1. 4 Croquis de validación de datos

Capítulo 2

Teoría

La teoría más relevante de esta tesis de máster es la teoría relacionada con PHM, ya que envuelve el área de investigación, pero también toda la teoría relacionada con el sistema de estudio representado en la Figura 1.3 así como el sistema híbrido y el sistema supervisor.

Este capítulo sigue la estructura mostrada en la Figura 1.3. Empezando por la definición de falla y avería, a continuación describiendo la función del mantenimiento, centralizada en la Prognosis and Helath Management. La teoría de PHM vendrá seguida por el apoyo de diagnosis y prognosis, concluyendo por la teoría explicativa del problema de la puerta automática.

2. 1. FALLA Y AVERÍA

Los fallos y averías están fuertemente conectados con el mantenimiento. Las averías se relacionan a menudo con el mantenimiento correctivo, al menos a nivel funcional, y los fallos con el mantenimiento preventivo, en el campo de la prognosis o PHM.

Se entiende por *falla* el estado de un componente caracterizado por la inhabilidad de cumplir con una función requerida. Después de un fallo el componente se encuentra en avería, pudiéndose caracterizar un fallo como un evento y una avería como un estado del sistema. Se define por *avería* el estado de un componente por daño o deterioro de forma que impide el funcionamiento, inhabilitándolo para cumplir con la función requerida, una avería es normalmente el resultado de un fallo, pero muchas existen sin previo fallo (IEC-IEV-191-04-01 ; IEC-IEV-191-05-01)

2. 2. MANTENIMIENTO

La necesidad de mejorar los procesos industriales ha incrementado enormemente, en las últimas décadas, la teoría del mantenimiento. La teoría de mantenimiento es una asignatura multi-disciplinar, se expande desde detalles técnicos de métodos de organización hasta el comportamiento humano ante situaciones imprevistas.

La industria aspira a aprovechar todos sus recursos, equipamiento y empleados, para reducir el precio de un producto acabado, como se ha mencionado anteriormente los costos por mantenimiento participan en un índice muy elevado de los costes de producción, por lo tanto deben ser un punto importante de partida, sin alterar la calidad final exigida del producto (Mobley 2002).

Cuando se observan los tiempos de parada tras avería, se puede ver que el tiempo de reparación es pequeño comparado con el tiempo total de parada, debido a que la mayoría del tiempo se dedica a tareas de diagnóstico (localización del fallo). La industria dispone de técnicas y procedimientos que pueden mejorar el tiempo de parada por avería, como, informes de fallos/averías, implementar técnicas de detección de fallos, disponer de la mejor documentación técnica, planear la reparación, información de reparación, testeos y puesta en marcha de los procesos. Estos procedimientos son definidos en los estándares de mantenimiento como la combinación de técnicas y estrategias administrativas, incluyendo las acciones de supervisión, necesarias para reparar o reemplazar un componente para que un proceso vuelva al estado normal de funcionamiento (IEC-IEV-191-07-01).

Los requisitos de seguridad, funcionalidad, calidad y gastos efectivos en sistemas complejos se encuentran en alza continuamente en la industria. Esto convierte al mantenimiento en el factor indispensable para devolver y mantener estos valores (Mobley 2002).

Durante la producción, la funcionalidad de un componente o sistema se convierte en el objetivo principal. Si existe un vacío entre la función requerida y la obtenida se debe realizar alguna acción. Si el vacío es debido a la degradación de los componentes o sistemas la acción necesaria es el mantenimiento. El mantenimiento compensa la degradación de los sistemas en el ámbito operacional y de utilización (Mobley 2002).

Para continuar con un elevado índice de producción, y sobrevivir, las industrias se han visto obligadas a abandonar el mantenimiento correctivo por el concepto de ‘mantenimiento proactivo’, organizado alrededor de personal bien entrenado, con una planificación y gestión minuciosa de las tareas de mantenimiento, donde los trabajadores aprenden cual es el estado normal de funcionamiento y donde empieza la degradación. Abandonando el concepto de ‘reparar cuando se rompe’, por el de ‘gestionar’ (Mobley 2002). En Mobley (2002) se describe la evolución del área de mantenimiento como la búsqueda de la mejora continua entre calidad y competitividad, figura 2.1.

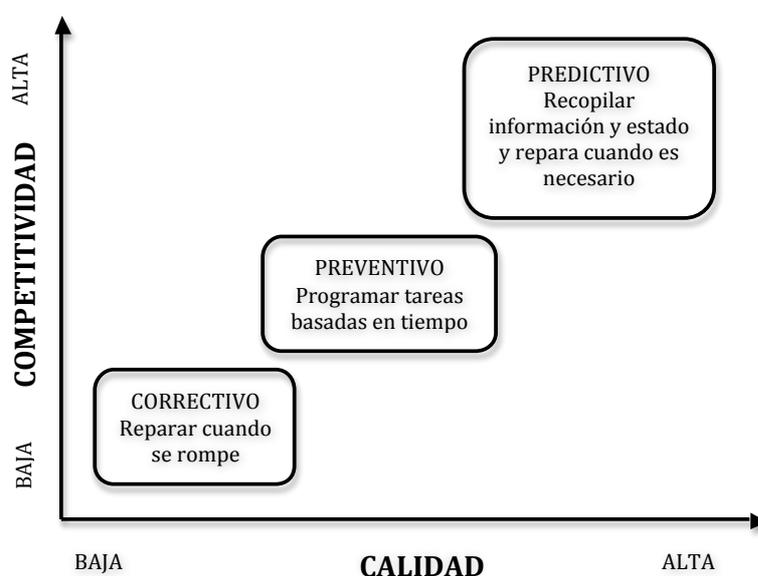


Fig. 2. 1 Evolución Industrial del Mantenimiento

Según Mobley (2002) el mantenimiento se puede dividir en tres grandes grupos, ver figura 2.2:

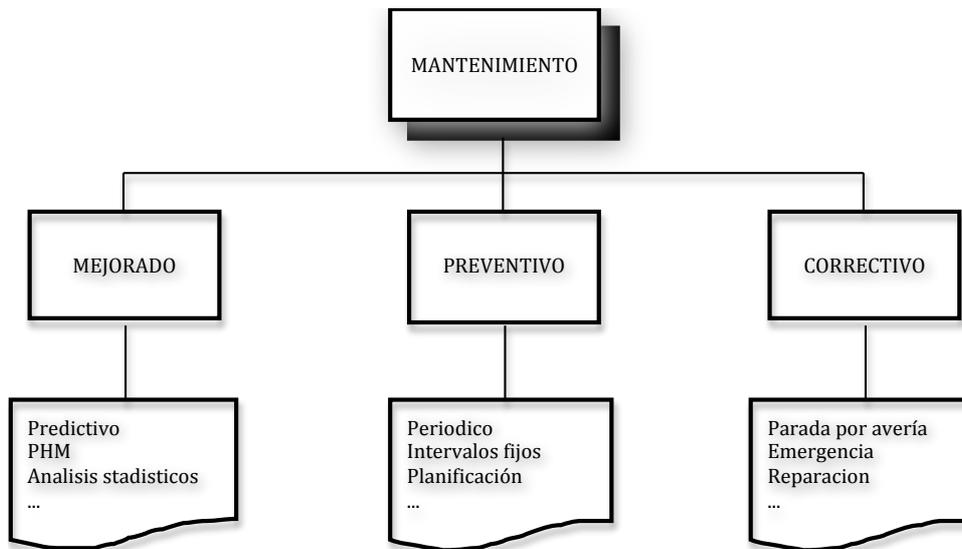


Fig. 2. 2 Estructura del Mantenimiento

Mantenimiento Correctivo

El mantenimiento correctivo es el mantenimiento que se realiza después de una avería con la intención de llevar al componente o sistema a un estado en el que pueda cumplir con la función requerida. (IEC-IEV-191-07-08). Por otra parte, este tipo de mantenimiento basado en la reparación cuando el componente o sistema se encuentra en parada por avería, es en la mayor parte de los casos un modelo de mantenimiento caro e ineficiente. Cuando ha ocurrido una avería impredecible, la planificación de las tareas de mantenimiento es dificultosa y complicada, de manera que la eficiencia del mantenimiento se ve afectada, dando una larga franja de tiempo en concluir la reparación. Por ejemplo, se malgasta más tiempo en encontrar las piezas de recambio, especialistas...; Además las paradas por avería conllevan que el proceso deba ser reinicializado nuevamente y tarde un tiempo en volver a funcionar a pleno rendimiento.

Mantenimiento Preventivo

Como su nombre indica, las tareas de mantenimiento preventivo intentan prevenir las paradas no planificadas y la prematura degradación de componentes o sistemas que dan como

resultado reparaciones o acciones correctivas. La gestión de este mantenimiento consiste en la planificación temporal o de tareas recursivas, como lubricación de componentes o ajustes, que están planeadas para mantener en un nivel aceptable la funcionalidad y disponibilidad de los procesos (Mobley 2002). Dentro del mantenimiento preventivo hay diversas técnicas para su aplicación, una de las más conocidas es la de *'scheduling'* o planificación que consiste en plantear un intervalo fijo para la revisión componentes que brinda la oportunidad de reducir las averías que no pueden ser detectadas previamente o que permite el paro de procesos según requerimientos no por emergencias. Otras técnicas utilizadas según Mobley (2002) son el *'reactive maintenance'* o el *'condition monitoring maintenance'*.

Mejora del Mantenimiento

Para un mantenimiento mejorado se parte de técnicas de pronóstico, que combinadas con las técnicas de detección y aislamiento de fallos ayudan a reducir al mínimo los tiempos de paro en procesos. La mejora del mantenimiento se centra en reducir o eliminar la necesidad de tareas de mantenimiento no planificadas, aplicando soluciones que reduzcan la necesidad de realizar estas tareas.

Por ejemplo, en el terreno industrial muchas de las variaciones son a causa de la falta de lubricación en correas de distribución que se encuentran en zonas oscuras, de difícil acceso e inaccesibles. El aceite no llega a estas zonas para ser lubricadas con la frecuencia necesaria, esta es una tendencia natural, este tipo de averías se pueden reducir instalando bombas de lubricación que inyecten aceite continuamente de manera automática (Mobley 2002).

A continuación se presentan las ventajas e Inconvenientes de implantar sistemas mejorados de mantenimiento según Mobley (2002).

Como principales ventajas podemos citar:

- El mantenimiento puede ser gestionado cuando es necesario.
- Incrementa el tiempo de funcionamiento sin paradas.
- Genera un mayor porcentaje de producción.

- Estandariza procedimientos, tiempos y costes.
- Minimiza el inventario de componentes.
- Reduce el tiempo de reposo de equipos.
- Mejora la seguridad y el control de la polución
- ...

Y, como inconvenientes encontramos:

- Expone al equipamiento a posibles daños.
- Provoca averías en nuevas zonas más fácilmente.
- Utiliza más dispositivos.
- Aumenta el capital inicial.
- ...

2. 3. PHM - PROGNOSIS AND HEALTH MANAGEMENT

Según Hines y Eklund (2009) se entiende por PHM al procedimiento de mejorar el diagnóstico. El proceso de determinar el estado de un componente, para cumplir con su función, está relacionado con las técnicas de detección precoz de fallos y la capacidad de aislamiento de los mismos con una baja tasa de falsa alarma. Además, incorpora la teoría de prognosis para evaluar el estado real de los componentes del sistema utilizándose para ello la predicción y la determinación del tiempo de servicio o vida útil de funcionamiento restante de componentes, a través del modelado de la progresión de fallo.

El termino *'Health Management'*, gestión del mantenimiento, se asocia a la capacidad de tomar decisiones inteligentes, informadas y apropiadas sobre el mantenimiento y acciones de logística. Estas decisiones se basan en el diagnóstico/pronósticos extraídos de la información disponibles en el sistema y la demanda operacional del mismo (Hines 2009).

El objetivo del PHM es calcular la ventana temporal en la cual se deben realizar las tareas de mantenimiento para no comprometer la integridad operacional del sistema. Reduciendo el mantenimiento innecesario así como optimar los intervalos entre acciones de mantenimiento. Se plantea reducir las acciones de mantenimiento no planificadas y los gastos asociados a ellas, mejorando la seguridad y reduciendo el impacto ambiental (Hines 2009).

Otro de los objetivos del PHM es estimar el tiempo restante a fallo y traspasar la información al operario para tomar decisiones correctivas o planificadas, como: detener el proceso, reducir la velocidad(si es posible)...; o informar de que el equipo tiene una alta probabilidad de poder seguir con el funcionamiento normal de un modo seguro (Hines 2009).

La figura 2.3 muestra el típico sistema de inspección basado en PHM. En ella se observan las etapas que debe seguirse para implementar un sistema PHM:

1. Datos: se debe analizar la accesibilidad de los datos disponibles en el sistema estudiado y realizar un pre-tratamiento de los mismos (por ejemplo: filtrar para eliminar ruidos o datos incorrectos);
2. Monitorización y detección: a partir de los datos disponibles, se deben utilizar técnicas de diagnóstico para detectar comportamientos o tendencias anormales;
3. Diagnóstico: se debe disponer de un sistema de diagnóstico precoz de fallos para localizar el componente que se está degenerando o está en fallo;
4. Pronóstico: implementar técnicas que a partir de la información disponible, puedan predecir, entre otras, la vida útil de los componentes del sistema;
5. Re-organización/decisión: etapa en la que se incorporan herramientas de control tolerante a fallos y se planifican las tareas de mantenimiento.

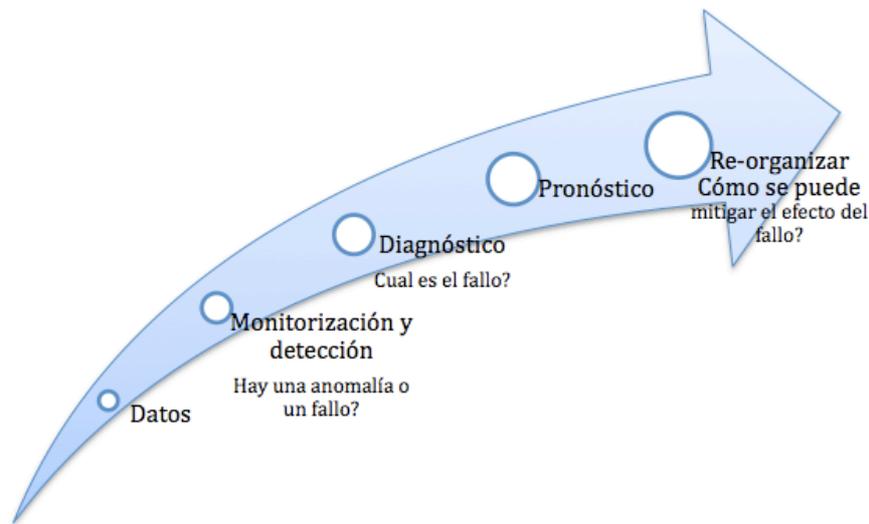


Fig. 2. 3 Típico sistema de inspección utilizado en PHM

2. 4. DIAGNOSTICO Y PRONOSTICO

Estudio de Técnicas de Diagnosis

El objetivo que persiguen todos los métodos de detección y diagnóstico de fallos es caracterizar el comportamiento de un sistema en su modo normal de funcionamiento, ya sea utilizando herramientas estadísticas, modelos cualitativos o analíticos o redes neuronales y analizar si el comportamiento actual del proceso se corresponde con su comportamiento normal. En el caso de no correspondencia se dice que el sistema está en fallo. Además, las desviaciones observadas con respecto al comportamiento normal deben permitir aislar el componente del proceso que este averiado (Escobet T. 2008)

El diagnóstico de fallas abarca varias fases: detección de fallos (decidir si un error se ha producido y el tiempo de ocurrencia), aislamiento de fallos (determinar la ubicación de la falla, por ejemplo, determinar en qué componente ha producido una falla) y la identificación de errores y estimación (identificar la falla y estimar su magnitud).

Para mostrar los principios básicos de diagnosis se presenta un sencillo ejemplo, considerar el circuito eléctrico de la figura 2.4, consiste en una batería (B), un interruptor (S) y una bombilla (L) en serie. Si se asume que solo pueden suceder tres tipos de averías, el

interruptor bloqueado en la posición de apertura, el interruptor bloqueo en la posición de cierre, o la bombilla está rota (Nyberg M. 2008).

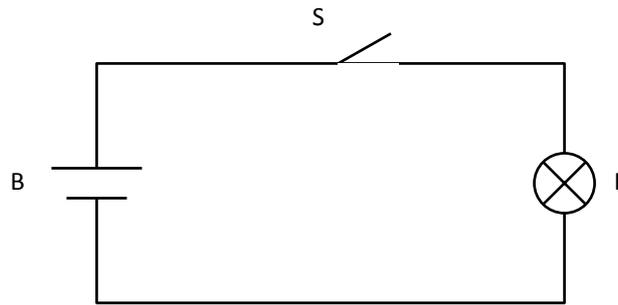


Fig. 2. 4 Circuito eléctrico

La entrada de control es la posición deseada del interruptor, abierto o cerrado. La salida observada reside en la bombilla, si se encuentra encendida o apagada.

Un sistema de diagnóstico para un modelo tan simple como el de la figura 2. 4 puede ser representado por la tabla 2. 1, el diagnóstico es realizable a través de una *lookup table* tan sencilla como esa. Por ejemplo, asumiendo que la observación es “S abierto”, “L apagada”. En concordancia con la tabla 1.1, existen 5 explicaciones posibles a dicha observación con los consiguientes diagnósticos, no hay avería, S se encuentra bloqueado en posición abierta, L está rota, S se encuentra bloqueado en cierre y L está rota, o, S está bloqueado en posición abierta y L rota (Nyberg M. 2008).

POSICIÓN DESEADA DE S	OBSERVACIÓN EN B	TIPOS DE AVERIAS DIAGNOSTICADOS
<i>Abierto</i>	<i>Apagada</i>	<i>“No hay avería”, “S bloqueado abierto”, “L está rota”, “S bloqueado cerrado y L está rota”, “S está bloqueado abierto y L rota.”</i>
<i>Abierto</i>	<i>Encendida</i>	<i>“S bloqueado cerrado”</i>
<i>Cerrado</i>	<i>Apagada</i>	<i>“S bloqueado abierto”, “L está rota”, “S bloqueado cerrado y L está rota”, “S está bloqueado abierto y L rota.”</i>
<i>Cerrado</i>	<i>Encendida</i>	<i>“No hay avería”, “S bloqueado cerrado”</i>

Tabla. 2. 1 Look up table para el diagnóstico del circuito eléctrico

Cada una de las averías caracterizadas se define como diagnóstico. Es común distinguir entre *single fault* y *multiple fault*. Un diagnóstico puede indicar “No avería”, una avería simple o una múltiple. En el primer caso de la tabla aparecen dos diagnósticos de avería simples, “*S bloqueado abierto*” y “*L está rota*” y dos múltiples “*S bloqueado cerrado y L está rota*” y “*S está bloqueado abierto y L rota.*”

Todos los sistemas de diagnóstico pueden ser representados en forma de tabla. Pero cuando el número de posibles casos de avería aumenta, provoca que la tabla se convierta crezca rápidamente. Por lo tanto se utilizan diversas técnicas de diagnóstico, las más utilizadas son las basadas en señales, modelo o en experiencia.

- *Métodos basados en el análisis de señales*, técnicas ampliamente utilizadas y que tienen como objetivo extraer información útil a partir del análisis de determinadas señales, en general se utilizan herramientas estadísticas para analizar los cambios en las señales y detectar problemas.
- *Métodos basados en modelos analíticos*, utilizan modelos matemáticos de la planta para obtener redundancias analíticas, los problemas se detectan a partir de la falta de coherencia entre modelo y datos.
- Por último destacar los *enfoques basados en el conocimiento*, las cuales utilizan técnicas de inteligencia artificial, como redes neuronales.

En el ámbito de las técnicas basadas en modelos, se deben resaltar dos comunidades: la comunidad de FDI en el área de control automático y La comunidad DX en el área de *Inteligencia Artificial*. La comunidad de la *Fault Detection and Isolation* (FDI) tiene sus raíces en la teoría clásica de los sistemas y control automático (Gertler 1998). Por otra parte, la comunidad DX tiene sus raíces en el diagnóstico basado en coherencia elaborado por Reiter (1987). Recientemente, la comunidad BRIDGE basado en el trabajo de Cordier (Cordier 2004) ha proporcionado a los investigadores de ambos campos un marco común para compartir los resultados y las técnicas.

A lo largo del tiempo las dos comunidades han desarrollado varios algoritmos que fusionan las

técnicas basadas en el análisis de señales con las basadas en modelos, creando modelos capaces de obtener un conjunto de relaciones de redundancia analítica (ARR), definidas como la relación entre las variables conocidas del sistema y las redundantes obtenidas a través de los modelos (Staroswiecki M. 2000; Blanke 2006; Krysander M. 2008). Estas relaciones se utilizan en el procedimiento de diagnóstico de fallas para comprobar la coherencia entre el comportamiento observado y el proceso previsto.

Diversos sistemas de detección informáticos se basan en la utilización de ARR. La diferencia entre el valor predicho por el modelo y el valor real medido por los sensores, conocida como residuo, se compara con un valor umbral (de cero en el caso ideal), para detectar si el sistema se encuentra dentro del rango definido como normal. Mientras que un único residual es suficiente para detectar fallas, un conjunto (o un vector) de los residuos es necesario para el aislamiento de fallos (Gertler 1998).

Estudio de Técnicas de Prognosis

En la bibliografía aparecen varias técnicas para realizar pronóstico, a continuación se citarán varias de ellas.

El proceso de progresión de la falla de los sistemas mecánicos por lo general consiste en una serie de estados de degradación, debido principalmente al componente de desgaste y la fatiga durante el proceso de operación. A fin de mantener la vida útil de estos componentes, cabe realizar con regularidad los procedimientos de mantenimiento establecidos. Las estrategias de mantenimiento tradicionales corresponden a las operaciones de mantenimiento correctivo o preventivo.

Prognosis and Health Management, es uno de los tipos de medidas preventivas en la estrategia de mantenimiento. Esta estructura consta de los módulos explicados en el punto anterior, la detección y adquisición de datos, procesamiento de señales, monitoreo de condición, el diagnóstico de fallos y la evaluación del estado del sistema o el pronóstico sumado al apoyo a la decisión, y la logística. Con ello se puede supervisar la situación real de

los componentes del sistema y se puede evaluar si requieren de mantenimiento o no, determinando, además, cuándo será necesario ejecutar las acciones de mantenimiento.

Por otra parte, mediante las técnicas de pronóstico, es posible establecer alarmas cuando los valores previstos caen dentro de la región de advertencia. Gracias a esta información, los operadores dispondrán del tiempo adecuado para tomar medidas correctivas, inspeccionar la condición de los equipos, y realizar una reparación del componente en defecto antes de que ocurra un fallo catastrófico. Por lo tanto, un pronóstico eficaz y eficiente del estado de la máquina es esencial para realizar una buena estrategia de mantenimiento, por este motivo, el pronóstico, se ha convertido en el componente clave de PHM.

Los métodos utilizados para predecir son:

- El computo de la vida útil restante '*remaining useful life (RUL)*': se entiende como la cantidad de tiempo de operación restante en términos de tiempo, ciclos o otras medidas, que le resta a un componente para garantizar el cumplimiento de las especificaciones de diseño.
- El tiempo a fallo '*Time to failure (TTF)*': es el tiempo en que se espera que un componente se averíe, es decir, que no sea capaz de cumplir con su función.
- La probabilidad de fallo '*probability of failure (POF)*': la distribución probabilística de fallos de un componente.

Las técnicas utilizadas para realizar el pronóstico, al igual que las técnicas de diagnóstico de fallos se puede clasificarse en tres categorías: *experience-based*, *model-based*, y *data-driven based*.

- *Técnicas basadas en la experiencia*

Los enfoques basados en la experiencia (*experience-based*) requieren datos históricos de fallo operativo o de los datos del perfil de uso para poder hacer pronóstico. Esto implica la recogida de información estadística de un gran número de componentes y el uso de estos parámetros estadísticos para predecir la vida útil restante (RUL) de los componentes individuales del sistema. En general, estos métodos son las menos complejas para realizar

pronóstico, pero su precisión no es muy alta ya que solamente tienen en cuenta las experiencias pasadas.

- *Técnicas basadas en modelos de pronóstico*

Los enfoques del pronóstico basado en modelos (*Model-based prognostic*) son aplicables donde se dispone de modelos matemáticos que pueden ser construidos mediante fundamentos físicos de un sistema. Estas técnicas utilizan los residuos para realizar el pronóstico, los residuos son los resultados de las comprobaciones de coherencia entre las mediciones del sistema y los resultados del modelo matemático (Luo M. 2005; Tu F. 2007). Estas técnicas presentan algunos inconvenientes que implican que su uso sea sencillo. Algunos de los inconvenientes son:

- Cada componente evaluado requiere de un modelo matemático distinto;
- Es difícil construir un modelo que imite adecuadamente el comportamiento real del componente;
- Cualquier cambio estructural del componente incide en el modelo matemático;

- *Técnicas basadas en data-driven prognosis*

El enfoque por *data-driven prognostic* es también conocido como *data mining o machine learning techniques*. Utilizan y requieren gran cantidad de datos históricos en estado de fallo para construir un modelo de pronóstico, estos datos son utilizados para aprender el comportamiento del sistema. Entre estas técnicas, las herramientas procedentes del campo de la inteligencia artificial se han utilizado regularmente por su flexibilidad en la generación del modelo apropiado. En Zhang (1997) se demuestra la capacidad de utilizar técnicas de inteligencia artificial para el pronóstico.

Otros enfoques encontrados en la bibliografía son, *dynamic wavelets neural networks* para predecir fallos basados en el crecimiento o cambio en las señales de vibración para estimar el RUL impulsados por Vachtsevanos (2001) o en Tran (2009) donde aparecen varios ejemplos de aplicación de métodos de propagación fuzzy-logic y neuro-fuzzy con redes neuronales con señales de vibración para predecir el RUL. Ho, Xie y Goh (2002) comparan los resultados de

utilizar dos técnicas distintas, redes recurrentes y Box-Jenkins, para pronosticar la tendencia de la propagación de fallos.

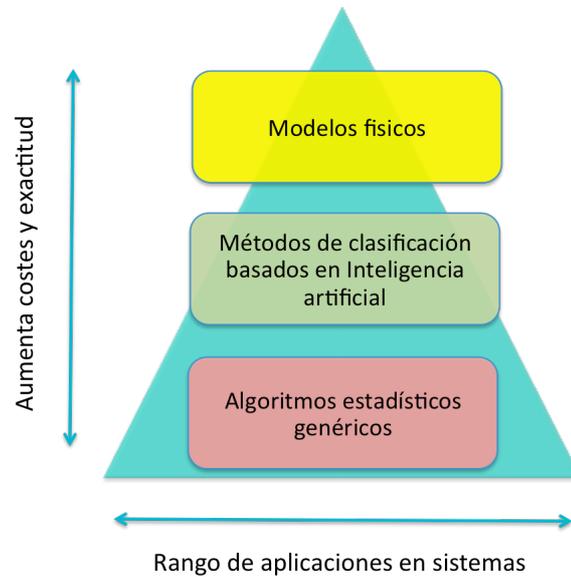


Fig. 2. 5 Jerarquía de técnicas de pronóstico

Esta figura muestra las tres técnicas explicadas anteriormente, y su rango de aplicación en la industria. Al aumentar los costes y la exactitud en las características de un pronosticador, disminuye el campo de aplicación en sistema. Por lo tanto los métodos basados en la experiencia, con algoritmos estadísticos, son los más utilizados en sistemas pero a su vez son los que muestran una menor resolución.

2. 5. SUPERVISIÓN

La supervisión es el primer escalón y el más esencial en la cadena de gestión en cualquier organización. En la industria el papel del supervisor es motivar al grupo de trabajo para que cumplan los objetivos, así como tomar las decisiones correctas, entender y poder comunicarse con los trabajadores, planificar, delegar entrenar y motivar al personal. Estos rasgos introducidos en el mundo del mantenimiento y control automático generan un programa informático capaz de gestionar y tomar las decisiones necesarias en cada momento para planificar tareas en los procesos. Ver figura 2.6.

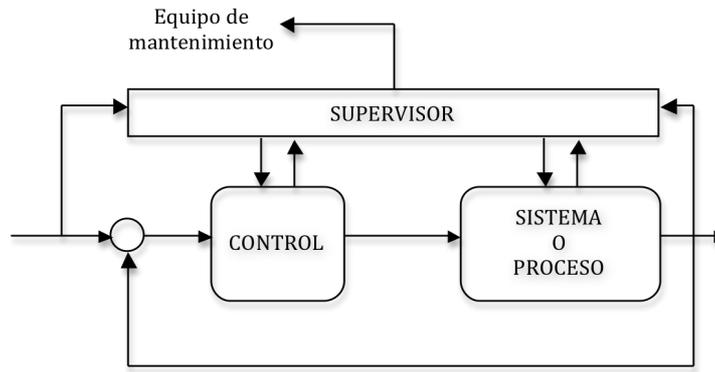


Fig. 2. 6 Diagrama de bloques de un sistema supervisado

Un sistema supervisado con técnicas PHM muestra típicamente los siguientes estados, figura 2. 7).

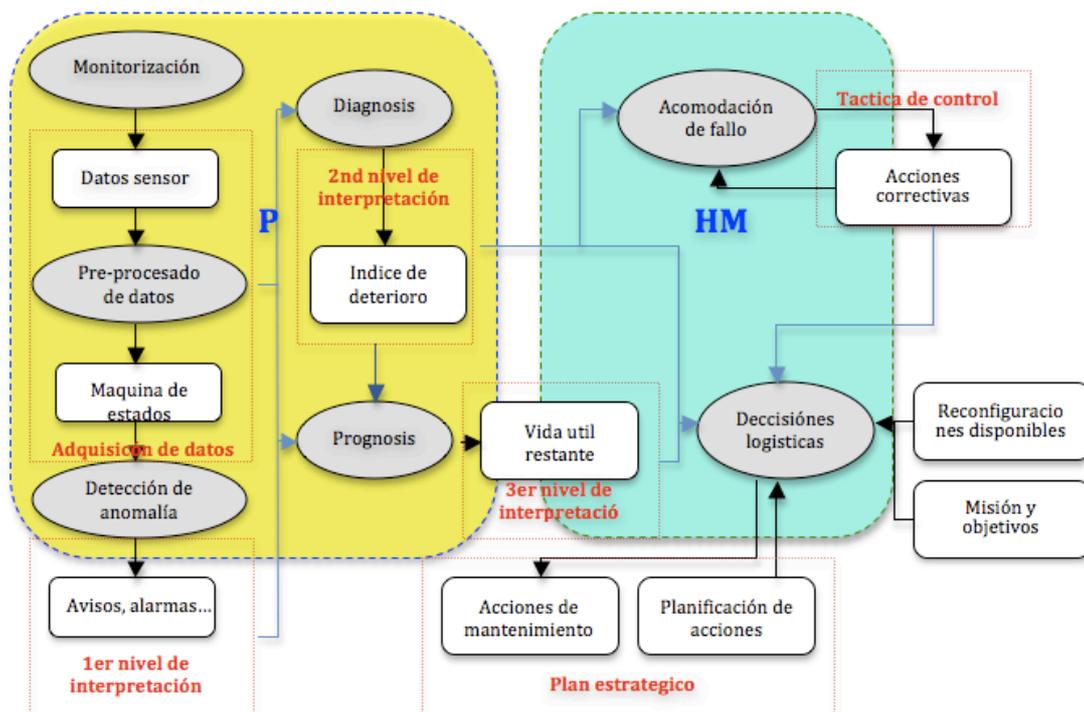


Fig. 2. 7 Arquitectura funcional del PHM.(Eklund 2009)

Se puede dividir un modelo PHM en dos partes, la de pronóstico (P) y la de gestión (HM). La parte de pronóstico envuelve las 4 etapas anteriormente definidas (Datos, Monitorización y detección, diagnóstico y pronóstico), dejando la etapa 5 (re-organización y decisión) para la parte HM.

La figura 2. 7 muestra una posible implementación de un sistema basado en PHM. Donde se parte de la monitorización y adquisición de los datos de los sensores. Toda la información pasa a ser procesada y clasificada para ser utilizada en el diagnóstico o pronóstico. Este punto del sistema es muy importante, ya que el diagnóstico y pronóstico está basado en los datos recogidos de manera que si los datos no son buenos no se podrá diagnosticar y pronosticar de manera fidedigna.

Los datos pre-procesados pasan a una máquina de estados que evalúa el estado del sistema pudiendo detectar anomalías y dar aviso de ello, el diagnóstico también consta de una segunda etapa donde puede aislar el posible fallo e informar del tipo o componente de avería.

Por último se realiza un pronóstico del estado futuro del sistema, facilitando el tiempo de vida útil o la degradación del sistema.

Todos los datos pasan a la parte de HM donde se evalúan los resultados de diagnóstico y pronóstico para gestionar las funciones de logística y mantenimiento.

2. 6. HERRAMIENTAS DE MODELADO

Sistemas Híbridos

En los últimos años, los sistemas híbridos han atraído la atención de investigadores e industriales. El nombre híbrido viene del hecho de que estos sistemas combinan la dinámica continua descrita por ecuaciones diferenciales con la teoría discreta descrita por las máquinas de estados finitos, reglas lógicas, la lógica proposicional y temporal (Bemporad A. 1999). Estos modelos heterogéneos, denominado modelos híbridos, cambian entre los modos operativos, donde cada modo se asocia con una ley dinámica diferente, y las transiciones se activan por eventos.

Varias clases de sistemas híbridos han sido propuestos en la literatura, cada clase es por lo general a medida para resolver un problema particular. Autómatas híbridos y autómatas *PHM Basado en Modelo Híbrido para Sistema Supervisor utilizando Labview*

programados han demostrado ser un marco de modelos exitosos para la verificación formal, y han sido ampliamente utilizados en la literatura (Silva B. 2001). El punto de partida para ambos modelos es una máquina de estados finitos equipado con una dinámica continua.

El modelo conceptual que describe la mayoría de los sistemas híbridos utilizados en la comunidad de control automático es el autómata híbrido discreto, *discrete hybrid automata*, (DHA) (Torrissi 2004). Los modelos DHA son una abstracción matemática de las características ofrecidas por otros modelos orientados en la computación y características específicas de dominio híbrido: Modelos *Mixed logical dynamical* (MLD) (Bemporad A. 1999), sistemas *piecewise affine* (PWA) (Sontag 1981), *linear complementarity* (CL) (VanderSchaft, 1998) y *sistemas max-min-plus-scaling* (MMP) (De Schutter 1999).

Según Bemporad (2006) un sistema híbrido se define como un sistema dinámico cuyo comportamiento muestra ambas componentes, continuas y discretas.

Un autómata híbrido es un modelo matemático representativo de un sistema híbrido, el cual combina en un único formalismo, la transición del autómata para realizar la parte discreta y ecuaciones diferenciales para capturar la parte continua (Bemporad 2006).

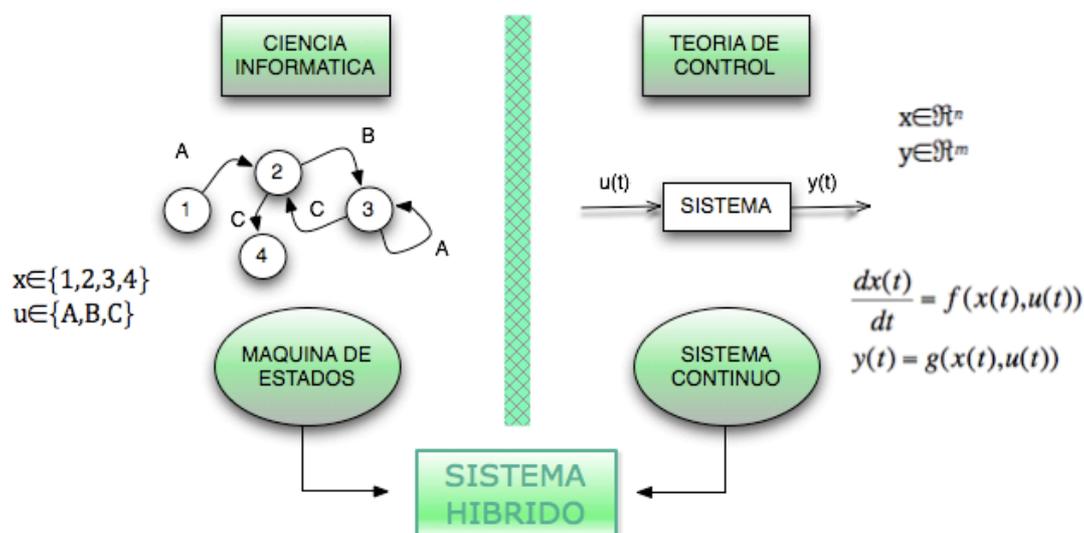


Fig. 2. 8 Figura representativa de un sistema híbrido. (Bemporad 2006)

Un autómata híbrido es un sistema $A=(Q,x,Init,f,D,E,G,R)$: (Henzinger 1997; Yan 2007)

- Q es una recopilación finita de las variables de estados discretas.
- X es una recopilación finita de las variables de estado continuas.
- $Init \subseteq Q \times X$ es un set de estados finitos.
- $f : Q \times X \rightarrow \mathbb{R}^n$ es un vector
- $D : Q \rightarrow 2^x$ asigna a cada $q \in Q$ un dominio.
- $E \subset Q \times Q$ es la recopilación de las transiciones discretas.
- $G : E \rightarrow 2^x$ asigna a cada $e \in E$ un guardián, y,
- $R : E \times X \rightarrow 2^x$ la relación de reset.

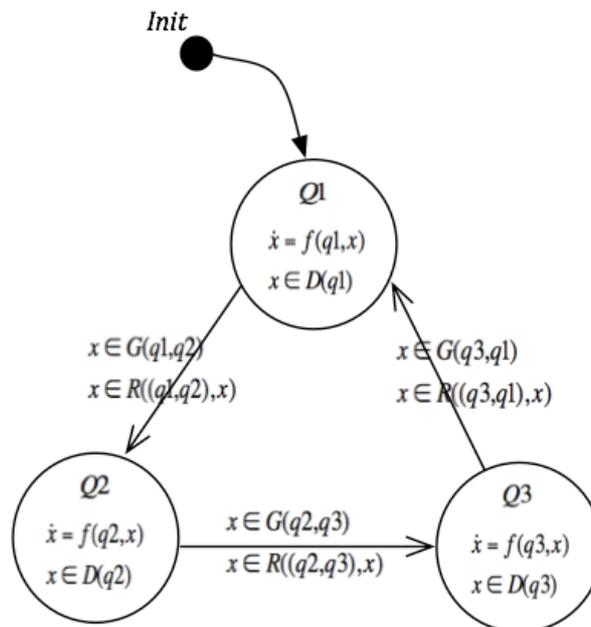


Fig. 2. 9 Autómata híbrido

Redes Neuronales

La rama de la inteligencia artificial, llamada redes neuronales se remonta a la década de 1940, cuando McCulloch y Pitts [1943] desarrollaron el primer modelo neuronal. Esto fue seguido en 1962 por el modelo de perceptrón, desarrollado por Rosenblatt, que generó mucho interés debido a su capacidad para resolver algunos problemas simples de clasificación de patrones. Este interés comenzó a desvanecerse en 1969, cuando Minsky y Papert [1969], señalaron las limitaciones del perceptrón y su debilidad en la computación. En particular, la incapacidad de resolver el clásico or-exclusivo (XOR). Este tipo de inconveniente provocó la disminución temporal del ámbito de las redes neuronales.

En la última década, las redes neuronales han renovado el interés tanto entre los investigadores, como en las zonas de aplicación. El desarrollo de nuevas redes neuronal sumada a la formación de algoritmos mejorados, y gracias a hardware más potente, han contribuido a la reactivación del campo.

La bibliografía de redes neuronales de los últimos años incluye nombres como Boltzmann (la máquina de Boltzmann), Hopfield (las redes de Hopfield), Kohonen (la red de Kohonen), Rumelhart (modelo de aprendizaje Rumelhart competitivo), Fukushima (el modelo de Fukushima), y Carpenter entre otros (Zhang G. 1997). Este campo ha generado el interés de los investigadores en áreas tan diversas como la ingeniería, informática, psicología, neurociencia, la física y las matemáticas.

Inspirada en la estructura del cerebro, una red neuronal consiste en un conjunto de entidades altamente interconectadas, llamadas nodos o unidades. Cada unidad está diseñada para imitar a su contraparte biológica, la neurona. Cada uno acepta un conjunto ponderado de los insumos y responde con una salida (Parra X. 2007).

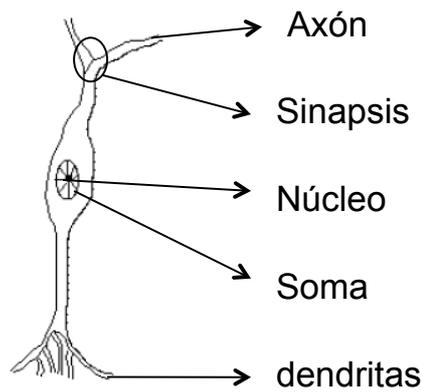


Fig. 2. 10 Definición de Neurona

Las señales provenientes de otras neuronas determinan si la neurona debe activarse. La contribución de las señales a la salida depende de la fuerza de las conexiones sinápticas. La salida depende de la atenuación/amplificación de la sinapsis. Las dendritas reciben las señales amplificadas a través de la sinapsis y las envían a los cuerpos celulares, donde son sumadas. Cuando la suma excede un valor límite, la salida de la neurona es activada.

Redes neuronales artificiales

Una red neuronal artificial, mostrada en la bibliografía como ANN por sus siglas en inglés *Artificial Neural Network*, es un sistema que permite establecer una relación lineal o no lineal entre entradas y salidas. Sus características están inspiradas en el sistema nervioso lo que les da varias ventajas, tales como, capacidad de aprendizaje adaptativo, son auto-organizativas, pueden funcionar en paralelo en tiempo real y ofrecen tolerancia a fallos por la codificación redundante de la información. Las ANN divergen del comportamiento de los ordenadores convencionales los cuales utilizan algoritmos secuenciales, mientras las ANN actúan como el cerebro humano, procesando la información en paralelo, y con la capacidad de aprender y generalizar en situaciones no incluidas en el proceso de entrenamiento. Las ANN pueden procesar información de forma más rápida que los computadores convencionales, pero tienen la desventaja de que no podemos seguir su respuesta paso a paso como se puede hacer al ejecutar un programa convencional en un ordenador, por lo que no resulta fácil detectar los errores. Estas redes son muy efectivas para resolver problemas complicados de clasificación y

reconocimiento de patrones. La más utilizada es la llamada de propagación hacia atrás *back-propagation* (Villada F. 2008).

El método de *back-propagation* para el entreno de redes neuronales funciona de la siguiente manera, coge los elementos de entrada y los de salida y va equilibrando los pesos desde los nodos de salida hacia las entradas por eso se llama *back-propagation* por que propaga el resultado hacia atrás hasta las entradas.

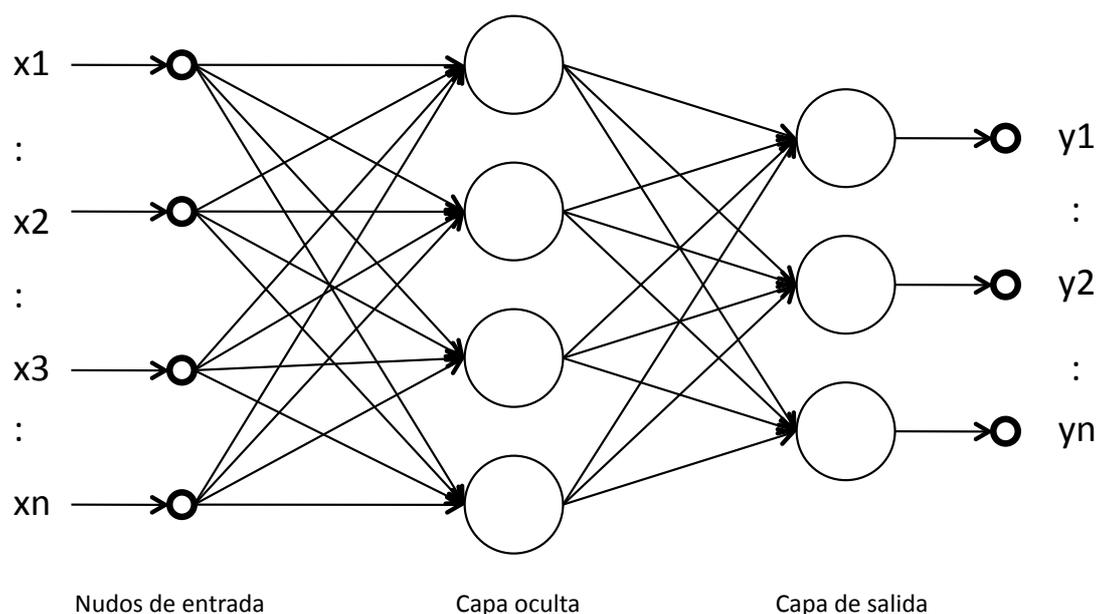


Fig. 2. 11 Típico Multi Layer Perceptron (MLP), red neuronal feedforward

Las ANN se han empleado para resolver numerosos problemas. Entre estos, los económicos y financieros, destacando en gran medida su aplicación en la predicción de series temporales y su capacidad para detectar y explotar la no-linealidad existente en los datos, aun en condiciones donde existen datos incompletos o con la presencia de ruido; en los últimos tiempos gracias a estas características se han utilizado en el campo de prognosis. También se destacan por su desempeño en la solución de problemas complejos, donde el reconocimiento de modelos o comportamientos es importante (Villada F. 2008).

Para este estudio se presentará la red Multy Layer Perceptron (MLP), utilizada para variedad de problemas especialmente en predicción por su capacidad de mapeado arbitrario de sus entradas y salidas. Un MLP está compuesto típicamente por diversas capas de nodos. La

primera capa o la de más bajo nivel es la capa de entrada, donde se recibe la información externa. La última capa o de más alto nivel, es la capa de salida, donde se obtiene el resultado del problema. La capa de entrada y la de salida están separadas por una o más capas intermedias llamadas capas ocultas. La figura 2.11 muestra una red MLP de propagación hacia delante con una capa oculta. El número de entradas es directamente dependiente de la información disponible para clasificar mientras que el número de neuronas de salida es igual al número de clases a separar. Las unidades de una capa se conectan unidireccionalmente con las de la siguiente, en general todas con todas, sometiendo sus salidas a la multiplicación por un peso que es diferente para cada una de las conexiones (Zhang G. 1997).

Para un ejemplo explicativo, de un problema causal de predicción, las entradas a la ANN son normalmente independientes o las variables de predicción, la función de estimación de la red puede escribirse como

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_p),$$

Donde x_1, x_2, \dots, x_p son p variables independientes e Y es una variable dependiente. En este caso una ANN es funcionalmente equivalente a un modelo de regresión no lineal. Pero por otra parte, para un problema de predicción las entradas son típicamente las observaciones pasadas de los datos, mientras que la salida es el valor futuro. La ANN caracteriza la siguiente función

$$Y_{t+1} = f(y_1, y_{t-1}, \dots, y_{t-p}),$$

Donde $Y(t)$ es la observación en el instante t .

Antes de poder utilizar una ANN para cualquier tarea, esta debe haber entrenado para ello. Básicamente el entrenamiento es el proceso para determinar los pesos de la red, el elemento clave de una ANN. El entrenamiento de una red MLP es supervisado, esto quiere decir que existe una respuesta deseada o *target* value para cada valor de entrada o *pattern*.

Los datos de entrada para el entrenamiento se encuentran en forma de vector de variables de entrada o *patterns*.

A cada nodo de entrada le corresponde una variable de entrada del vector de entrenamiento, de manera que el número de nodos de entrada determina las dimensiones del vector de *patterns*. Para un problema causal de predicción los nodos de entrada corresponden con las variables independientes del problema y de manera que es un valor conocido.

El proceso de entrenamiento es normalmente de la siguiente manera. Primero, ejemplos del set de entrenamiento se introducen en los nodos de entrada. Los valores de activación de la primera capa son pesados y acumulados en cada nodo. El total es transformado en una función de activación para cada nodo. Esta función es la entrada para la siguiente capa, hasta encontrar la función de activación de la salida. Los algoritmos de entrenamiento se utilizan para encontrar los pesos que minimizan el error total de la red, formado por la suma de los errores al cuadrado (SSE), o el valor medio del error al cuadrado (MSE).

Para un problema de predicción, los patrones de entrenamiento consisten en un número fijo de observaciones. Suponiendo que tenemos N observaciones y_1, y_2, \dots, y_n en el set de entrenamiento y se necesita predicción a un paso, utilizando una ANN con n nodos de entrada, le corresponden $N-n$ *patterns* de entrenamiento. El primer *pattern* de entrenamiento estará compuesto por y_1, y_2, \dots, y_n como entrada, e y_{n+1} como salida o *tarjet*. El segundo set de entrenamiento contendrá y_2, y_3, \dots, y_{n+1} como entrada e y_{n+2} como salida deseada. Finalmente, el ultimo set de entrenamiento estará compuesto por $y_{N-n}, y_{N-n+1}, \dots, y_{N-1}$ como entradas, e y_N como salida. Normalmente se utiliza una función objetivo o de coste para minimizar el error durante el proceso de entrenamiento, por ejemplo una función SSE definida como

$$E = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=n+1}^n (y_i - a_i)^2 \right),$$

Donde a_i es la salida actual de la red y el $\frac{1}{2}$ se incluye para simplificar la acción derivada del algoritmo de entrenamiento.

Capítulo 3

Caso de Estudio

Para el diseño de un sistema de supervisión avanzado basado en señales, es necesario evaluar y caracterizar, cada una de las señales analógicas y digitales disponibles, con el objetivo de obtener la información necesaria para poder clasificar el sistema como comportamiento normal o comportamiento en fallo. En el presente capítulo se describe el caso de estudio, a través de todos los sensores instalados, primeramente se muestra una relación de los sensores disponibles en el banco de pruebas sus ventajas e inconvenientes así como una breve descripción del sistema de adquisición utilizado.

3. 1. SENSORES INSTALADOS

En la tabla 3. 1 se muestra un listado con todos los sensores y accionadores actualmente disponibles en el banco de pruebas. En la tabla se muestra el nombre del sensor o transductor, una breve descripción así como el número de canales necesarios para su lectura, el rango de entrada y de salida, y, si se trata de un sensor analógico o digital de entrada o salida al sistema informático. Así como sus ventajas e inconvenientes.

Para acondicionar las diferentes señales digitales provenientes del banco de pruebas se utilizan relés de GORDOS, sus principales características se muestran en la tabla 3. 2. Se

disponen de 8 relés uno para cada final de carrera, real o virtual y también dos para la botonera, uno para el botón de abrir y otro para el botón de cerrar.

DESCRIPCIÓN	CANALES	RANGO ENTRADA	RANGO SALIDA	ANALO/DIGITAL	INPUT/OUTPUT	VENTAJAS	INCONVENIENTES
POSICIÓN							
Sensor lineal de TEMPOSONICS instalado solidario con la correa movida por el motor que arrastra las puertas, resolución 0,005mm	1	50-1500mm	0-10V	ANALO	INPUT	- Comportamiento lineal. - Nivel de ruido bajo - No necesita procesado - La pendiente en la zona lineal permite calcular la velocidad - No aporta rozamiento adicional	- Sensor extra
INTENSIDAD							
Sensor monofásico de LEM por efecto hall	1	±3A	2,5±0.625V	ANALO	INPUT	- Muestra la amplitud y la frecuencia de la corriente aplicada a una de las fases del motor en cada uno de los estados de la puerta.	- Ruido - Necesita ser procesado, ejemplo: fft
TEMPERATURA							
Infrarrojos: apuntando al rotor del motor recta de calibración	1	0-200°C	0-10V	ANALO	INPUT	- Permite observar la Temperatura interna del motor - No hay contacto entre el sensor y el motor	- Sensor extra - Sensor costoso
FINALES DE CARRERA							
Puerta cerrada: se activa por el contacto de la puerta con el marco.	1	0-5V	0-1 (ON-OFF)	DIGITAL	INPUT	- Sensor existente	- Sensor TTL
cerrojo: se activa cuando la puerta cierra totalmente ¹	1	0-5V	0-1 (ON-OFF)	DIGITAL	INPUT	- Sensor existente	- Sensor TTL
Puerta abierta: se activa al contacto de la puerta con el sensor instalado al final de la guía	1	0-5V	0-1 (ON-OFF)	DIGITAL	INPUT	- Sensor efecto hall - Bajo coste - Robusto a golpes y suciedad	- Sensor extra - alimentación a 24V
Virtual puerta cerrada: sensor virtual proporcionado por el variador ¹	1	0-20V	0-1 (ON-OFF)	DIGITAL	INPUT	- valor redundante calculado por el variador a través de los pulsos del encoder interno del motor. - Sensor existente	- inaccessibilidad de la función o modo de calculo
Virtual puerta abierta: sensor virtual proporcionado por el variador ¹	1	0-5V	0-1 (ON-OFF)	DIGITAL	INPUT	- valor redundante calculado por el variador a través de los pulsos del encoder interno del motor. - Sensor existente	- inaccessibilidad de la función o modo de calculo
FOTOCELULA							
Sensor de infrarrojos. ¹	1	0-5V	0-1 (ON-OFF)	DIGITAL	INPUT	- Sensor existente de seguridad anti-choques	- alimentación a 24V
BOTONERA							
Botón de abrir ¹	1	0-5V	0-1 (ON-OFF)	DIGITAL	I/O	- Pulsador estándar	- Sin efecto báscula o de recuerdo de estado, se debe mantener pulsado
Botón de cerrar ¹	1	0-5V	0-1 (ON-OFF)	DIGITAL	I/O	- Pulsador estándar	- Sin efecto báscula o de recuerdo de estado, se debe mantener pulsado

Tabla 3. 1 Sensores y accionadores instalados en el banco de pruebas¹

¹ Sensores existentes en el banco de pruebas

En la tabla se observa que el banco de pruebas consta de 3 sensores analógicos y 8 digitales, y el sistema informático dispondrá de 11 entradas.

Para adaptar los diferentes valores digitales a la entrada del sistema informático se han instalado relés, que hacen la función de adaptadores. La siguiente tabla muestra el tipo, marca, rango y descripción de los relés utilizados. Son necesarios 8, uno para cada señal digital.

	DESCRIPCIÓN	RANGO DE ENTRADA	RANGO DE SALIDA
ADAPTADORES	RELES: CROUZET de GORDOS DR-IDC5 para la adaptación de las señales digitales	3.3-32v	5 VDC lógicos.

Tabla 3.2 Acondicionadores de señal

En el croquis de la figura 3. 1, se muestra la puerta automática, base del banco de pruebas, con todo el conjunto de sensores instalado y su ubicación.

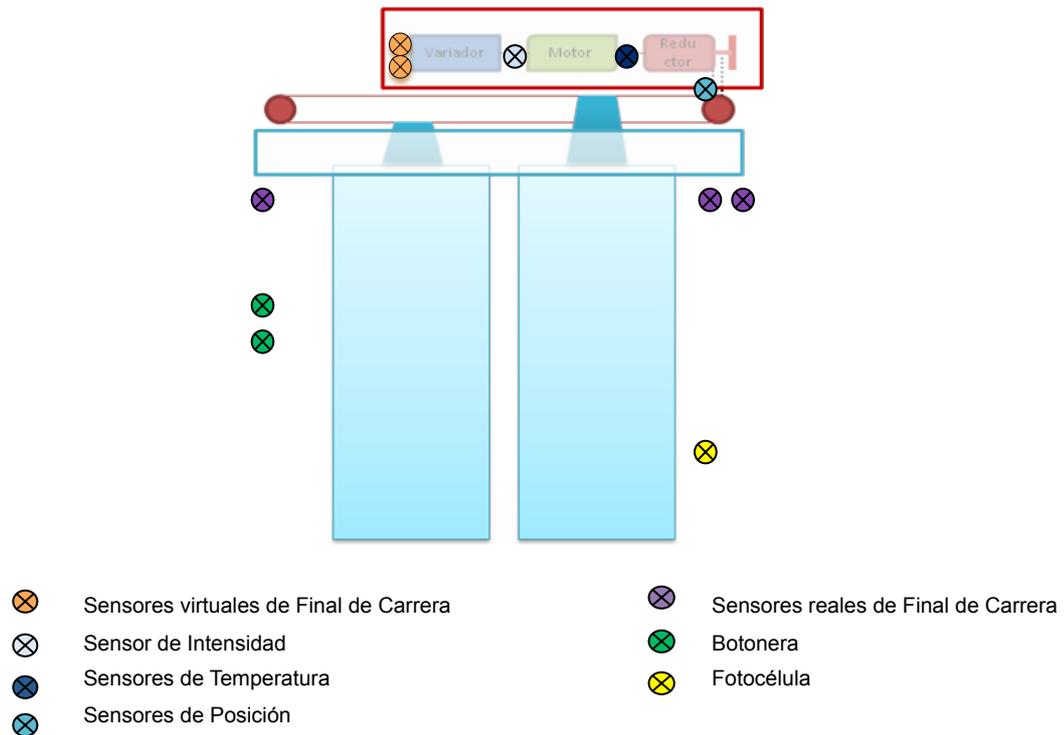


Figura 3.1 Croquis de ubicación de sensores

3. 2. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Para este estudio se ha utilizado hardware de National Instruments por su fácil conexión e implementación con LabView y por la gran disponibilidad de sistemas hardwares capaces de funcionar en tiempo real.

Se ha optado por un sistema Compact-DAQ que tiene la particularidad de ser configurable, dispone de 8 ranuras para diferentes módulos independientes. Se han utilizado de dos tipos, uno para leer las entradas digitales y otro para leer las entradas analógicas.

NI cDAQ-9172

El sistema de adquisición vía USB compact DAQ de NI permite la conexión de 8 módulos de entrada/salida, tiene unas dimensiones compactas 25x9x9cm, se conecta vía USB e incluye una fuente de alimentación de 11 a 30V (Instruments 2006).

Características principales del chasis cDAQ:

- Permite la conexión de módulos para sensores específicos
- Resolución de 24 bits
- Frecuencia de adquisición de 3.2MS/s
- Permite la conexión de 256 canales por chasis
- Trabaja sobre el sistema operativo Windows 2000/XP
- Software recomendado, Labview, LabWindows/CVI, Measurements Studio, VI Logger.

NI 9205 Modulo de Entradas de Canales Analógicos

El modulo de entrada de señales analógicas tiene una resolución de 16-bits, consta de 32 canales y su rango de entrada va de $\pm 200mV$ a $\pm 10V$. Permite la conexión como diferencial, como 'referenced single-ended (RSE)', 'Non-referenced, single-ended(NRSE)' (Instruments 2008).

NI 9401 Modulo de Entrada/Salida de Canales Digitales

El modulo de I/O de señales digitales utiliza la tecnología TTL, consta de 8 canales configurables 4 a 4 como entrada o salida (Instruments 2008).

Niveles lógicos de entrada

- Entrada.....5,25V máx.
- Nivel alto.....2V min.
- Nivel bajo.....0,8V máx.

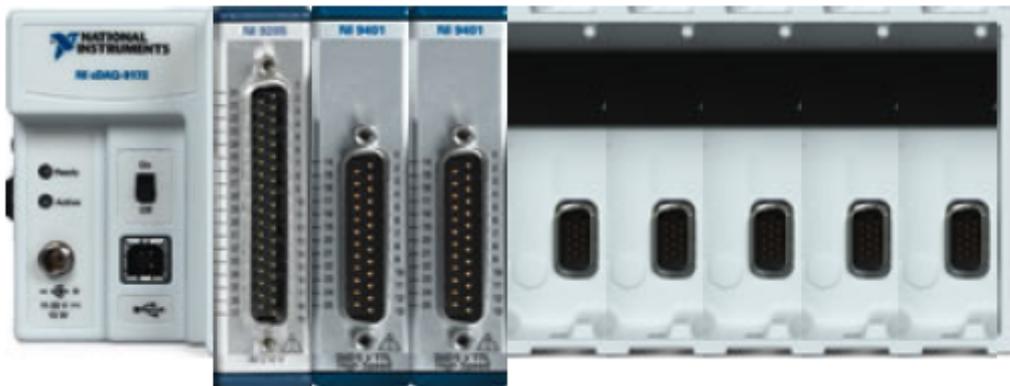


Fig. 3. 2 cDAQ con los módulos 9205, 9401 (2)(de izquierda a derecha).

3. 3. CASO DE ESTUDIO

En este apartado se muestran los diferentes resultados experimentales obtenidos al trabajar con el banco de pruebas con 4 escenarios diferentes, por tal de poder caracterizar sus prestaciones para monitorizar y diseñar un programa de pronóstico y detección precoz de fallos para el control del estado del sistema. Con los datos obtenidos es posible fijar una vía de comportamiento de la puerta ante anomalías y generalizar las variables observadas para su comportamiento normal, permitiendo evaluar la diferencia en las prestaciones.

Descripción de los Escenarios

- Escenario 1: Escenario sin fallos, estado normal.
- Escenario 2: Escenario de deterioro de la guía.
- Escenario 3: Escenario de fatiga.
- Escenario 4: Otras observaciones.

(Los ensayos han sido realizados a temperatura ambiente.)

- *Escenario 1: Escenario sin fallos*

En este escenario se toman datos del comportamiento normal de la puerta para así poder caracterizar las prestaciones de la puerta en un estado normal de trabajo. Con ello se podrán observar las diferencias entre las señales en las condiciones de operación sin fallos y con fallo.

Este escenario, por tanto, es simplemente la ejecución de un ciclo de apertura/cierre de la puerta en condiciones normales

- *Escenario 2: Escenario de deterioro de la guía*

Este escenario está pensado para simular un desgaste en la guía, provocado por el deterioro del sistema por el paso del tiempo. El experimento realizado ha consistido en aumentar la fricción de la puerta sobre la guía. Para ello, se ha reducido la sección útil de la guía disponiendo cinta adhesiva para que las ruedas de la puerta tengan menos libertad.

- *Escenario 3: Escenario de fatiga*

Este escenario trata de fatigar el sistema y observar la degradación de los parámetros. Se mantiene el sistema en funcionamiento continuado durante varias horas y se calculan los parámetros de velocidad máxima en la zona continua, el tiempo de ciclo....

- *Escenario 4: Otras observaciones*

Durante el estudio del sistema se han observado posibles síntomas que podrían dar paso a fallo, estos se describen en este punto.

Escenario 1: Escenario sin Fallos

A continuación se estudiarán las señales procedentes de los sensores instalados en el banco de pruebas para obtener las características descriptivas de la puerta automática en estado normal.

En la figura 3.3 se pueden observar las señales de posición e intensidad. En primer lugar se encuentra la señal de posición, donde aparece una zona creciente, apertura, y una zona decreciente el cierre. Se puede observar como la velocidad de la puerta no es siempre constante, sino que tanto en apertura como en cierre se dispone de 3 velocidades.

En el caso de la apertura encontramos que la primera zona de velocidad lenta corresponde con el desenclave del gatillo, el cerrojo de la puerta. Una vez desenclavado el cerrojo, la puerta procede a la apertura horizontal de sus hojas, antes de llegar al final del recorrido la velocidad vuelve a variar disminuyendo su valor por tal de no golpear la escuadra al final de recorrido. En el caso del cierre de puerta, se observa el mismo suceso, al comenzar el movimiento de cierre la puerta circula con menor velocidad, aumentando la misma en el momento de movimiento horizontal de las hojas. Finalizando el recorrido para cerrar el cerrojo y fijar la puerta en estado cerrada a la puerta circula a menor velocidad.

Este cambio de estado en la velocidad se observa a su vez en la corriente que alimenta el motor que arrastra las hojas de la puerta. Se trata de un motor de corriente alterna por lo tanto la señal obtenida por el sensor de intensidad tiene una forma sinusoidal.

La amplitud y la frecuencia de la corriente del motor varía según la zona en la cual se encuentra la puerta, con menos velocidad menor frecuencia y diferenciándose a su vez la amplitud de la corriente en la apertura y en el cierre.

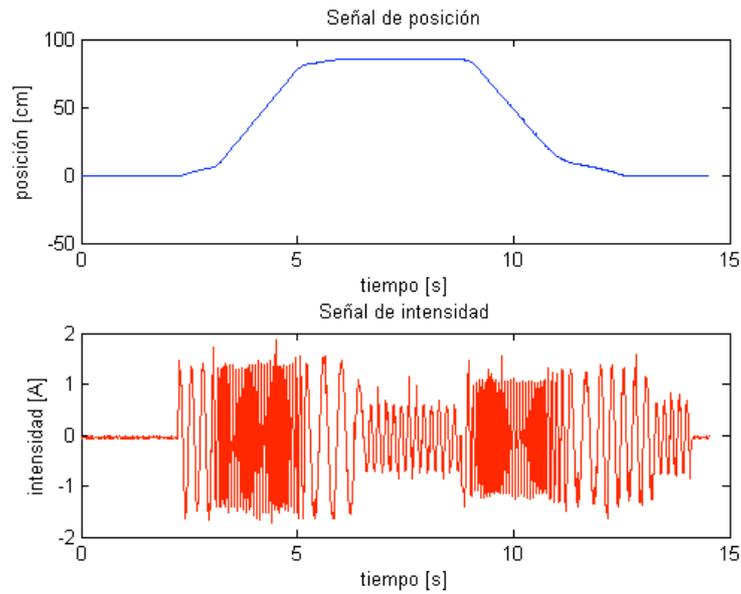


Fig. 3. 3 señales de posición y velocidad

La figura 3.4 muestra ambas señales la de posición y la de corriente en un mismo grafico donde se observa la coincidencia de cambio en las prestaciones según la zona de trabajo. Conforme la velocidad es más rápida el motor trabaja a más alta frecuencia girando más rápidamente y funcionando a mayor rendimiento, mientras en las zonas de menor velocidad necesita mayor par y por ello la amplitud es algo mayor.

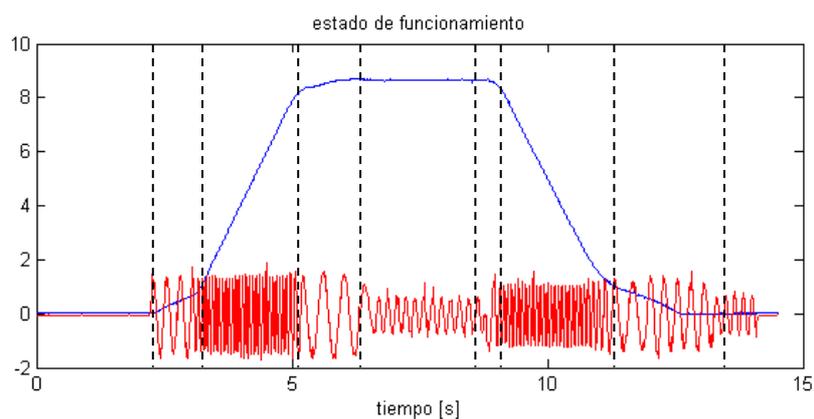


Fig. 3.4 Estado de funcionamiento escenario 1

El sensor de intensidad proporciona un voltaje equivalente a la intensidad circulante por el motor que controla la puerta, por ello se mostrará mayor atención a este parámetro.

Se trata de una señal oscilante con variaciones en la frecuencia y la amplitud. Se han realizado las 4 siguientes tareas para estudiar el comportamiento de dicha señal, en la zona de movimiento horizontal de las hojas de la puerta, ya que es la zona de mayor trabajo.

- *Escalado de la señal.* Esta medida está centrada a 2,5 voltios, de manera que el primer paso es eliminar este offset para disponer de la amplitud real de la señal intensidad. Para obtener el valor real de la intensidad se aplica el factor de conversión siguiente:

$$I(A) = 3.2 * I(V) - 8.06$$
- *Descomposición de la señal en función del estado de la puerta.* Se realiza la descomposición de la señal de intensidad según apertura y cierre, estudiando la zona de velocidad constante
- *Análisis espectral de los estados.* El espectro de la intensidad aplicada al motor para cada uno de los estados de la puerta se muestra en la figura 3.5. En la estimación del espectro se ha utilizado la función “periodogram”, la cual realiza una ponderación del cuadrado de la transformada de Fourier de la intensidad, ver figura 3.6.

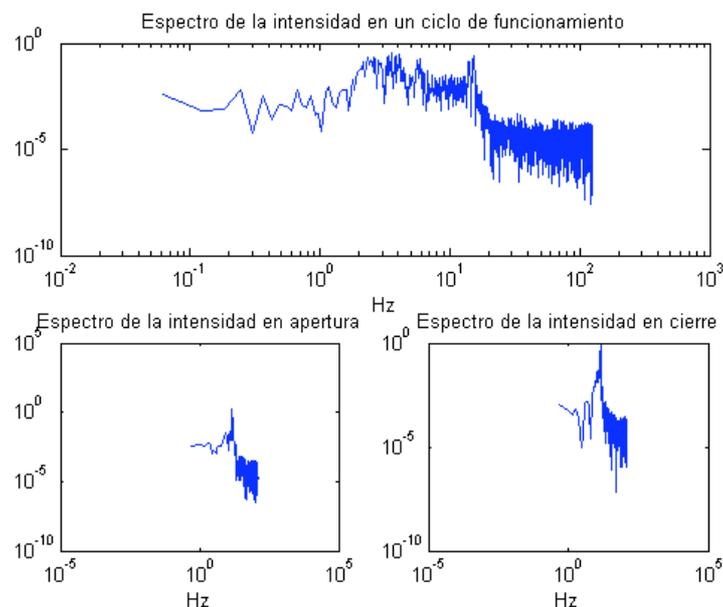


Fig. 3. 5 Espectro de la señal de intensidad, escenario 1

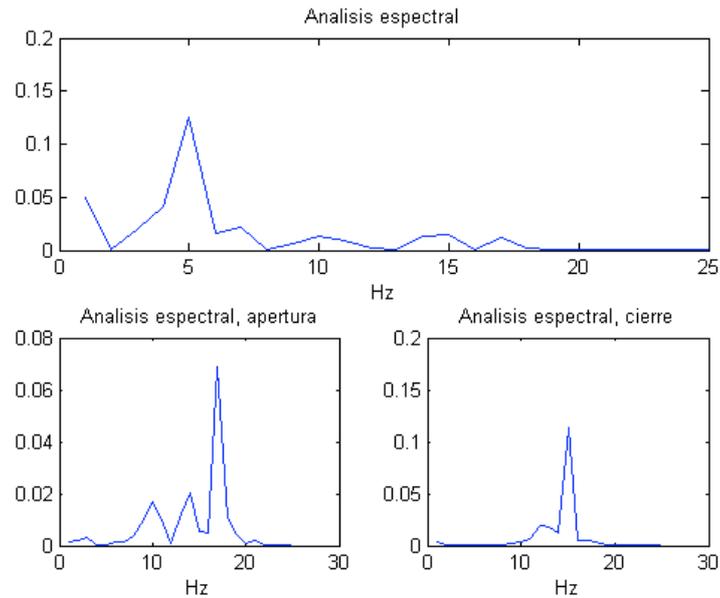


Fig. 3.6 Análisis espectral, escenario 1

- *Determinación de la amplitud de oscilación en cada uno de los estados.* La amplitud de la intensidad en los distintos estados se visualiza en la figura 3.7. Se observa que la amplitud de la señal de intensidad cuando la puerta está cerrada tiene un valor medio de 0A, y cuando se encuentra abierta de 0,5A. La amplitud en estado de apertura es de 1,2A, y tan sólo de 1A cerrando. La amplitud aumenta en el transitorio de cerrando a cerrado, mientras que no varía en el transitorio de apertura a abierta pero

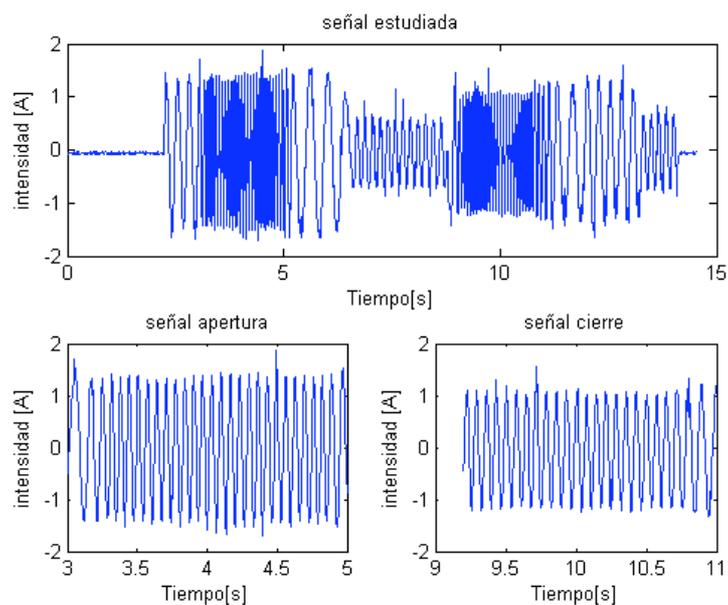


Fig. 3.7 Amplitud de la intensidad en los diferentes estados de la puerta, escenario 1

Se deduce del resultado que hay una relación entre la amplitud y la frecuencia en cada estado de la puerta. En los estados de apertura y cierre la relación entre la amplitud y la frecuencia son diferentes.

Escenario 2: Escenario de Deterioro de la Guía

En este escenario se han recogido las mismas señales que para el escenario 1, y se ha aplicado el mismo programa de estudio y análisis para la señal de intensidad obteniendo los siguientes resultados.

El Análisis espectral de los estados, el espectro de la intensidad del motor para cada uno de los estados de la puerta se muestra en la figura 3.8, que en comparativa con la figura 3.5, muestra un mayor índice de ruido. La estimación del espectro se ha desarrollado con la función “periodogram”, como en el caso anterior, la cual se muestra en la figura 3.9, donde es fácil observar que el espectro de la señal de intensidad es sensible al deterioro de la guía.

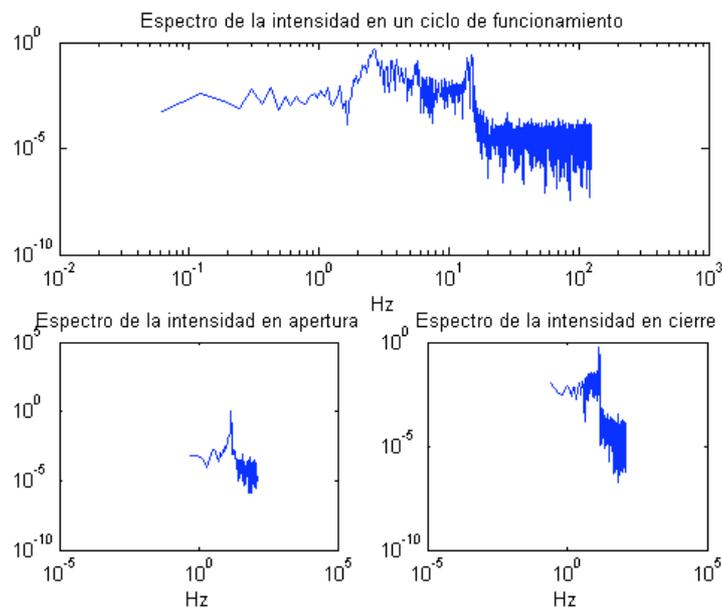


Fig. 3.8 Espectro de la señal de intensidad, escenario 2

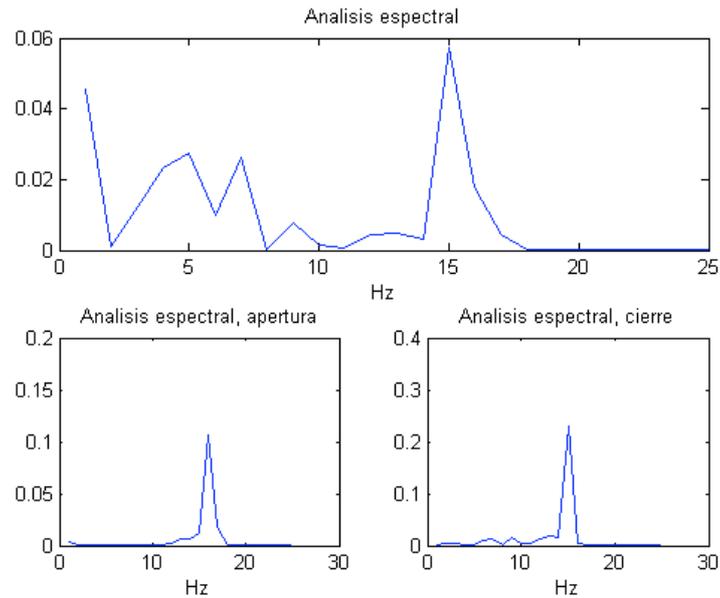


Fig. 3.9. Análisis espectral, escenario 2

Al determinar la amplitud de oscilación en cada uno de los estados, se puede observar que no hay gran diferencia con los valores del escenario anterior, pero si se detecta un cambio en el tiempo que tarda en realizar el recorrido de cierre de puerta, aumentando al aumentar el rozamiento de las ruedas con la guía.

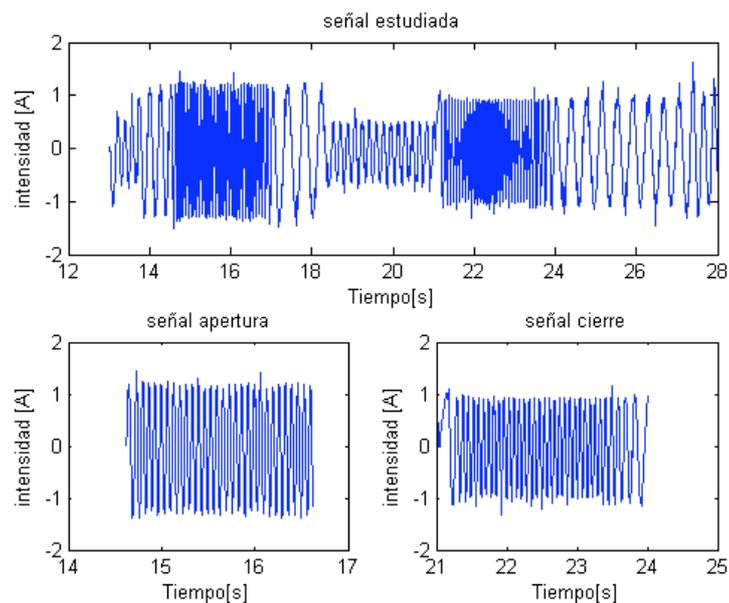


Fig. 3. 10 Amplitud de la intensidad en los diferentes estados de la puerta, escenario 2

Un desgaste en la guía que simula un deterioro en las prestaciones del sistema se refleja en la señal de intensidad del motor, y en el tiempo de ciclo.

Escenario 3: Escenario de Fatiga

La siguiente tabla muestra los resultados de fatiga realizados en el escenario 3. Se han recogido múltiples ciclos cada hora y se ha realizado la media del tiempo transcurrido entre el sensor de puerta cerrada y el de puerta abierta, y del sensor virtual de puerta cerrada al sensor digital de puerta abierta, por tal de comparar la degradación de los parámetros con el paso del tiempo y el uso. A su vez, se han tomado los valores máximos de amplitud y frecuencia del sensor de intensidad que caracteriza la degradación del motor.

	Funcionamiento normal				
	$\Delta t_{\text{cerr_abrir}}$	$\Delta t_{\text{virt_cerr_abrir}}$	Vel. (V/s)	F (Hz)	Ampl. (V)
1ª hora	2.9328±0.0131	3.4408±0.0131	3.7835±0.0156	15.0225	2.4681±0.0420
2ª hora	2.9232±0.0186	3.4336±0.0197	3.7781±0.0045	14.9973	2.4798±0.0292
3h hora	2.8987±0.0169	3.4120±0.0198	3.7904±0.0079	15.0244	2.4556±0.0299

Tabla 3. 3 Parámetros del escenario 3

A lo largo del tiempo se puede observar una variación en los resultados

Escenario 4: Otras Observaciones

La siguiente tabla muestra un conjunto de observaciones del funcionamiento anómalo de la puerta y las posibles causas, y, la tabla 3.5, muestra los efectos observados en los sensores digitales de la puerta y sus causas probables.

Efectos observados en el movimiento de la puerta	Causas probables
La puerta permanece cerrada	<ul style="list-style-type: none"> El cerrojo no se desenclava El motor no gira o no tiene suficiente par El controlador de puerta no envía señal al motor No llega señal de apertura al controlador La polea de transmisión no engrana Un obstáculo obstruye la apertura

La puerta se abre pero queda atascada	Un obstáculo obstruye la apertura El motor no gira El Controlador de puerta no envía señal al motor La polea de transmisión se ha desengranado
Al final del recorrido la puerta retrocede un poco	Tensión incorrecta de la correa o pretensado del muelle
La puerta permanece abierta	La polea de transmisión no engrana El motor no gira El Controlador de puerta no envía señal al motor No llega señal de cierre al controlador Un obstáculo obstruye la apertura
La puerta se cierra pero queda atascada	Un obstáculo obstruye el cierre El motor no gira El Controlador de puerta no envía señal al motor La polea de transmisión se ha desengranado
La apertura y el cierre de la puerta son más lentos de lo normal	Aumento de la fricción
Durante apertura y el cierre se perciben fricciones agudas (chirridos)	Deterioro en las piezas plásticas de las guías
La puerta no tiene un movimiento continuo	El motor está trabajando en dos fases Desajuste de los sensores IC1 e IC2
La puerta reabre cuando está cerrado el cerrojo	Problemas en el cerrojo

Tabla 3. 4 Observaciones sobre la puerta automática

Efectos observados en los sensores	Causas probables
La puerta se ha cerrado pero no llega señal al operador de puerta	Avería en el sensor lógico de cierre Avería en el patín o gatillo de enclavamiento
Desconexión automática del variador	Sobre intensidad en el motor debido a un fallo del motor o un obstáculo
La fotocélula se activa intermitentemente	Anomalía en la fotocélula debido a presencia de ruidos electrostática, avería del detector,...
Señal continua en la fotocélula	Fotocélula averiada o con un ajuste incorrecto
Señal permanente (0 o 1) en alguno de los sensores binarios	Avería del sensor lógico

Tabla 3. 5 Observaciones de los sensores digitales

Capítulo 4

Aplicación de Técnicas de PHM

En este capítulo se recogen los datos estudiados en el capítulo 3, y se aplican las técnicas necesarias para definir un modelo del sistema para su posterior monitorización, que permita detectar comportamientos anómalos, extraer información para realizar pronóstico y realizar el seguimiento del estado de la puerta para conseguir un funcionamiento seguro y fiable en todo momento.

4. 1. MODELO HÍBRIDO

Con base en la bibliográfica estudiada y en relación con los datos caracterizados en el capítulo 3, caso de estudio, se ha representado el sistema puerta como un modelo híbrido. Con parte continua y discreta.

Definición de los Estados

En funcionamiento normal es sencillo representar los diferentes estado en los que se encuentra la puerta, y al ser un sistema que parte de una situación de reposo y que acaba en el mismo punto se puede considerar un modelo cíclico, que repite una y otra vez el mismo circulo de maniobra.

Evaluando los resultados, se ha establecido que el ciclo de apertura y cierre de la puerta, en funcionamiento normal, puede caracterizarse por los estados de la figura 4.1 Concretamente, se han considerado ocho estados, de los cuales E1 (puerta cerrada) sería el estado inicial y 9 transiciones que estarían asociadas a indicaciones de los sensores lógicos.

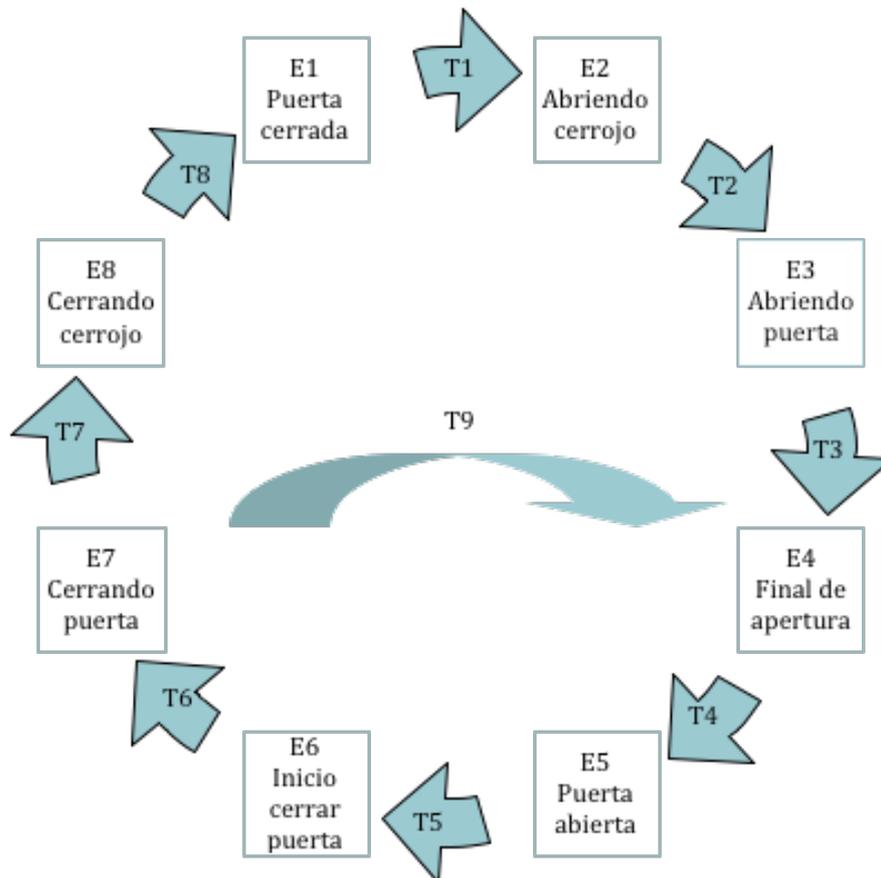


Fig. 4. 1 Diagrama de estados en un ciclo de la puerta en funcionamiento normal.

Este sistema parte del estado de reposo E_1 o puerta cerrada. Se inicia la maniobra con la orden de apertura hasta llegar al estado de puerta abierta E_5 y finalizando nuevamente en puerta cerrada E_1 .

No debe olvidarse que el funcionamiento de la puerta es continuo y su movimiento viene representado por un sensor lineal de posición, por lo tanto se debe encontrar el mejor modo de delimitar los diferentes estados. Este sistema combina ambas dinámicas de forma natural.

Definición de las Transiciones

Para identificar las transiciones que participan en la rueda de funcionamiento normal, mostrada en la figura 4.1, es necesario un estudio del comportamiento del sistema y sus características. Para ellos se han recogido datos de todos los sensores disponibles por tal de realizar un estudio de comportamiento.

La figura 4. 2, se dispone del ciclo de apertura con la relación de sensores digitales que actúan en cada ciclo. En la apertura el botón de abrir da paso al comienzo del ciclo, la desactivación del sensor de final de recorrido de puerta cerrada marca el comienzo del movimiento horizontal de las hojas de la puerta, la activación del final de carrera virtual de puerta abierta coincide con el cambio de velocidad al llegar al final de recorrido, y el sensor digital de puerta abierta señala el estado de puerta abierta.

Esta figura está formada por dos gráficas, la superior muestra diversos ciclos de apertura en una misma imagen, donde aparecen el sensor de posición lineal (turquesa), el sensor de final de carrera del cerrojo (azul marino), el sensor virtual de puerta cerrada (rojo), el sensor final de carrera de puerta cerrada (verde), el sensor de final de carrera de puerta abierta (verde discontinuo), y el sensor virtual de puerta abierta (rojo discontinuo). La segunda imagen muestra un único ciclo de apertura con la señal de intensidad en color turquesa y los indicadores binarios mencionados previamente.

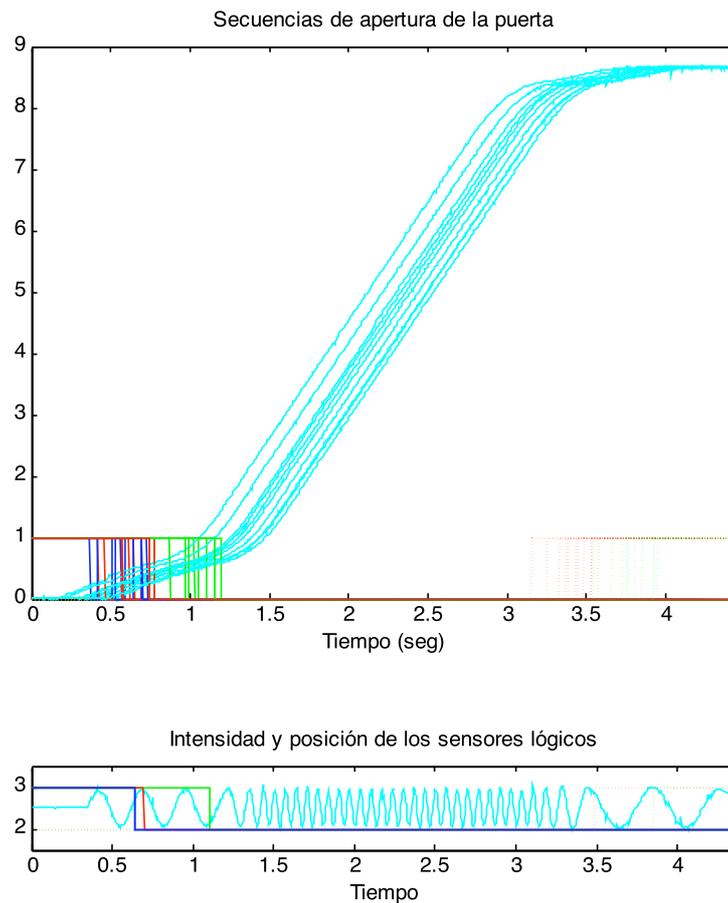


Fig. 4. 2 Activación de los indicadores binarios en el ciclo de apertura

La figura 4. 2 muestra la activación de las señales digitales según la posición en que se encuentra la puerta. Se dispone de un sensor final de recorrido de cerrojo, que se desactiva antes que las hojas de la puerta comiencen el movimiento horizontal, cuando este movimiento da comienzo, se desactiva el final de recorrido de puerta cerrada, indicando que la puerta se está abriendo. En la zona de apertura también se dispone de dos sensores finales de carrera, uno virtual que se activa antes de que la puerta llegue al final de la apertura, coincidiendo con el cambio de velocidad del final de recorrido, y uno de contacto que se activa cuando la puerta se encuentra abierta totalmente. Para el ciclo de cierre sucede exactamente lo mismo. Por lo tanto la secuencia de activación de los indicadores binarios en el tramo de apertura es la siguiente:

- 1- Final de carrera cerrojo (f_{ccerr})
- 2- Final carrera virtual de puerta cerrada ($virtucerr$)
- 3- Final de carrera de puerta cerrada ($f_{cpuertacerr}$)

- 4- Final de carrera virtual de puerta abierta (*virtuabrir*)
- 5- Y por último el final de carrera de puerta abierta (*fcabierta*).

Asimismo se observa que el cambio en *fccerr* coincide con un cambio en la pendiente de sensor de posición lineal a la vez que con un cambio en la frecuencia de la señal de intensidad. Y, el cambio en *virtuabrir* coincide con el segundo cambio en la pendiente de sensor de posición y con la variación de frecuencia en la corriente del motor.

Para el cierre el comportamiento es simétrico. La activación del botón de cierre marca el comienzo de ciclo, y la desactivación del sensor de final de recorrido de puerta abierta señala el comienzo de movimiento de las hojas de la puerta, al llegar al final del recorrido se activa el sensor digital de puerta cerrada, dando paso a la velocidad lenta que permite el enclavamiento del cerrojo, el sensor del gatillo se activa mostrando que la puerta se encuentra cerrada totalmente.

Evaluando estos resultados se pueden definir las transiciones encargadas de mover al sistema de un estado a otro, como:

- T1: Botonera abrir
- T2: sensor de puerta cerrada desactivado
- T3: sensor virtual puerta abierta activo
- T4: sensor puerta abierta activo
- T5: Botonera cerrar
- T6: sensor puerta abierta desactivo
- T7: sensor virtual puerta abierta desactivo
- T8: sensor cerrojo activo
- T9: presencia de obstáculo en la puerta

Modelos Híbrido

A continuación se muestra un gráfico representativo de la señal de posición y la activación de los sensores digitales en cada tramo de funcionamiento de la puerta, y su división en ESTADOS (E) a partir de las TRANSICIONES (T) seleccionadas.

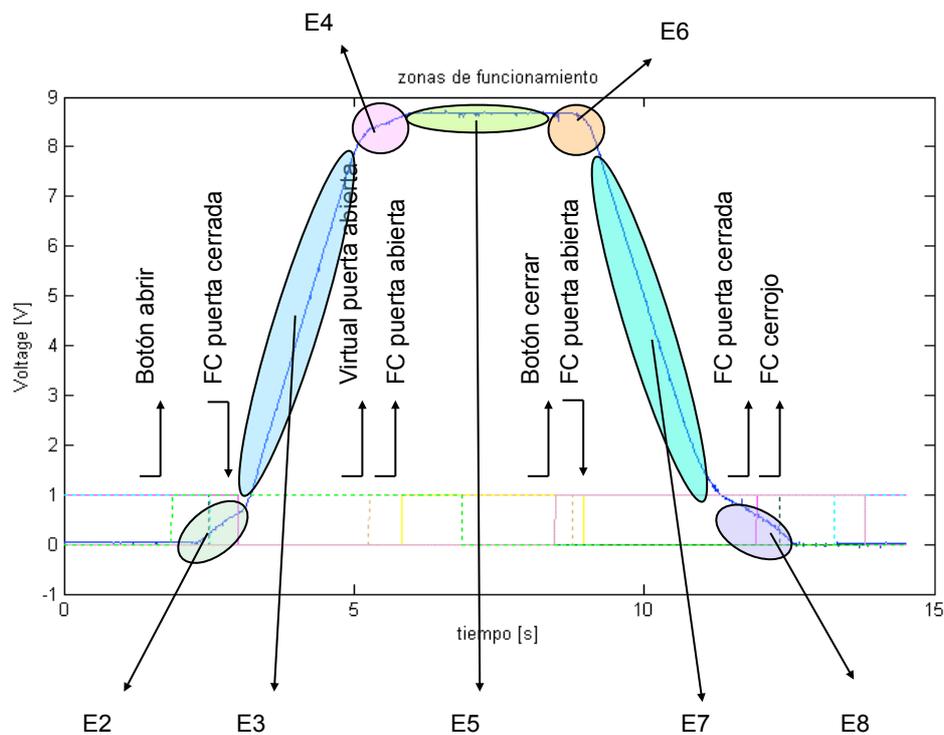


Fig. 4. 3. Descomposición del ciclo de apertura y cierre de la puerta en estados y transiciones

En la figura 4. 3 se observa como los estados se dividen con las zonas de trabajo anteriormente mencionadas, es decir cada estado dispone de una velocidad diferente donde el motor trabaja de forma distinta.

La descripción de los estados y las transiciones que definen el modelo híbrido del sistema puerta automática se muestran en la siguiente tabla:

Estados		Transiciones	
E ₁	Puerta cerrada (estado inicial)	T ₁	Pulsador de abrir activo, <i>botonabrir</i> = ↑
E ₂	Abriendo cerrojo	T ₂	FC puerta cerrada, <i>fccerr</i> = ↓
E ₃	Abriendo puerta	T ₃	FC virtual puerta abierta, <i>fcvirtuabrir</i> = ↑
E ₄	Final apertura (menor velocidad)	T ₄	FC puerta abierta, <i>fcabrir</i> = ↑
E ₅	Puerta abierta	T ₅	Pulsador de puerta cerrada activo, <i>botoncerr</i> = ↑
E ₆	Cerrar puerta	T ₆	FC puerta abierta, <i>fcabrir</i> = ↓
E ₇	Cerrando puerta	T ₇	FC puerta cerrada, <i>fccerr</i> = ↑
E ₈	Cerrando gatillo o patín	T ₈	FC gatillo, <i>fccerrseg</i> = ↑
		T ₉	FC fotocélula ↓

Tabla 4. 1. Descripción de los estados y transiciones en funcionamiento normal

Relaciones Redundantes

Al conocer los tiempos aproximados de activación de los indicadores binarios es posible crear una variable temporal de redundancia para detectar si alguno de los sensores digitales presenta alguna anomalía en cuanto al modo de funcionamiento normal.

Los tiempos por ciclo se vislumbran en la figura 4. 3, donde:

- $t_{\text{cerrojo_off}}$: tiempo relativo en el cual se desactiva el sensor relacionado con el cerrojo de la puerta *fccerr*.
- $t_{\text{virtcerr_off}}$: tiempo relativo en el cual se desactiva el sensor virtual relacionado con puerta cerrada *virtucerr*.
- $t_{\text{cerr_off}}$: tiempo relativo en que se desactiva el sensor relacionado con puerta cerrada *fcpuertacerr*.
- $t_{\text{virtabrir_on}}$: tiempo relativo en que se activa el sensor virtual relacionado con puerta abierta *virtuabrir*.
- $t_{\text{abrir_on}}$: tiempo relativo en que se activa el sensor relacionado con puerta abierta *fcabierta*.

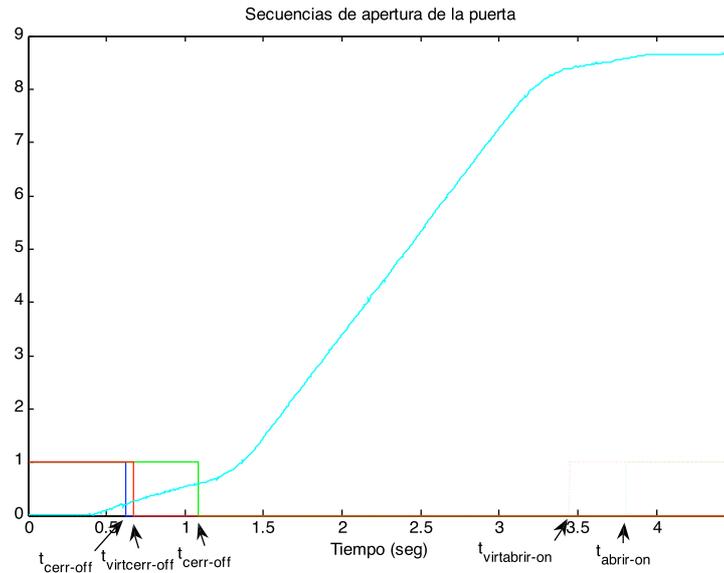


Fig. 4. 4 Tiempos asociados a un ciclo de apertura de la puerta

La Tabla 4.2 relaciona los estados y transiciones, con el valor de los sensores lógicos y el analógico de posición creando así medidas redundantes de las transiciones.

Estados	<i>boto nab rir</i>	<i>fcer rseg</i>	<i>fcvir tuce rr</i>	<i>fcce rr</i>	<i>fcvirt uabri r</i>	<i>fca brir</i>	<i>boto ntan r</i>	<i>Senspos (cm)</i>	<i>Tiempos relativos (seg)</i>
E1	off	on	on	on	off	off	off	$x < 0,73$	
E2	on	on-off	on-off	on	off	off	off	$0,73 < x < 0,96$	$\Delta t < 1,30$
E3	on	off	off	off	off	off	off	$0,96 < x < 1,33$	$\Delta t < 3,0$
E4	on	off	off	off	on	off	off	$9,00 < x < 9,10$	$\Delta t < 1,30$
E5	off	off	off	off	on	on	off	$x > 9,4$	
E6	off	off	off	off	on	on	on	$x < 9,2$	$\Delta t < 1,30$
E7	off	off	off	off	on-off	on	on	$9,2 > x > 1,33$	$\Delta t < 3,4$
E8	off	off	off	off	off	off	on	$0,73 > x > 0,96$	$\Delta t < 1,30$

Tabla 4.2: Descripción de los estados y el estado de los sensores en cada uno de ellos.

4. 2. PRONOSTICADOR NEURONAL

Al disponer del modelo híbrido es posible recoger múltiples parámetros en cada estado para realizar pronóstico. En los estados de comportamiento lineal, E₃ y E₇, se pueden determinar las características de velocidad, amplitud y frecuencia en apertura y cierre de la puerta.

Para diseñar una red neuronal son necesarios una gran cantidad de datos que reflejen el comportamiento del sistema. Por lo tanto el pronosticador ha sido diseñado en una segunda etapa después de generar el programa basado en el modelo híbrido, de este programa se recogen en cada ciclo un valor de amplitud de intensidad y su frecuencia. Para obtener un representación más exacta del sistema puerta se han llevado a cabo dos experimentos capturando los datos en los estado E₃ y E₇ anteriormente mencionados.

El primer experimento desarrollado se basa en abrir y cerrar la puerta durante unos 60 o 70 ciclos seguidos y recoger los datos de intensidad. El segundo experimento se realiza del mismo modo pero aumentando la superficie de las guías con cinta adhesiva para forzar un mayor rozamiento, este factor permite simular una degradación en la mecánica de la puerta que simula un envejecimiento.

Los experimentos desarrollados se muestran en la figura 4.5, en la parte superior se muestran los datos recogidos en el primer experimento, es decir en estado normal, en la segunda imagen se muestra los datos recogidos en el segundo experimento, bajo condiciones de rozamiento en la guía, y, en la tercera imagen se observan ambos escenarios conjuntamente. En la figura 4.5 se observa cómo tras el paso de los ciclos, y al forzar el mecanismo simulando un envejecimiento, la puerta automática refleja una curva exponencial negativa como patrón de comportamiento al envejecer y perder propiedades. Este patrón nos permite caracterizar cómo se comporta el sistema al degradarse permitiendo detectar en que zona de trabajo puede suceder una anomalía o avería del motor que provoque el paro no deseado del sistema.

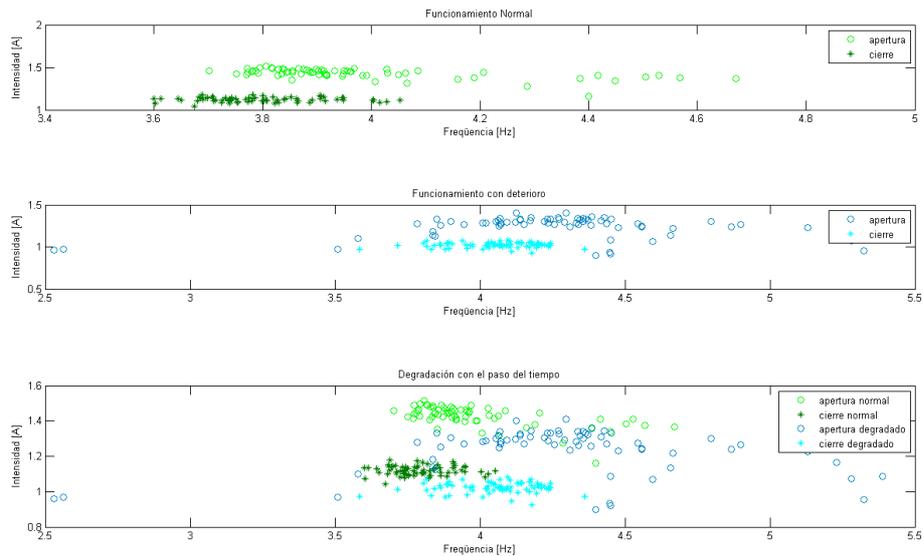


Fig. 4. 5 datos experimentales calculados en E3 y E7 a través del software en LabView

En Kalgren (2006) aparece el método *Grey-scale Health Index* para realizar funciones de predicción de vida útil restante de sistemas o componentes (RUL) a través de un patrón de degradación en el funcionamiento.

Una *Grey-scale Health Index* es una variable continua de rango de 1 a 0. Este índice indica el estado de vida del sistema desde el punto de total operatividad sin avería 1, hasta el estado de avería 0. Este índice se actualiza por los algoritmos de pronóstico, y facilita el estado de operación y las acciones de mantenimiento precisadas según el estado del sistema (Kalgren 2006).

Este índice va asociado con una tabla de degradación de estado asociada y una tabla de programación del mantenimiento, al aplicar este método al sistema puerta automática, el patrón de degradación queda representado en la figura 4.6, donde se han utilizado los datos de apertura en funcionamiento normal (verde), y en degradación (Rojo), y se ha dibujado el patrón aproximado que siguen los datos. A la derecha aparece el termómetro representativo de la *Grey-scale* y los parámetros de funcionamiento asociados a cada medida.

De esta forma se puede dividir el patrón de comportamiento del sistema en cuatro zonas de funcionamiento que marcan el tiempo de vida restante del mismo. Estas zonas se han bautizado como OK, MEDIA, DEGRADACIÓN y MUY DEGRADADO de arriba abajo en la figura 4.6.

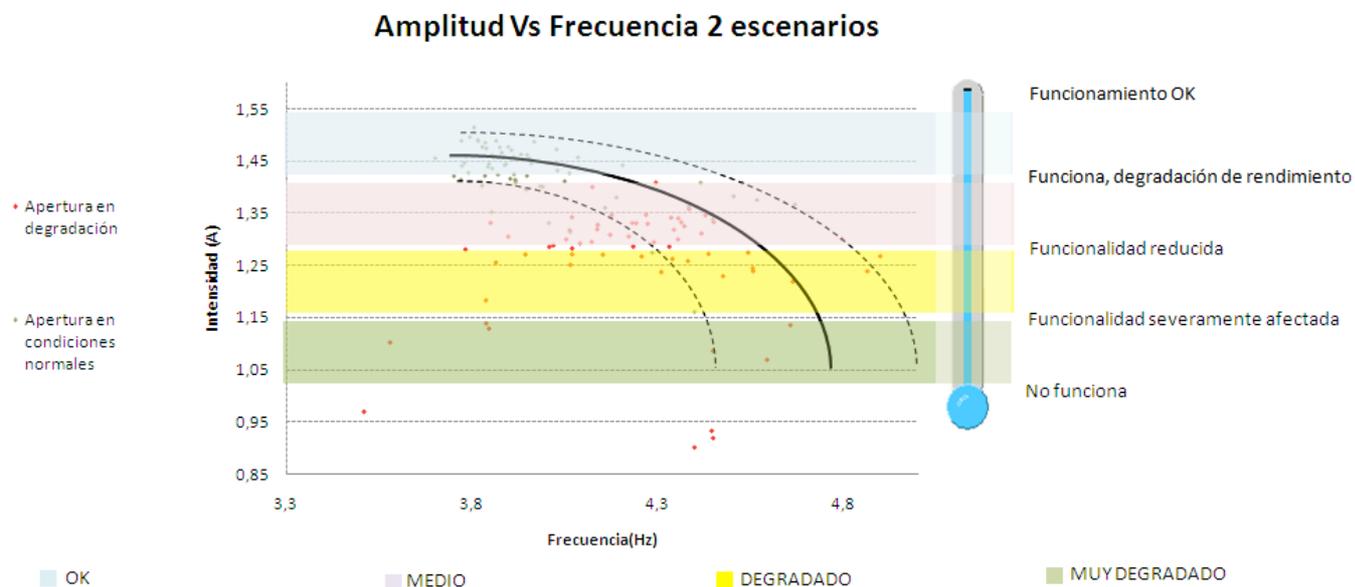


Fig. 4. 6 Representación del grey-scale index del sistema puerta automática.

Por lo tanto como salidas de la red neuronal se dispondrán de estos 4 estados, y la red marcará el estado futuro, a un paso de predicción, es decir mostrará en qué estado se encontrara la puerta en el siguiente ciclo, para pronosticar el tiempo de vida restante del sistema (RUL).

La solución al problema de predicción empleando redes neuronales artificiales, para cumplir con el objetivo anterior, es a través de un conjunto de dos redes neuronales. La primera alimentada con el valor de amplitud y frecuencia de la señal de intensidad calculada en E_3 , esta red generará 4 salidas una para cada estado del sistema. A la segunda red neuronal se le introducirán los valores del estado del sistema en los ciclos anteriores al que se quiere predecir. Con toda esta información la red debe pronosticar el estado del sistema partiendo del comportamiento histórico de dichas variables.

Si $E(c)$ corresponde a una de las salidas de la red 1 en un ciclo c y k el número de períodos (ciclos) anteriores a usar en la predicción, se puede decir que el conjunto de datos $E(c-k), E(c-k+1), \dots, E(c-1)$ son los datos de k estados anteriores. Por lo tanto, el objetivo que debe cumplir la red neuronal 2 es que su salida $\hat{E}(c)$, dada por la ecuación

$$E(c) = [E(c-k), E(c-k+1), \dots, E(c-1), c]$$

Sea lo más cercana posible a $E(c)$. Por lo tanto, se puede decir que $\hat{E}(c)$ es la estimación del estado de funcionamiento de la puerta para el ciclo $c+1$. Representando F a la función que genera la red neuronal. Basándose en este supuesto, el conjunto pronosticador formado por las dos redes neuronales funcionará según el diagrama de la figura 4. 7.

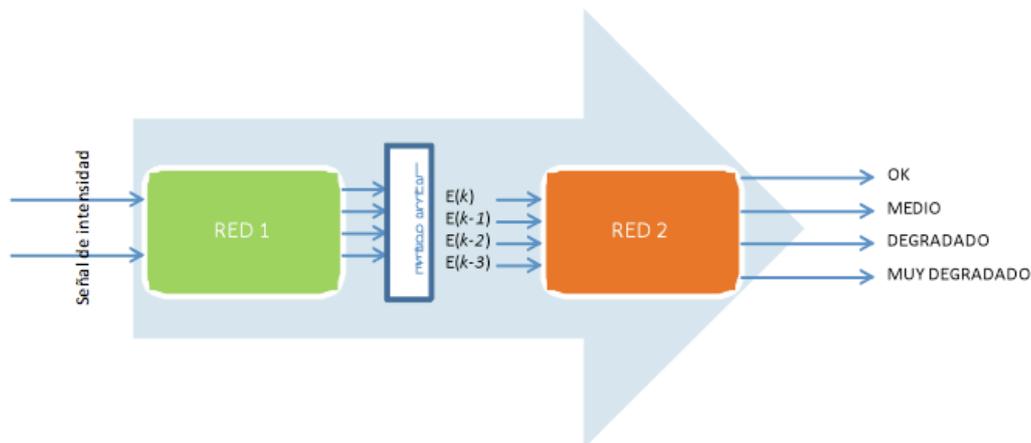


Fig. 4. 7 Diseño del pronosticador basado en redes neuronales

En este proyecto se llamará pronosticador al conjunto de ambas redes neuronales, siendo la primera una red para el reconocimiento de patrones y la segunda la encargada de pronosticar.

Al pronosticador se le introducen los valores de amplitud y frecuencia, y este devuelve el estado en que se encontrará el sistema puerta en el siguiente ciclo. El pronosticador inteligente consta de dos redes, la primera cataloga a que estado pertenece el conjunto de datos introducido, y la segunda realiza la predicción teniendo en cuenta el estado actual y los tres estados anteriores. Por lo tanto la primera red tiene 2 entradas y 4 salidas, mientras la segunda red tiene 16 entradas, 4 entradas de cada estado por cada ciclo anterior (12) más 4 del

ciclo actual. Y esta devuelve el estado futuro en que se encontrará la puerta en el siguiente ciclo, 4 salidas. Se ha decidido utilizar 3 estados pasados para predecir el estado futuro, quizás sea necesario ampliar la segunda red con más datos pasados para predecir.

Para crear la red neuronal se debe seguir la topología explicada en el punto 2.6. 2, de modo que, si la estructura topológica de una red neuronal es $n-h-s$ significa que hay n nodos de entrada, h neuronas ocultas y s neuronas de salida. Los nodos de entrada reciben los valores a procesar x_j , con $j = 1, \dots, n$, las neuronas ocultas reciben las entradas x_j ponderadas por los pesos w_{ij} y bias b_i para generar las salidas y_i (salidas de cada neurona de la segunda capa) que se calculan como

$$y_i = \phi_i \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j + b_i \right) \quad \text{con } i = 1, \dots, h$$

Donde $\phi_i(\cdot)$ es la función de transferencia de la neurona i . Finalmente los nodos de salida hacen la suma ponderada de las salidas de las neuronas ocultas y posteriormente se aplica la función de activación para obtener las salidas de la red neuronal, es decir

$$y_s = \phi_s \left(\sum_{j=1}^n w_{sj} y_j + b_s \right) \quad \text{con } s = 1, \dots, g$$

Para este trabajo, se dispone de 4 neuronas de salida, es decir g va de 1 a 4 para ambas redes.

Como se ha mencionado en anteriores capítulos, el entrenamiento de la red neuronal es un factor muy importante del diseño. La red utilizada para esta aplicación es una backpropagation pertenece al conjunto de redes que tienen un aprendizaje supervisado, por lo tanto, se requiere de un conjunto de entrenamiento completo en términos de entrada – salida, es decir, para cada entrada se conoce la salida que debería producir la red. Por lo tanto se utilizarán los datos de los experimentos anteriores para realizar el entrenamiento.

Tras crear la red neuronal se debe entrenar y posteriormente validar sus resultados con datos reales, de modo que los datos experimentales adquiridos para detectar el patrón de comportamiento del sistema se dividirán en dos grupos (90 y 75 datos cada uno), uno para el

entrenamiento y otro para la validación, con estos datos se generará la primera red neuronal, y tras obtener los resultados del entrenamiento de la red, sus 4 salidas con los resultados del estado de funcionamiento en cada ciclo, estos serán introducidos a la segunda red para obtener la predicción a un paso. De este modo se conocerán los resultado que debe obtener la red y se comprobará si el funcionamiento es correcto.

Capítulo 5

Programación de técnicas de PHM

La herramienta informática utilizada para el software de monitorización y diagnóstico es LabView.

LabView es el acrónimo de **L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbech. Es un lenguaje de programación y a la vez un entorno de programación grafica. El lenguaje utilizado por LabView se llama lenguaje G, donde la G es de Gráfico (Lajara Vizcaíno J. R. 2007).

Los programas desarrollados con LabView se llaman Instrumentos Virtuales, o Vis. Todo programa consta de dos ventanas principales: un instrumento real, donde aparecerán los botones pantallas...; y una circuitería interna. Estas partes reciben el nombre de Panel Frontal y Diagrama de Bloques respectivamente.

- Panel Frontal, es la parte que verá el usuario, suele tener fondo gris.
- Diagrama de bloques, es donde se realizará la programación y suele tener fondo blanco.

En este apartado se describirán las funciones diseñadas para el software de monitorización, es decir el diagrama de bloques donde se ha realizado la programación.

LabView permite la programación multi-hilo pudiendo ejecutar varias partes de programa en paralelo y permitiendo así utilizar un hilo para cada función. Los hilos se programan con bucles 'while' o 'while temporizado' y en su interior se desarrollan las diferentes funcionalidades del programa pudiendo ejecutarse en paralelo y en tiempo real.

5. 1. PROGRAMACIÓN DEL SOFTWARE DE MONITORIZACIÓN

En la figura 5.1, se muestra un diagrama representativo del programa de monitorización y diagnóstico/pronóstico de fallos implementado. Para facilitar la explicación del mismo, se ha representado cada hilo o bucle de programación en un color.

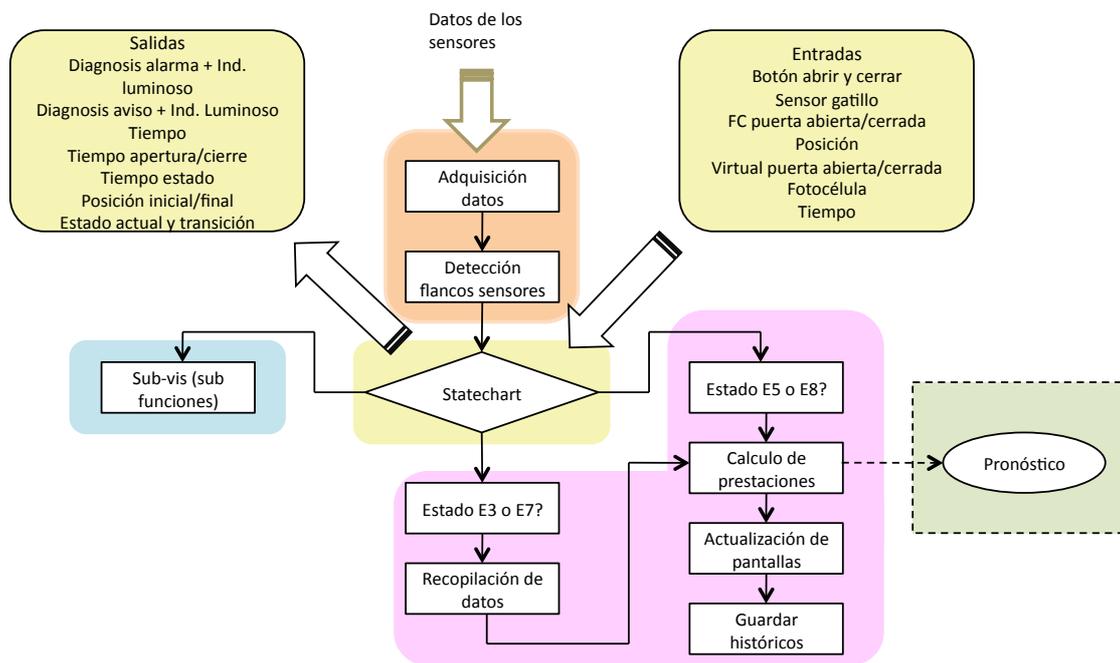


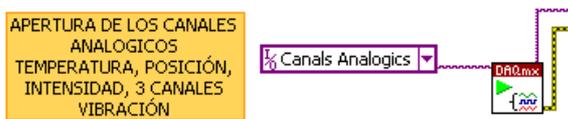
Fig. 5.1 Diagrama representativo del software de monitorización

Concretamente, el programa se ha descompuesto en 4 bucles de programación: adquisición de datos (naranja), starchart (amarillo), pronóstico (verde) y sub funciones (azul). A

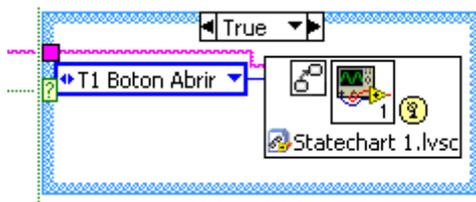
continuación se procede a explicar el objetivo de cada uno de estos bucles. El programa completo de cada uno de estos bucles se muestra en el Anexo 3.

Adquisición de Datos

El bucle de adquisición se encarga de recoger los datos, mostrar por pantalla el estado de los sensores digitales y a su vez recoger los flancos de dichos sensores y convertirlos en *triggers* que se utilizarán como las transiciones del círculo primario de funcionamiento de la puerta, diagrama de estados.



La programación de los canales se realiza en el programa Measurement & Automation (MAX), creando una tarea de adquisición que se introduce en LabView directamente.



Con la función *Statechart 1.lvsc* se genera el *trigger* de la transición T1, si el botón de apertura se activa. (En azul se muestra un bucle *if*)

Statechart

Una vez adquiridos los datos, pasan al interior del *statechart*. El *statechart*, permite implementar un sistema de eventos discretos basado en estados y transiciones. Por lo tanto esta herramienta se ha utilizado para implementar el diagnóstico de fallos descrito en el capítulo 4 de la memoria. Es decir, esta herramienta será la encargada de monitorizar el funcionamiento de la puerta, pasando de un estado a otro a través de transiciones, realizando la función diagnóstico y aislamiento de fallos o anomalías en el estado de funcionamiento. A su vez, envía al resto de bucles la información necesaria, estado actual, transición, tiempo...; para realizar los cálculos de prestaciones. El *statechart* es la parte más importante del programa.

La figura 5.4 muestra el diagrama de estados (statechart) tal como actualmente está programado en LabView. El *statechart* se divide en cuatro niveles circulares que se expanden hacia el exterior. En la rueda central, de color azul claro, se muestran los estados de funcionamiento normal. En la segunda rueda, de color verde, quedan representados los estados de anomalía pero con la posibilidad de seguir funcionando. De esta rueda surge una tercera rueda, de color lila, donde la anomalía detectada se ha convertido en avería y el sistema no puede seguir funcionando con normalidad. Y la última rueda, de color azul y más alejada del centro, es la encargada de aislar y facilitar el posible diagnóstico de avería.

Cabe destacar varios puntos importantes del diagrama:

VERIFICACIÓN: Desde el estado E1 se accede cada 30ms a un estado de verificación donde se comprueba que todas la señales de la puerta estén en el rango establecido como funcionamiento normal, así antes de comenzar un ciclo de apertura se revisa que la puerta se encuentre en un estado OK para su funcionamiento.

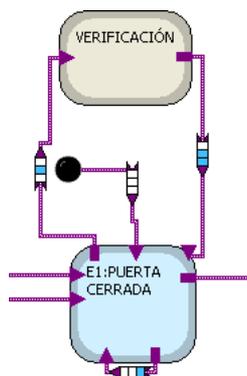


Fig. 5. 2 Verificación del sistema.

RECOGIDA DE DATOS: Dentro de los estados E3 y E7 se han configurado unos sub-estados para realizar la recogida de datos en el programa principal, de manera que siempre se recogen los datos dentro del mismo rango delimitándolo en 10 cm.

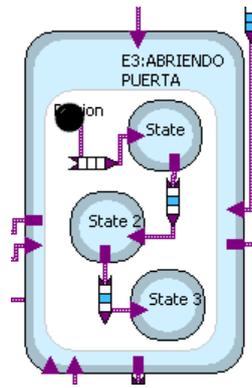


Fig. 5. 3 Recogida de datos en E3

El funcionamiento del *statechart* se describe con mayor detalle en las tablas 5. 1 hasta 5. 6, donde se describen las transiciones y estados partiendo desde el círculo primario hasta el aislamiento de posible causa de anomalía.

Estado E2

SI $fccerr = 1$	-->Funcionamiento en puesta en marcha correcto	T2
SI $fccerr = 1 \wedge \Delta t > 2$ gatillo	--> Estado F1: Problemas en el tramo de apertura del gatillo	T10
SI $pos \geq 1.5$	-->Estado E3: AVISO Problemas en el señor fccerr	T20
SI $pos < 1,5 \wedge fcvirtucerr = 1$	-->Estado F1_1: El encoder no gira	T15
SI $pos < 1,5 \wedge fcvirtucerr = 0$	-->Estado F1_1_1: El encoder gira	T16
SI $\Delta t > 4 \wedge fcvirtabrir = 0$	--> Estado F1_1_2: AVERIA: Un obstáculo impide la apertura	T21
SI $\Delta t > 4 \wedge fcvirtabrir = 1$	-->Estado F1_1_3: AVERIA: La polea de transmisión no engrana	T22

Tabla 5. 1 Funcionamiento del *statechart* desde E2

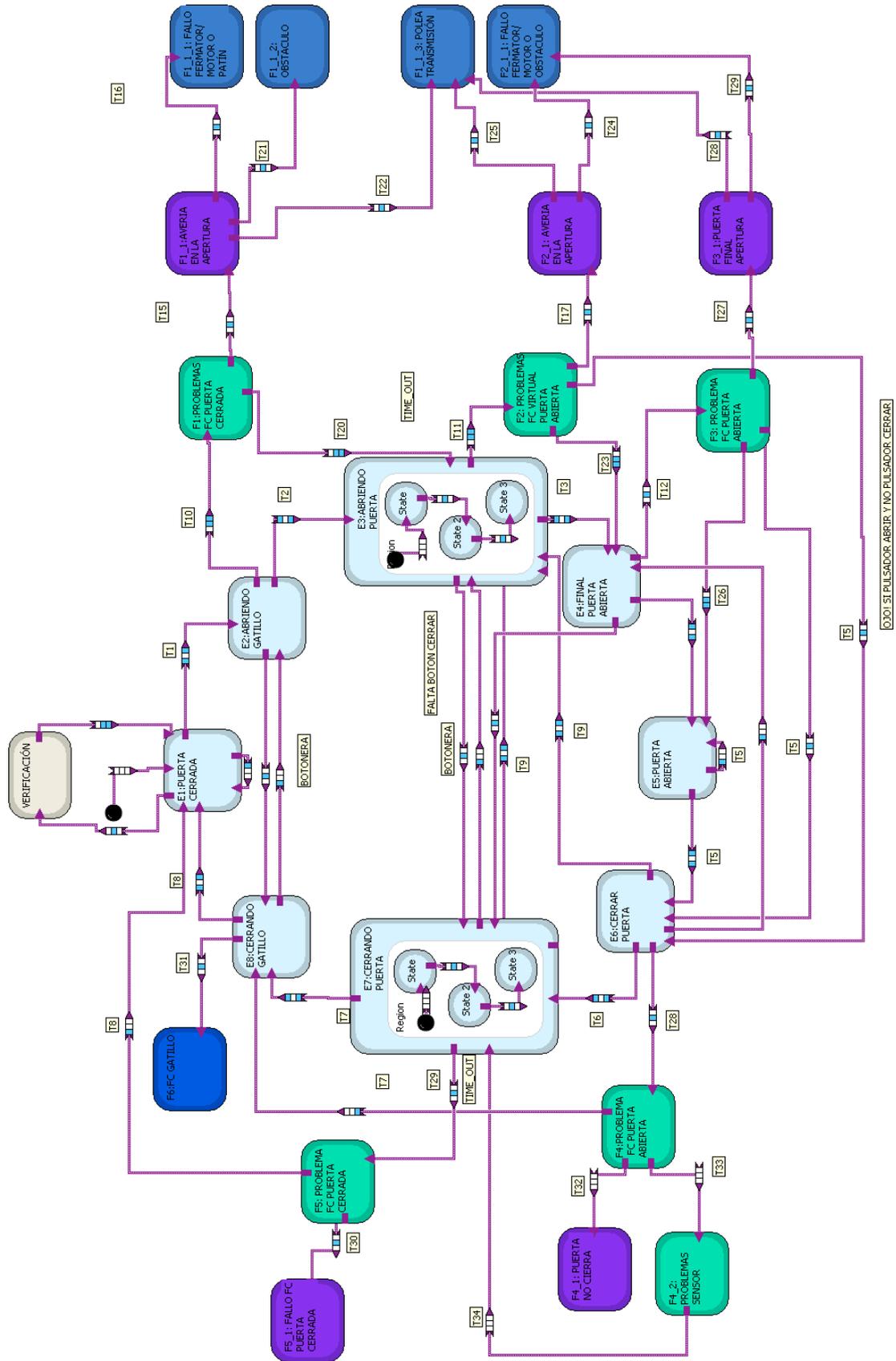


Fig. 5. 4 Diagrama de estados

Estado E3

SI $fcvirtuabrir = \uparrow$		--> <i>Funcionamiento en puesta en marcha correcto</i>	T3
SI $fcvirtuabrir = 1 \wedge \Delta t > 4$		--> <i>Estado F2: Problemas en la apertura</i>	T11
	SI $pos \geq 9.1$	--> <i>Estado E4: AVISO Problemas en el señor fcvirtuabrir</i>	T23
	SI $T5$ <i>fc abrir</i>	--> <i>Estado E6: AVISO Problemas en el señor fcvirtuabrir y</i>	T5
	SI $pos < 9.1 \wedge fcvirtucerr = 1$	--> <i>Estado F2_1: Puerta medio abierta</i>	T17
	SI $fcvirtuabrir = 1$ <i>engrana</i>	--> <i>Estado F1_1_3: AVERIA: La polea de transmisión no</i>	T25
	SI $fcvirtuabrir = 0$	--> <i>Estado F2_1: AVERIA: Un obstáculo o fallo motor</i>	T24

Tabla 5. 2 Funcionamiento del statechart desde E3

Estado E4

SI $fcabrir = \uparrow$		--> <i>Funcionamiento en puesta en marcha correcto</i>	T4
SI $fcvirtuabrir = 1 \wedge \Delta t > 2$		--> <i>Estado F3: Problemas en la apertura</i>	T12
	SI $pos \geq 9.1 \wedge \Delta t > 3$	--> <i>Estado E5: AVISO Problemas en el señor fcabrir</i>	T26
	SI $T5$	--> <i>Estado E6: AVISO Problemas en el señor fcabrir</i>	T5
	SI $pos < 9.4$	--> <i>Estado F3_1: Puerta medio abierta</i>	T27
	SI $fcvirtuabrir = 1$ <i>engrana</i>	--> <i>Estado F1_1_3: AVERIA: La polea de transmisión no</i>	T28
	SI $fcvirtuabrir = 0$ <i>fermator</i>	--> <i>Estado F2_1: AVERIA: Un obstáculo o fallo motor/</i>	T29

Tabla 5. 3 Funcionamiento del statechart desde E4

Estado E6

SI $fcabrir = \downarrow$		--> <i>Funcionamiento en puesta en marcha correcto</i>	T6
SI $fcvirtuabrir = 1 \wedge \Delta t > 2$		--> <i>Estado F4: Problemas en la el primer tramo de cierre</i>	T28
	SI $pos \geq 9.1$	--> <i>Estado F4_1:: AVISO Problemas en el señor fcabrir</i>	T32
	SI $pos < 9.1$	--> <i>Estado F4_2: AVISO Problemas en el señor fcabrir</i>	T33
	SI $pos < 8.5$	--> <i>Estado E7: Problemas en la el primer tramo de cierre</i>	T34

Tabla 5. 4 Funcionamiento del statechart desde E6

Estado E7

SI $fccerr = \uparrow$	--> <i>Funcionamiento en puesta en marcha correcto</i>	T7
SI $fcvirtuabrir = 1 \wedge \Delta t > 4$	--> <i>Estado F5: Problemas en el cierre</i>	T29
SI $pos \geq 9.1 \wedge \Delta t > 4$	--> <i>Estado F5_1:: AVISO Problemas en el señor fccer</i>	T30

Tabla 5. 5 Funcionamiento del statechart desde E7

Estado E8

SI $fccerrseg = \uparrow$	--> <i>Funcionamiento en puesta en marcha correcto</i>	T8
SI $fcvirtuabrir = 1 \wedge \Delta t > 4$	--> <i>Estado F6: AVISO: problemas en el fccerrseg</i>	T31

Tabla 5. 6 Funcionamiento del statechart desde E8

Resumiendo la información anterior se han generado las tablas 1 y 2 en el anexo 2, que muestran las transiciones y estados que representan el diagrama de funcionamiento del sistema puerta. Las tablas se divide en tres partes, funcionamiento normal, ante anomalía y en avería.

Pronostico

Una vez los datos han sido adquiridos y repartidos en los estados pertinentes por el *statechart*, es necesario realizar el cálculo de las prestaciones de la puerta en cada ciclo. Esto se realiza en el bucle ‘cálculos en los estados E3 y E7 para pronostico, actualización de datos en pantalla e históricos’, bucle 3, rosa.

Este bucle espera a recibir la información de estado proveniente del *statechart*, Si la puerta se encuentra en el estado E3 o E7 guarda los datos adquiridos de los sensores analógicos en un vector. Al llegar a los estado E5 y E8, el bucle recoge los vectores de datos y realiza los cálculos de velocidad, amplitud y frecuencia de la señal de intensidad y la temperatura del

motor. Estos datos procesados se muestran por pantalla y además se guardan en un documento formato TDMS como históricos.

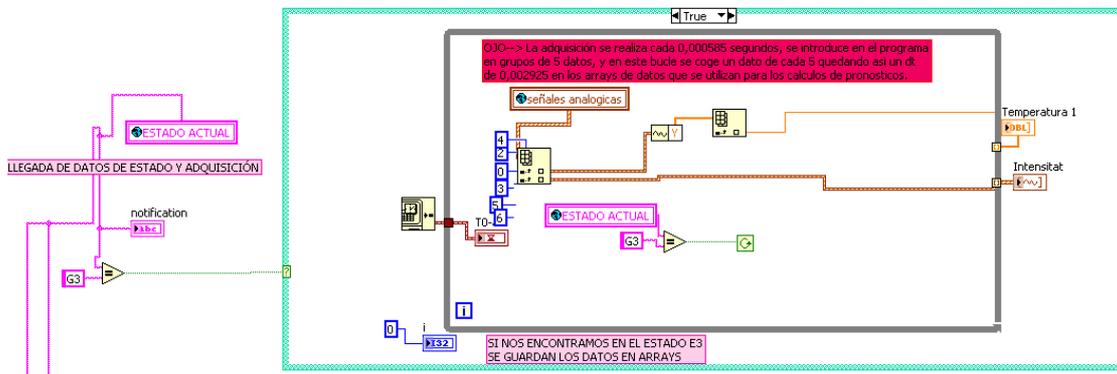
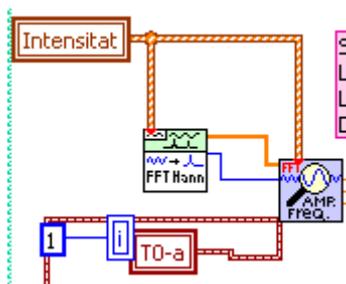


Fig. 5. 5 Parte del programa donde se recogen los datos de las señales analógicas y se guardan en vectores. (Si E3 guardar los datos en vectores)



Una vez en E5 o E8 se calcula el valor de amplitud y frecuencia de la señal de intensidad a través de una función FFT.

Primero se utiliza una ventana de Hanning para calcular la FFT y después se recogen los valores de amplitud y frecuencia.

Estos mismos datos son utilizados *off-line* para realizar los cálculos de pronóstico del sistema.

Sub-Funciones

El programa consta de un juego de sub-funciones que permite visualizar características del sistema con más detalle. Este bucle se encuentra a la espera de recibir la activación de uno de los botones que da paso a las funciones, bucle 4, azul.

Estas sub-funciones también reciben los datos que facilita el *statechart* para su correcto funcionamiento.

La figura 5. 6 muestra un diagrama explicativo de las sub-funciones del programa.

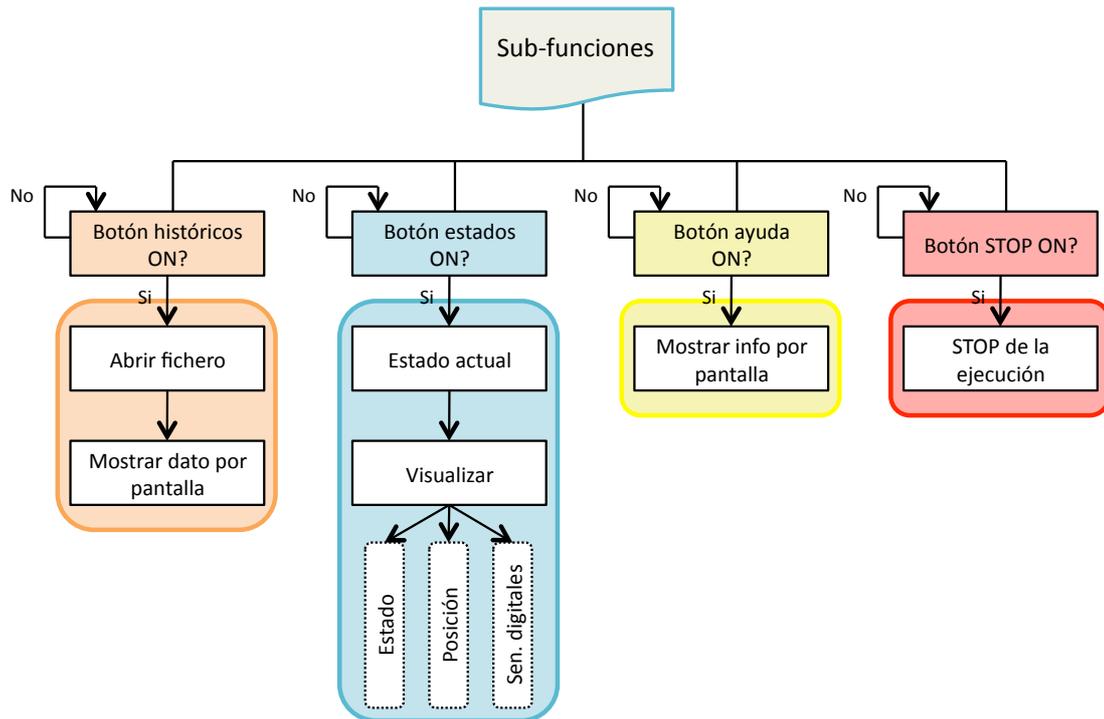


Fig. 5. 6 Diagrama representativo de la configuración de las sub-funciones del programa.

En este caso cada color indica una función diferente, en naranja encontramos la función de históricos, que permite visualizar los datos procesado y guardados en el bucle ‘cálculos en los estados E3 y E7 para pronostico, actualización de datos en pantalla e históricos’, bucle 3, rosa.

En azul se representa la función del diagrama de estados, donde se puede visualizar la rueda principal de funcionamiento así como un croquis de la puerta que se mueve en tiempo real.

Una de las funciones posibles es una ventana de ayuda, donde se explicará el modo de uso del programa.

La última función es el botón de paro, el STOP, este botón se comunica con todos los bucles de programa, si se presiona se finaliza la ejecución de todos los bucles parando el programa.

5. 2. RED NEURONAL

National Instruments dispone de un conjunto de softwares llamados MatrixX especialmente diseñados para generar modelos de alta fidelidad, y realizar simulaciones de modelos de sistemas interactivos, analizar y desarrollar algoritmos de control robusto para generar controladores. Al tratarse de software de NI es totalmente compatible con plataformas de tiempo real para el control de prototipos y hardware de pruebas, facilitando la aplicación de programas en sistemas físicos.

Por más de 20 años la familia de productos MatrixX ha sido utilizado en el diseño de aplicaciones en el campo de la automoción, aeroespacial y defensa para el control de proceso. MatrixX incluye (Instruments 2007):

- *System Build*: Programa de modelado gráfico de sistemas de simulación.
- *Xmath*: diseñado para el análisis interactivo, visualización y control.
- *DocumentIt*: capacitado para la generación automática de documentación.
- *AutoCode*: Este programa permite generar automáticamente código embebido en C o Ada de los objetos creados en MatrixX para su utilización en hardware NI, en tiempo real para su aplicación en prototipos o bancos de pruebas.

MatrixX dispone de varias *toolkit* específicas para trabajar, la utilizada en esta tesis de máster es la *SystemBuild Neural Network Module (NNM)* como su nombre indica esta *toolkit* está diseñada específicamente para trabajar con redes neuronales, es un módulo diseñado para realizar aplicaciones en las áreas de control de sistemas, patrones de reconocimiento, procesado de señales y teoría de la información (Instruments 2007).

La NNM permite parametrizar e incluir una red neuronal como un modelo *Superbloc* (diagrama de bloques), esto permite integrar una red neuronal en un diagrama de un sistema completo en simulación (*System Build*) permitiendo simular la red neuronal en un sistema completo, aparte de poder generar el código embebido en C o Ada con *AutoCode*.

El NNM soporta los modos de entrenamiento *off-line* y el aprendizaje en tiempo real. En los Anexos (Anexo 4) aparece una pequeña introducción de cómo generar una red neuronal con NNM, en MatrixX (Instruments 2007).

La siguiente figura muestra la primera red neuronal del sistema de predicción de estado diseñado, generada con la *toolkit NNM*.

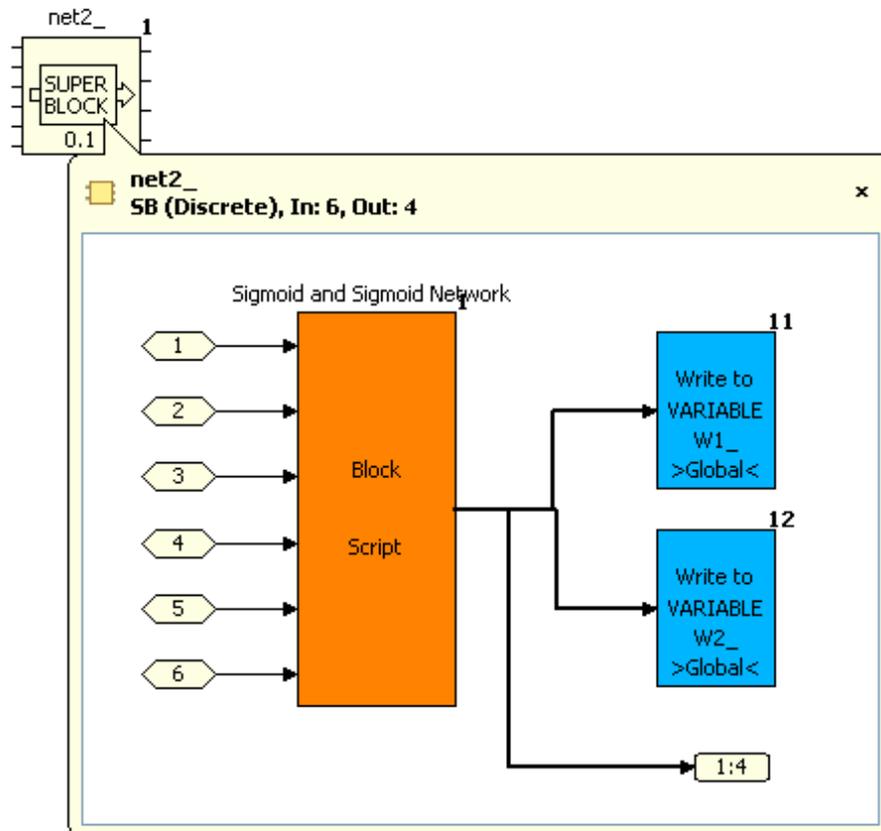


Fig. 5. 7 Primera red Neuronal del sistema de predicción

En la red se observan 6 entradas y 4 salidas. Como se ha explicado en el capítulo 4, esta red consta de 2 entradas, el valor de amplitud y frecuencia de un ciclo, y como salida dispone de 4 modos, OK, MEDIO, DEGRADACIÓN, MUY DEGRADADO.

La red en cambio muestra 6 entradas, esto es debido a que al realizar un entrenamiento supervisado se deben insertar las entradas, 2, y la información de los *targets* o salidas, 4.

Como salida de la red se tiene cada uno de los grupos antes mencionados y al mismo tiempo los vectores de pesos de las dos capas de la red.

Esta red es una *backpropagation* con entrenamiento supervisado, ha sido entrenada con un conjunto de 90 datos y utilizando 20 neuronas en la capa oculta. Se ha usado una función de transferencia sigmoideal para la activación de ambas capas, $\phi = \frac{1}{1 + e^{-z}}$. La tolerancia para el error por época para este caso fue $E_{av\ min} = 1 \times 10^{-4}$. Al exigir un valor tan pequeño a la red neuronal se fuerza un aprendizaje rígido.

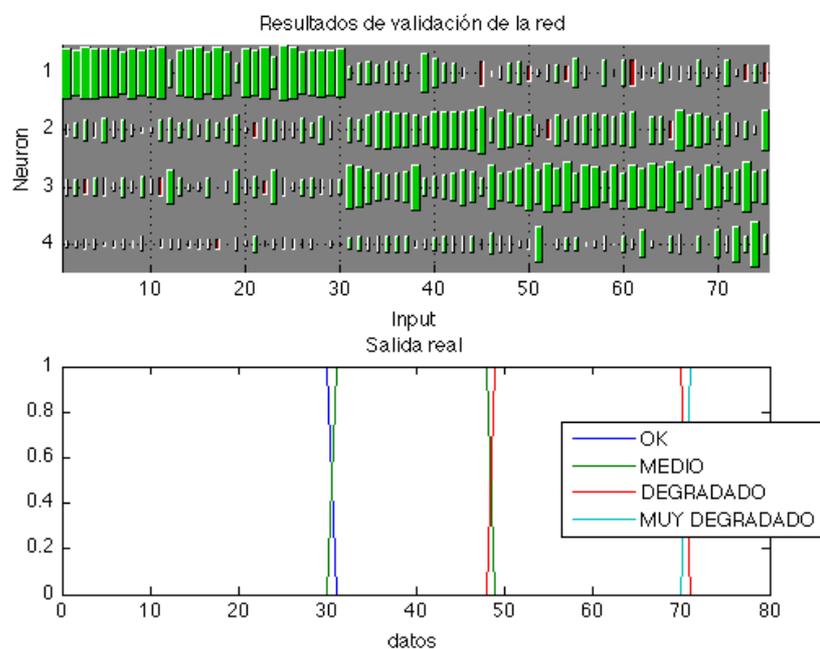


Fig. 5. 8 Validación de la red

La figura 5.8 muestra dos gráficas de validación de la red. Para validar la red se muestran los resultados en el aprendizaje, figura superior donde se muestran las 4 salidas simuladas por la red y en la parte inferior las salidas reales. La simulación de los resultados de la red se ha realizado con la función 'hintonw' de MATLAB que permite visualizar los resultados en las salidas de la red.

Para realizar el entrenamiento y la simulación de la red se puede diseñar un modelo *superblock*, en el cual es posible introducir datos reales o simulados y observar el funcionamiento de la red.

La figura 5.9, muestra el diagrama de entrenamiento, que consta de una bloque de simulación de datos (1), la red neuronal (2), un bloque sumador (3), un block script (4) que permite el guardado y la visualización de los datos de la simulación, y un bloque STOP (5), que para la simulación o bien por final de tiempo de simulación o por no disponer de más datos (en el caso de introducir un vector de datos).

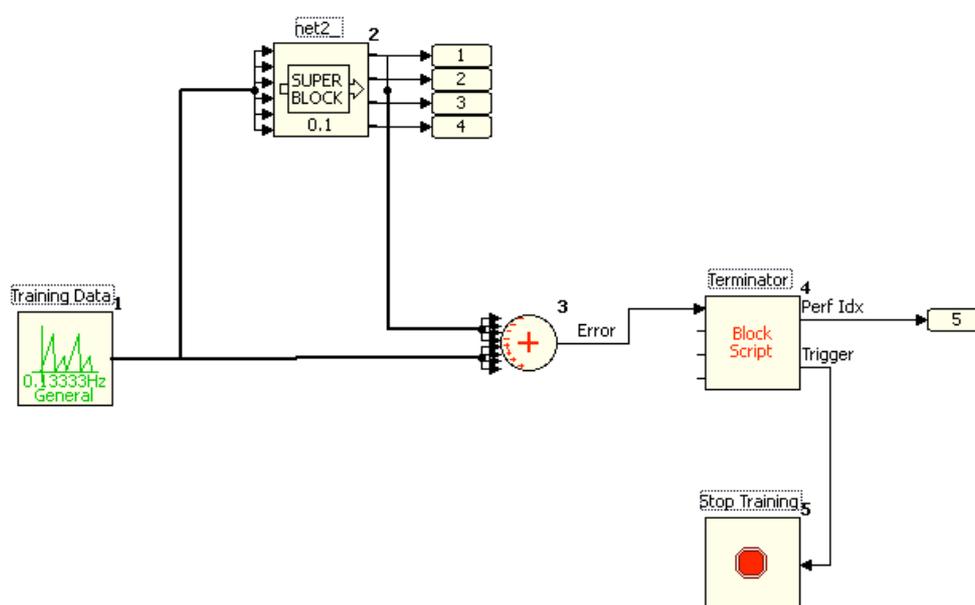


Fig. 5. 9 Modelo SuperBlock de entrenamiento.

El diseño de la segunda red del sistema se realiza del mismo modo, pero para este caso se disponen de 20 entradas, 4 entradas de datos, (*estado actual (k)*, *estado actual (k-1)*, ... *estado actual (k-3)*), que están formadas por 4 datos cada una, es decir 16 entradas + 4 salidas para realizar el entrenamiento supervisado. Y como salida se dispondría de los 4 modos de estado del sistema.

5. 3. INTERFICIE USUARIO, PANEL FRONTAL

Como se ha mencionado en el punto 5. 1, LabView además de ser un lenguaje de programación, es a la vez un entorno de programación gráfica, esto permite generar un interface visual del programa a la vez que se diseñan las funciones de trabajo. Anteriormente se ha explicado el funcionamiento del programa diseñado en la pantalla de *Diagrama de Bloques* de la VI, en este punto se describirá el instrumento real, donde aparecen los botones pantallas...; la parte que verá el usuario, el *Panel Frontal* de la VI (Lajara Vizcaíno J. R. 2007).

EL diseño de la parte grafica es muy sencilla ya que al generar variables o controles en el *Diagrama de Bloques*, estos tienen una representación gráfica directa en el *Panel Frontal*.

Pantalla Principal

A continuación se mostrará una imagen de la pantalla principal del programa, esta pantalla consta en la parte superior del logotipo de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), bajo el logotipo de izquierda a derecha encontramos un indicador de estado de mantenimiento y funciones de logística, en la parte central un conjunto de visualizadores de las prestaciones de la puerta en cada ciclo, tiempo, velocidad, intensidad, temperatura, (se actualizan una vez por ciclo). En la parte derecha superior se muestra un conjunto de indicadores de estado del programa, tiempo del bucle 1 de adquisición, estado actual del *statechart...*; en segundo lugar encontramos los indicadores de anomalía y avería con unas ventanas para mensajes provenientes del *statechart*. En la parte central de la pantalla se encuentra un croquis de la puerta del ascensor con los sensores digitales que se activan y desactivan en tiempo real, y, en la parte inferior se puede ver la botonera que da paso a las sub-funciones del programa.

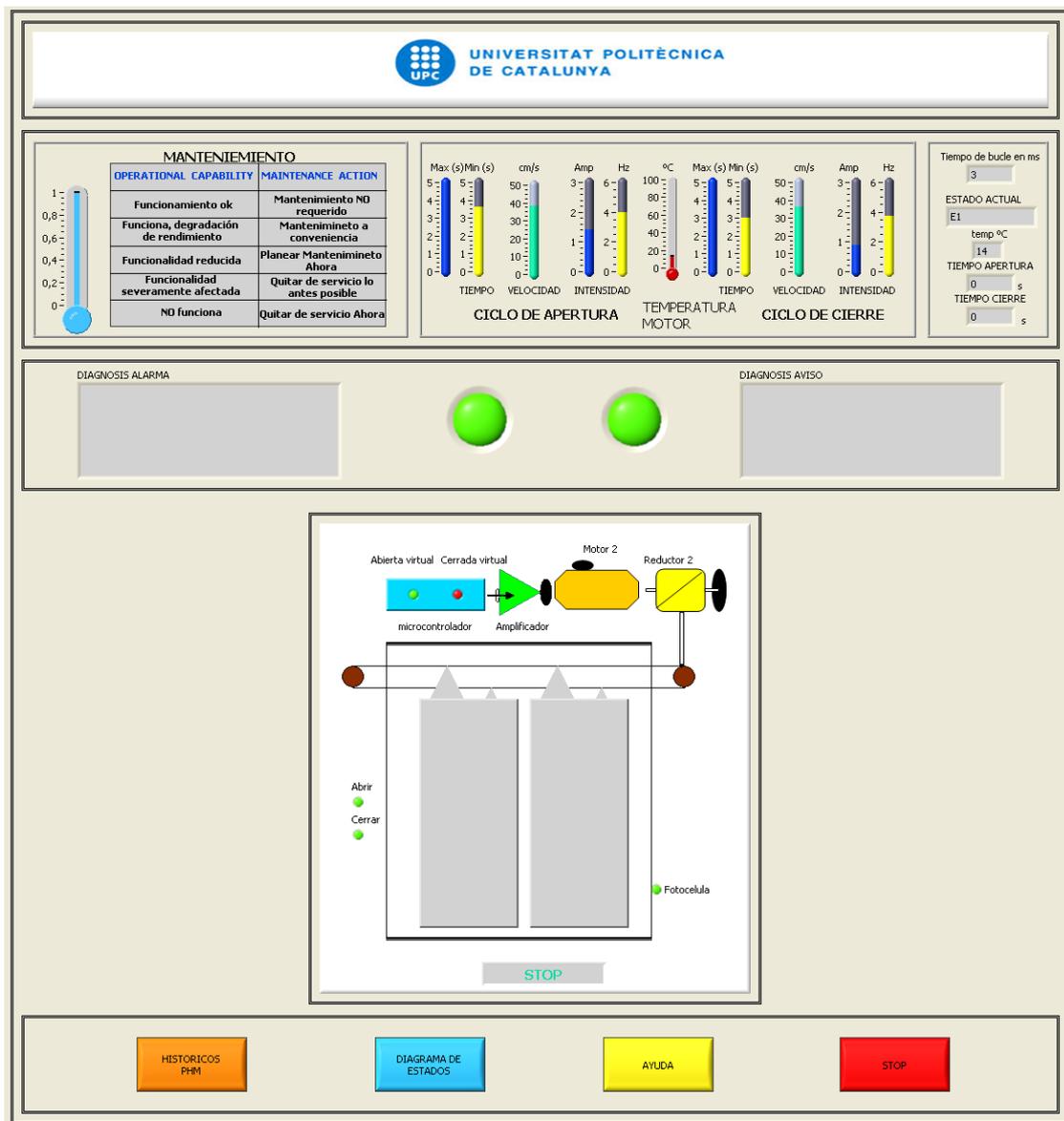


Fig. 5. 10 pantalla principal

El indicador de mantenimiento está basado en la *Grey-scale Health Index* de Kalgren (2006). El *Grey-scale* de Kalgren ya aparece en la bibliografía con la tabla asociada a la etapas de mantenimiento y estado del sistema al que pertenece cada medida del termómetro.

La figura 5.11 muestra la tabla asociada al índice de operación que se encuentra a su vez en la pantalla principal del software de monitorización.

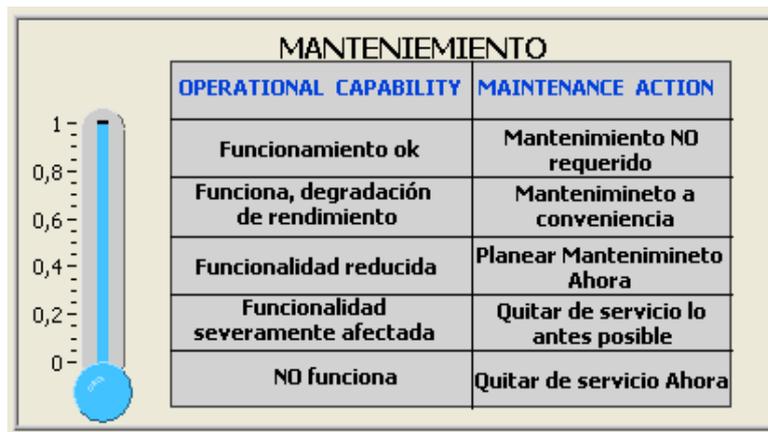


Fig 5. 11 Indicador de mantenimiento

En la pantalla principal se encuentra un conjunto de indicadores que representan las prestaciones de la puerta en cada ciclo. Estas prestaciones se separan en dos grupos, apertura y cierre. Constan con un variable que indica el tiempo máximo y mínimo de ciclo, la velocidad del último ciclo y el valor de frecuencia y amplitud de la señal de intensidad que revela el estado del motor. Además consta de un indicador de temperatura que facilita el valor en grados centígrados de la temperatura del motor en cada ciclo.

La figura 5.12 muestra una ampliación de los indicadores que se encuentran en la pantalla principal.



Fig. 5. 12. indicador de prestaciones, de izquierda a derecha, tiempo máximo de apertura (azul), tiempo mínimo de apertura (amarillo), velocidad del último ciclo de apertura (turquesa), Amplitud en la apertura (azul), frecuencia en la apertura (amarillo), indicador de temperatura (rojo), tiempo máximo de cierre (azul), tiempo mínimo de cierre (amarillo), velocidad del último ciclo de cierre (turquesa), Amplitud en el cierre (azul), frecuencia en el cierre (amarillo).

Los indicadores de estado de la puerta son dos, el de anomalía y el de avería. Constan de dos posiciones. En verde el estado de la puerta es OK, total operatividad, y, el indicador de

anomalía, en naranja representa una anomalía en el sistema. Disponiendo de una ventana para mostrar un mensaje de posible causa de anomalía. A su vez el indicador de avería, rojo, dispone de una ventana para mostrar la posible causa de avería.

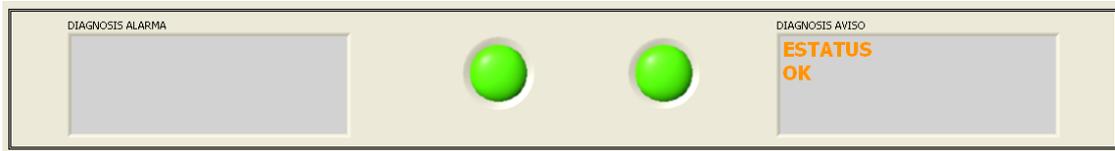


Fig 5.13 Indicadores de estado, estado OK

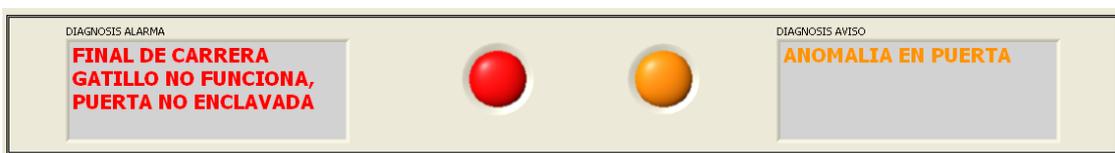


Fig 5.14 Indicadores de estado, estado en avería.

En la parte central de la pantalla aparece un croquis representativo de la puerta, donde se muestran todos los sensores digitales que se activan (rojo), o desactivan (verde), en tiempo real. Asimismo muestra el estado en que se encuentra el motor, parado en amarillo y en funcionamiento en rojo. Si la puerta se encuentra en estado de reposo se observa un ‘stop’ en la pantalla mientras en funcionamiento muestra un ‘funciona’.

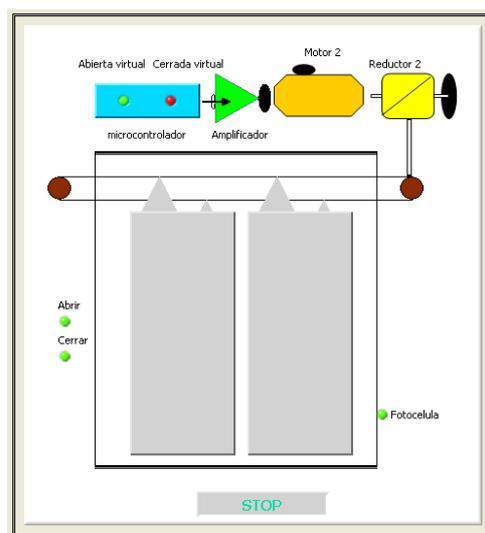


Fig. 5. 15 Croquis del sistema puerta

Para acceder a las diferentes sub-funciones de las que consta el programa se dispone de una botonera, figura 5. 16, en el siguiente punto se mostrarán las diferentes pantallas a las que dan paso estos pulsadores.

En naranja se activa la pantalla de históricos, en azul cielo se pasa a la pantalla de diagrama de estados. A través del botón amarillo aparece la ventana de ayuda, y por último el botón rojo es el STOP, que para la ejecución del sistema de monitorización.



Fig. 5.16 Botonera

Pantallas de sub-Funciones

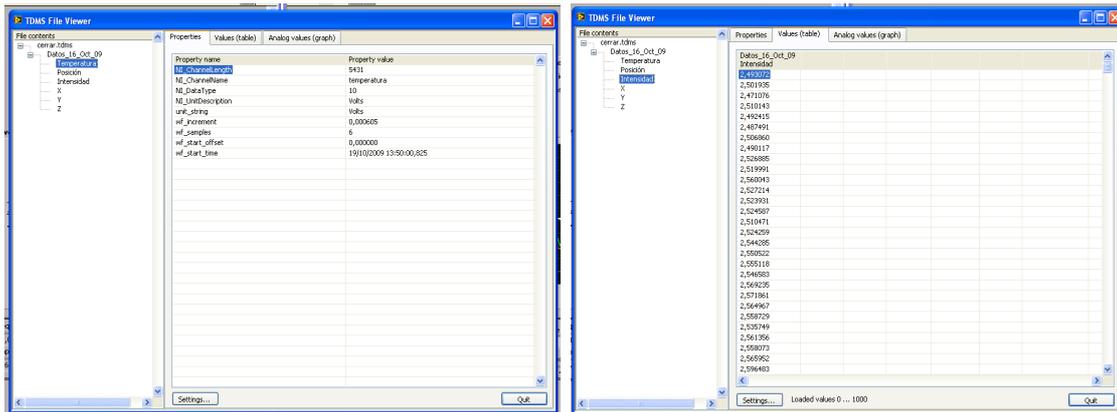
A continuación se mostrarán las diferentes pantallas representativas de las sub-funciones explicadas en el 5. 1.

Históricos

Actualmente esta pantalla simplemente muestra los valores procesados y guardados de las prestaciones de la puerta en cada ciclo, velocidad, tiempo de apertura y cierre, temperatura, valores de vibración, amplitud y frecuencia...; Se muestran en formato TDMS compatibles con DIAdem y convertibles a XLS o DAT.

Este visor muestra en la parte derecha las señales existentes en el fichero, y dispone de tres pestañas de visualización. La primera muestra un resumen del dato en cuestión, nombre, numero de muestras, valor máximo...; la segunda muestra el vector de datos y la tercera pestaña muestra los datos en formato grafica.

Para volver a la pantalla principal basta con cerrar el visor.



a)

b)

Fig. 5. 17. a) primera pantalla del visor de visualización de datos, b) segunda pantalla del visor.

Diagrama de Estados

Al pulsar el botón de diagrama de estados aparece la pantalla que muestra la figura 3. II, en ella se muestra la rueda de estados de funcionamiento donde en color azul aparece el estado actual en el cual se encuentra la puerta, este estado es facilitado por el *statechart*.

A su derecha se observa un croquis con movimiento en tiempo real de la posición de la puerta y sus sensores digitales. Por lo tanto es posible observar el estado en el que se encuentra la puerta y a la vez la posición real de la misma.

Los sensores digitales tienen dos estados, ON en color rojo, y OFF en color verde, por lo tanto en rojo indican actividad. El motor, al igual que en la pantalla principal, consta de dos estados, en funcionamiento, rojo, o en reposo, amarillo.

Esta pantalla dispone de un botón de 'volver' para retroceder a la pantalla principal.

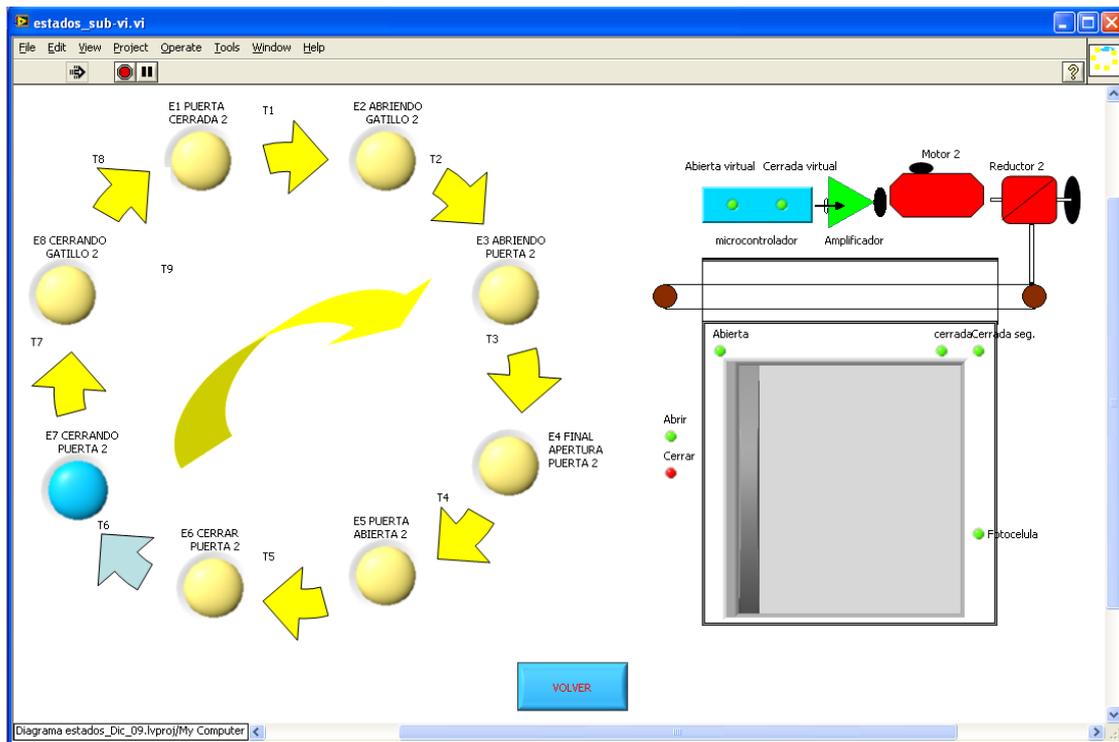


Fig 5.18 Pantalla de diagrama de estados

Ayuda

Esta ventana se encuentra actualmente sin funciones de ayuda, por lo tanto al presionarla simplemente aparece una ventana en blanco, en el futuro dispondrá de un mini tutorial de modo de empleo de sistema de monitorización avanzado.

Esta pantalla dispone de un botón ‘volver’ para regresar a la pantalla principal.

Capítulo 6

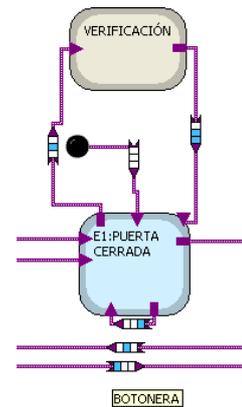
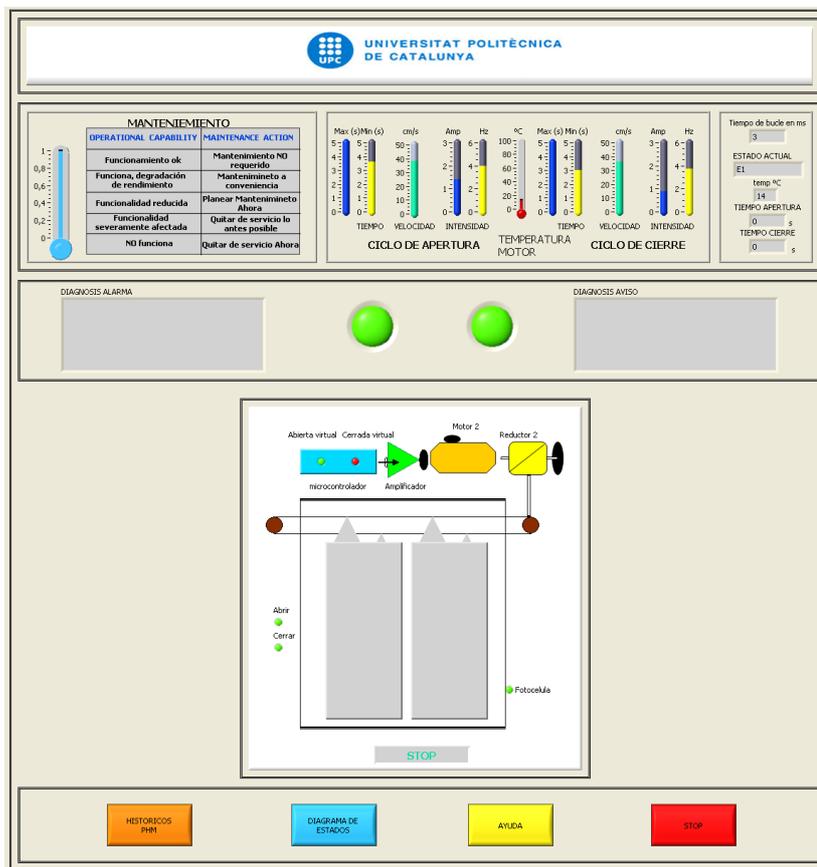
Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos al someter al software de monitorización basado en PHM a varios escenarios de fallo.

Se han provocado diferentes anomalías o averías en el sistema puerta para testear el software diseñado con LabView. En este capítulo, se muestra la información proporcionada al usuario a través de las pantallas definidas en el capítulo 5. Así mismo se presentan un conjunto de simulaciones trabajadas con MatrixX y MATLAB sobre la red neuronal diseñada para realizar pronóstico a un paso.

6. 1. ESCENARIO 1: VALIDACIÓN

El primer paso es validar el estado de la puerta antes de empezar con las pruebas. Al poner el software en funcionamiento y observar la pantalla principal, en el caso de que los sensores de puerta cerrada deben estar activados (ON), los sensores digitales de puerta abierta deben encontrarse desactivados (OFF), y el transductor de posición lineal debe entregar un valor inferior a 1V (menos de 1cm de apertura), los dos indicadores de diagnóstico se encuentran en verde (figura 6.1).



Validación del estado de la puerta (puerta cerrada). Se valida el estado de los sensores

Fig. 6.1 Pantalla principal, escenario 1

Con el software en funcionamiento se procede a la desconexión de uno de los sensores, en particular del sensor de final de carrera de puerta abierta. Al realizar esta acción la pantalla principal indica que el estado del sistema no es correcto y que se trata de un fallo en el sensor de final de carrera de puerta abierta, ver figura 6. 2. La aparición de este mensaje no impide que la puerta pueda funcionar con normalidad, pero este mensaje solo se eliminará si al llegar al estado de validación el nivel del sensor de puerta abierta entra dentro de los rangos de comportamiento esperado y catalogado como normal.

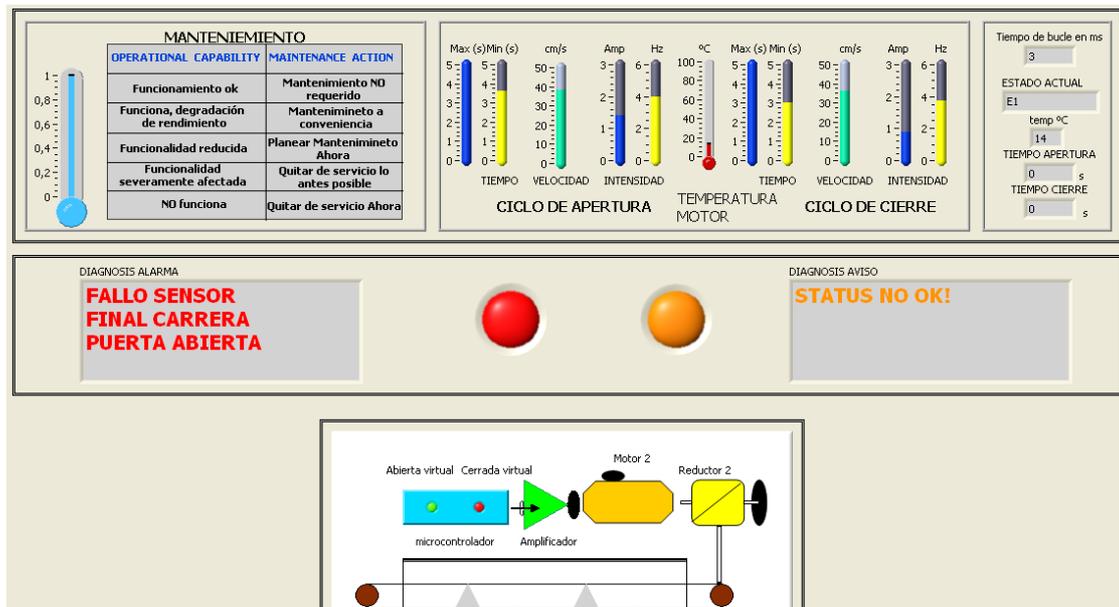


Fig. 6. 2 Pantalla principal, avería escenario 1

6. 2. ESCENARIO 2: OBJETO IMPIDE LA APERTURA DE LA PUERTA

En este escenario se deposita un objeto en el camino de la puerta mientras esta se está abriendo. Los objetos que impiden la apertura de puertas son menos usuales que en el caso del cierre, pero se ha optado por este escenario por no interferir con el objeto en el haz de luz de la fotocélula y así observar si el sistema detecta un objeto que impide el movimiento de la puerta sin que sea detectado por la fotocélula.

La figura 6.3 muestra el estado de la pantalla tras detectar un objeto en el camino de la puerta.

Los indicadores luminosos se encuentran en naranja y rojo, cosa que indica que la puerta no está en un estado de funcionamiento normal. En el mensaje aparece un posible diagnóstico: fallo en el motor o obstáculo, uno de los diagnósticos coincide con el fallo realizado en este escenario. En el estado actual del programa no es posible discernir entre fallo en el motor o obstáculo.

6. 3. ESCENARIO 3: PROBLEMAS EN EL CIERRE

Este escenario simula un fallo en el sensor del cerrojo, se desconecta dicho sensor de la alimentación cuando la puerta ya se encuentra en funcionamiento por tal de esquivar la validación que se realiza en el estado E1.

Tras desconectar el sensor la puerta debe seguir funcionando con normalidad hasta llegar al estado E8 donde se debe detectar que tras unos milisegundos el sensor del cerrojo no se ha activado, pasando a dar aviso en la pantalla principal.

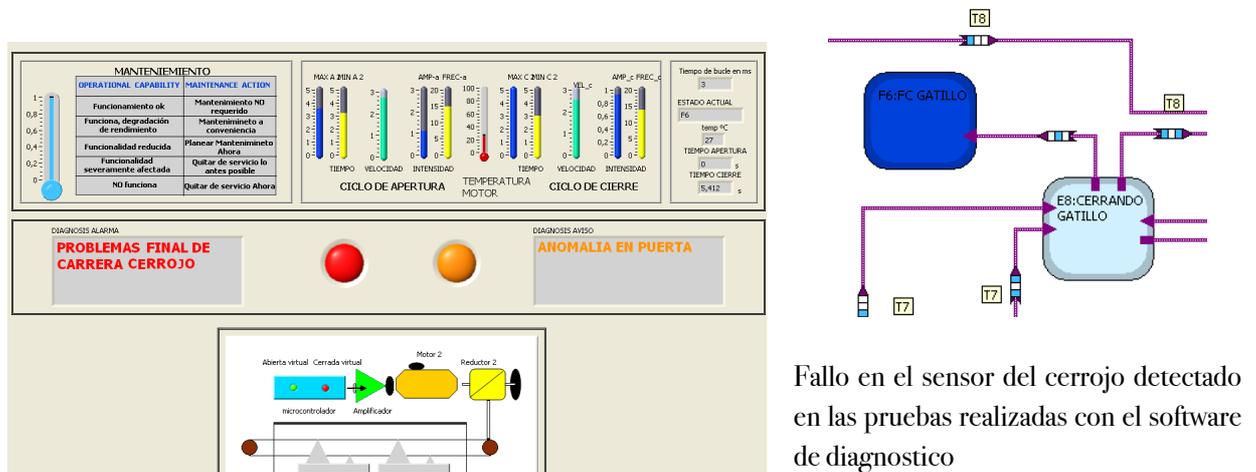


Fig. 6. 5 Pantalla principal, escenario 3

Tras el escenario 3 la pantalla principal muestra un mensaje de avería que indica ‘problemas final de carrera cerrojo’, con el indicador luminoso en rojo.

6. 4. RED NEURONAL

Como se ha mencionado en el capítulo 4, se han dividido los datos de la figura 6.6, datos adquiridos en los experimentos para obtener el patrón de degradación del sistema puerta, en dos grupos, uno de 90 datos para el entrenamiento, y, otro de 75 para la validación. De estos datos por lo tanto se conoce cuál ha de ser su salida, y por consiguiente se puede comprobar si

el pronosticador inteligente realiza bien su función. La figura 6.7 muestra los datos de validación.

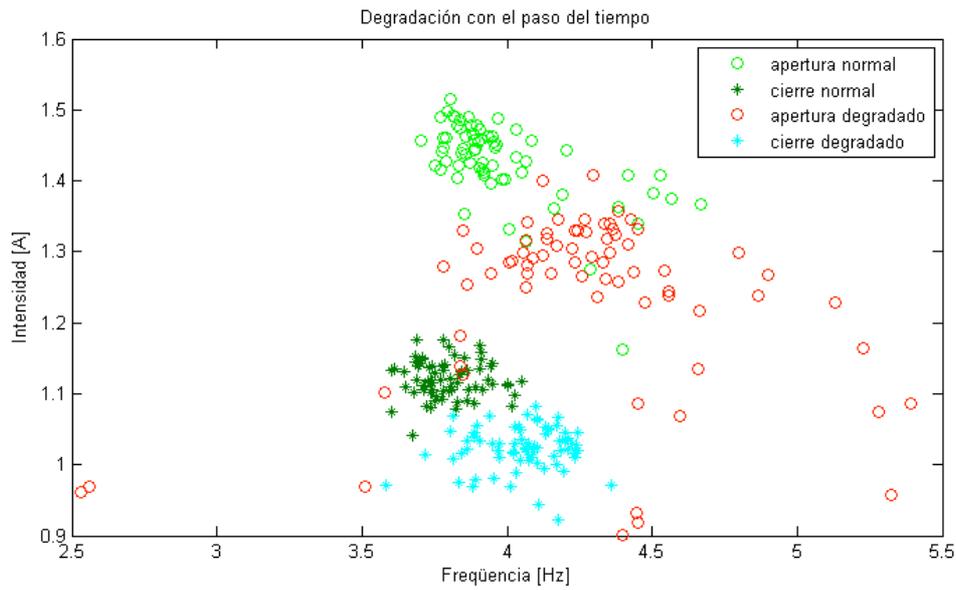


Fig. 6. 6 Datos de amplitud vs frecuencia del sistema puerta

La figura 6.6 muestra todos los datos tomados para el diseño y validación del pronosticador, mientras la figura 6. 7 muestra únicamente los datos de validación utilizados en este punto.

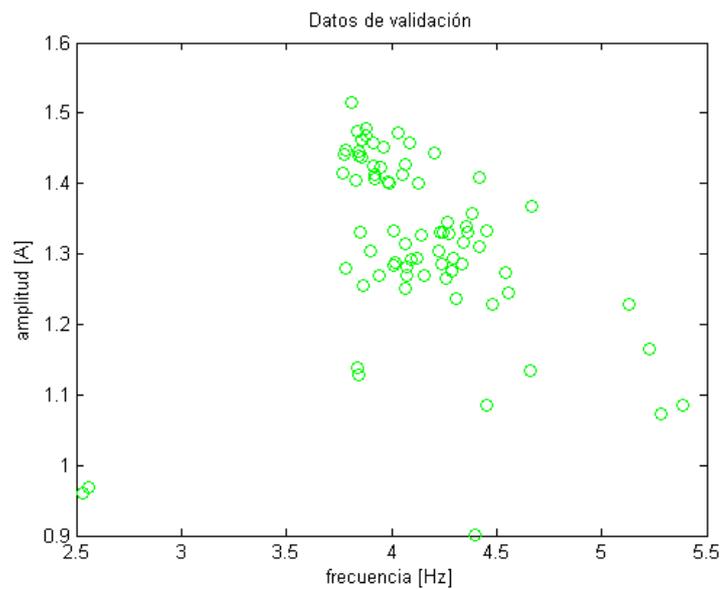


Fig. 6. 7 Datos de validación

La figura 6.8, muestra las salidas de las dos redes neuronales utilizadas para pronosticar el funcionamiento en estado de apertura. La salida o neurona numero uno representa el estado OK, la segunda el estado MEDIO, la tercera neurona el estado DEGRADADO y la ultima el MUY DEGRADADO.

De modo que se observa como en ambos casos la salida adopta una curva exponencial decreciente similar al patrón de funcionamiento descrito en el capítulo 4. Donde para los primeros datos la puerta se encuentra en el estado OK y en los últimos datos se encuentra en el estado MUY DEGRADADO. Esta figura muestra las salidas de ambas redes neuronales, la primera red es una red backpropagation de 2 entradas, 4 salidas y 3 capas, ha sido diseñada con 20 neuronas en la capa oculta con función de transferencia sigmoideal en ambas capas. La segunda red, al igual que la anterior es por backpropagation de 3 capas y con 20 neuronas en la capa oculta con función de transferencia sigmoideal en ambas capas, pero esta dispone de 16 entradas y las mismas 4 salidas que la red anterior.

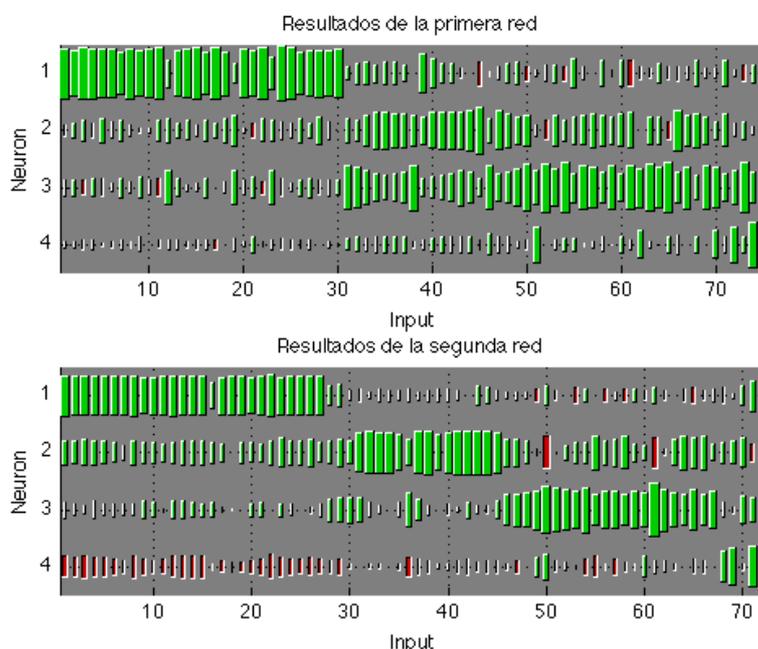


Fig. 6. 8 salidas de las dos redes neuronales.

Ambas salidas parecen iguales pero si se observa con atención la segunda salida filtra mejor los datos dispersos, y define mejor los intervalos de cada estado de funcionamiento.

La figura 6. 9 muestra la salida pronosticada por el sistema de las dos redes neuronales. La imagen superior muestra las salidas del pronosticador neuronal, y la imagen inferior muestra el grupo al que debería pertenecer cada dato.

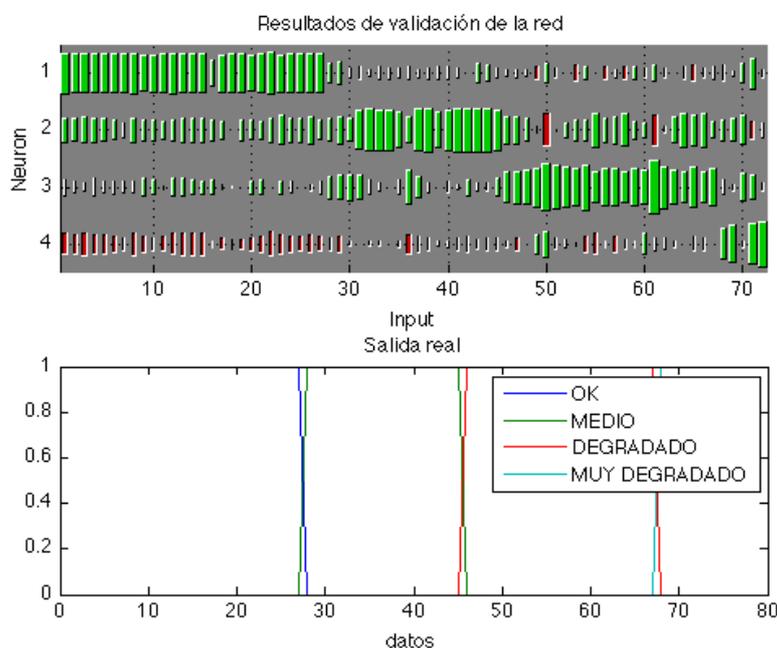


Fig. 6. 9 Salida simulada del pronosticador y datos reales

Por último se ha escogido un grupo de datos en la frontera entre dos estados de funcionamiento, y se han introducido en el pronosticador para observar si este es capaz de adelantarse al comportamiento real del sistema o no.

La siguiente figura muestra tres imágenes, la primera corresponde a la salida pronosticada, la segunda a las salidas reales y la tercera imagen corresponde a los datos reales utilizados en esta prueba.

La figura 6. 9 muestra en primer lugar las 4 salidas de estado de funcionamiento y se observa como con el paso de los ciclos el estado 2 deja de tener mayor importancia pasando al estado 3, esto sucede entre los datos 12 y 13. La segunda imagen muestra que a partir del dato 15 las salidas reales cambian de grupo pasando de MEDIO (2) a DEGRADADO (3), la salida simulada se adelanta a la salida real.

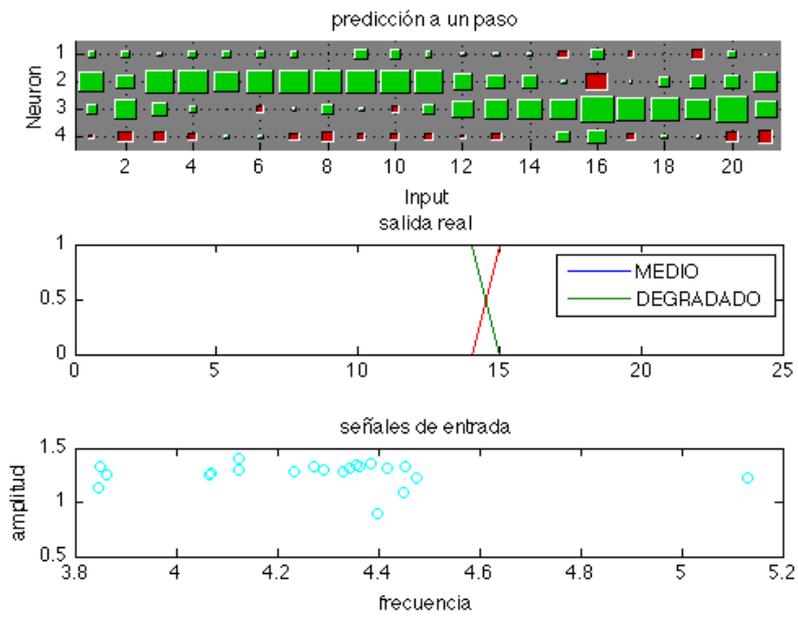


Fig. 6. 9 Pruebas de pronóstico a un paso

Capítulo 7

Discusión

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos a lo largo de estas tesis de máster. Así mismo se presentarán los potenciales problemas encontrados en la implantación del sistema supervisor basado en modelo híbrido en LabView.

Prognosis and Health Management (PHM) basado en modelo híbrido puede ser una potente herramienta de supervisión, brindando la oportunidad de seguir el estado de un sistema en todo momento. Un mejor conocimiento y control del estado del sistema en todo momento facilita las tareas de mantenimiento.

En los sistemas automáticos como la puerta utilizada para esta trabajo, el mantenimiento suele ser basado en tiempo, y los intervalos entre tareas de mantenimiento son normalmente basados en la experiencia o en las especificaciones del fabricante, este método de mantenimiento se puede mejorar notablemente, si se puede caracterizar la amplitud y la frecuencia que alimenta el motor que arrastra las hojas de la puerta.

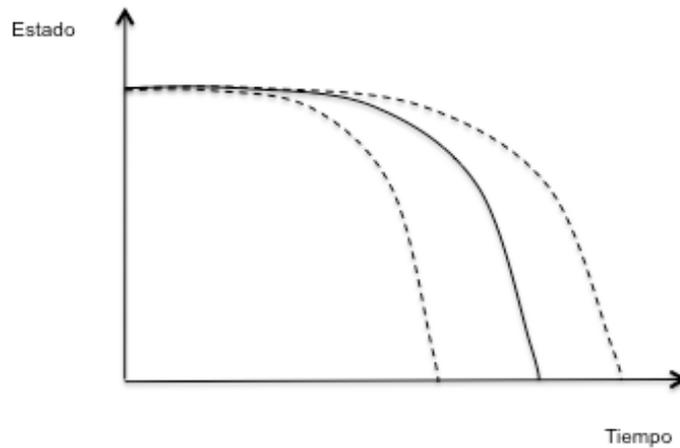


Fig. 7. 1 *media y patrón de degradación de un componente*

El mantenimiento preventivo basado en intervalos de tiempo a menudo tiene el defecto que se basa en las características de deterioro de los componentes, gestionando tareas de mantenimiento con un el mayor intervalo de tiempo posible, y a menudo los componentes se deterioran más rápidamente a causa de factores externos.

Un mantenimiento basado en el estado actual de la puerta resulta más económico. PHM es además una potente herramienta de detección precoz de fallos y del deterioro inesperado de componentes. Esto puede incrementar la seguridad y disponibilidad del sistema y optimizar a su vez el uso de los componentes.

Al utilizar *the grey-scale index* asociado a la tabla de estado y gestión del mantenimiento de Kalgren (2006), el software de PHM se combina con la información sobre el estado de operación del sistema para planear las acciones de mantenimiento de manera efectiva para aumentar el tiempo de vida de la puerta automática y reducir los tiempo de paro por avería y los costes por mantenimiento.

La gestión del mantenimiento, se muestra en la figura 7. 2, donde se muestran alrededor de la gestión del mantenimiento las áreas que afectan la operatividad y el mantenimiento en un sistema. La figura 7. 3 muestra una definición más concreta.

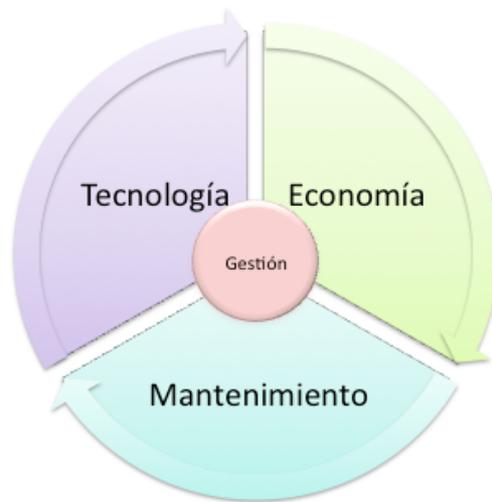


Fig. 7. 2 Áreas afectadas en las decisiones de gestión del mantenimiento.

La salida del sistema se convierte en las prestaciones de mantenimiento. Estas prestaciones son introducidas nuevamente en el modelo como medidas a través del sistema PHM donde los valores son nuevamente gestionados.

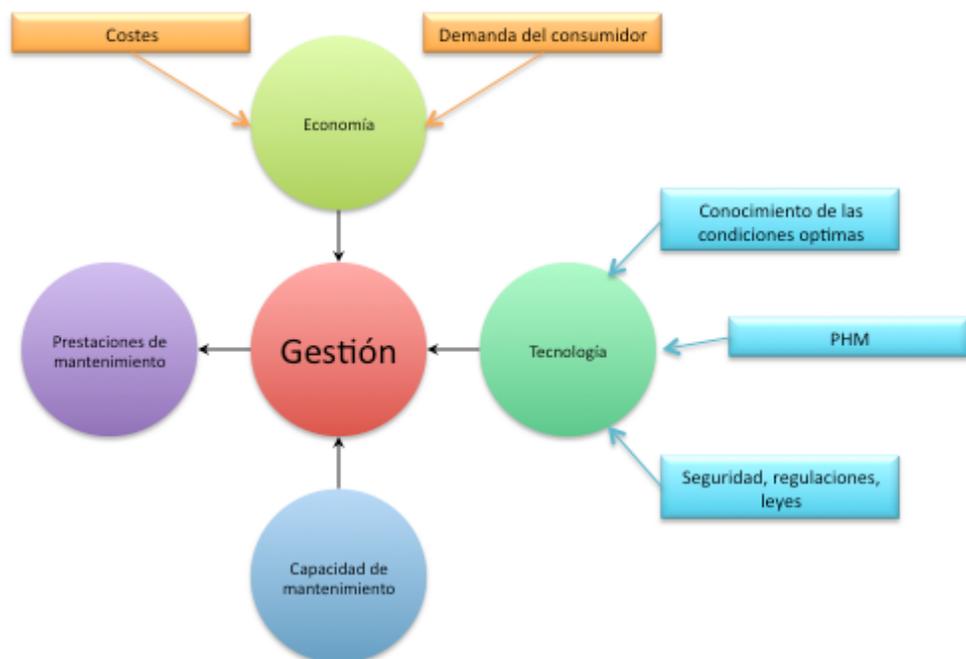


Fig. 7. 3 Gestión de mantenimiento con entrada en las decisiones de mantenimiento del proceso que facilita en la salida las prestaciones de mantenimiento.

La utilización de LabView para el prototipo del sistema supervisor a facilitado la conexión hardware y software ya que ambos sistemas pertenecen a National Instruments, el software es fácilmente adaptable a las entradas y salidas del sistema a través de la tarjeta CompactDAQ y del programa Measurements & Automation (MAX), que permite configurar las señales en una tarea que se introduce en LabView en forma de variable. La mayor problemática encontrada a lo largo de esta tesis de máster ha sido precisamente la programación en LabView.

LabView es un lenguaje de programación gráfico poco intuitivo y difícil de interpretar, totalmente diferente a los programas de simulación como Matlab o Simulink y a los lenguajes C, C++ o Java, por lo tanto se debe dedicar un gran número de horas a las tareas de diseño e implementación de las funciones en LabView. A su vez el programa MatrixX muestra una difícil combinación con LabView por lo tanto para implementar la red neuronal en tiempo real se debe diseñar totalmente en LabView o encontrar el modo de exportar dicha red a LabView.

Capítulo 8

Conclusiones

El propósito de esta tesis de máster, era realizar un estudio y analizar las diferentes técnicas de PHM, para aplicar alguna de ellas en un sistema capaz de monitorizar y supervisar el estado de funcionamiento, en todo momento, y poder aplicar técnicas de pronóstico para predecir el comportamiento futuro del sistema.

Contestando a las preguntas de investigación:

¿Como se puede monitorizar y mejorar el estado de funcionamiento de la puerta automática a través de tecnologías de PHM?

De la literatura se han podido extraer diferentes tecnologías utilizadas y diseñadas para monitorizar y supervisar sistemas basado en PHM, algunas de estas tecnologías se ha presentado en el capítulo 2. Existen casos aplicados a medidas de vibración, acústicos, cámaras... entre otros.

Para este sistema se ha utilizado la intensidad de un motor de C.A, medida a través de un sensor efecto hall monofásico, para realizar las tareas de pronóstico, y señales de posición e indicadores lógicos para el diagnostico precoz.

De estas señales en el capítulo 3 y 4 se ha caracterizado el sistema pudiendo de este modo diseñar un programa capaz de monitorizar las prestaciones del sistema basándose en técnicas

híbridas, donde en el capítulo 5 se ha realizado la descripción del sistema de monitorización programado en LabView.

¿Qué tipo de información se puede extraer de las medidas del sistema/banco de pruebas?

Información acerca de las prestaciones del sistema puerta automática al mismo tiempo que el estado actual del sistema, por ejemplo el sensor de posición se utiliza como base del sistema y a través de los indicadores lógicos se divide la puerta automática en estados, pero este sensor tiene la función extra de sensor redundante que permite sustituir a un sensor lógico averiado permitiendo seguir el ciclo normal de funcionamiento.

Gracias a las técnicas híbridas aplicadas en el capítulo 4, es posible recoger las prestaciones de apertura y cierre por separado y pre-procesar los datos de velocidad, amplitud, frecuencia, tiempo de ciclo entre otras para pronosticar el estado de la puerta.

¿Cuáles son los beneficios de utilizar técnicas de PHM para la monitorización y supervisión del sistema?

Los beneficios directos de utilizar técnicas de PHM son:

- 1-. Proporciona información del estado actual del sistema
- 2-. Proporciona información del estado futuro del sistema
- 3-. Detecta i diagnostica fallos precoces.

Como se mostraba en la introducción, capítulo 1, el mantenimiento repercute en un alto porcentaje en los costos industriales, donde la alta competencia industrial a convertido al mantenimiento en un factor imprescindible. Por lo tanto si con esta tecnología se consigue cumplir los objetivos se pueden conseguir beneficios económicos, pero lo más importante es el incremento en la fiabilidad y disponibilidad del equipo, convirtiéndolo en un sistema más seguro y con un mayor índice de vida.

Por lo tanto como se describe en el capítulo 7 esto proporciona una mejor y más fácil gestión

del mantenimiento.

Conclusiones en relación a los propósitos y limitaciones del trabajo:

Los resultados estudiados en la literatura y en este caso de estudio proporcionan unos indicadores positivos del potencial existente en la tecnologías basadas en PHM para mejorar el mantenimiento y la supervisión de sistemas.

La utilización de modelos híbridos para caracterizar el sistema puerta automática ha facilitado el cálculo de prestaciones necesarias para poder desarrollar un sistema basado en predicción. Este modelo híbrido se ha descrito como un diagrama de estados o *statechart* que ha trabajado como supervisor, detectando en todo momento en que estado se encuentra el sistema puerta.

El desarrollo de un diagrama de estado *statechart* ha permitido realizar labores de diagnóstico precoz, pronóstico y relaciones redundantes en un solo modelo. Esto ha facilitado enormemente el diseño del sistema informático permitiendo a través de LabView programar un prototipo en varios meses y poderlo testear en tiempo real.

La incorporación de metodologías de inteligencia artificial para realizar el pronóstico ha sido positiva, y el diseño de una doble red para realizar las tareas de pronóstico ha resultado un éxito. Observando los resultados mostrados en el capítulo 6, la figura 6.8 muestra las salidas de ambas redes neuronales, la primera que clasifica el sistema y la segunda utilizada para la predicción. Ambas muestran el mismo patrón, pero la segunda red filtra mejor los malos resultados y descarta los errores provocados por la dispersión de los datos. Observando la imagen 6.9 se destaca como los valores simulados de la salida de la red se adelantan a predecir el cambio de estado de MEDIO a DEGRADADO, en la salida simulada a parece en el dato 12 13, y en la real sobre el 14, 15.

Capítulo 9

Trabajo Futuro

Este trabajo ha servido como introducción al mundo del PHM para conocer el estado del arte de las técnicas utilizadas y las aplicaciones desarrolladas con técnicas de predicción para mejorar las tareas de mantenimiento.

El sistema basado en PHM diseñado ha sido probado solamente en el escenario mostrado en el capítulo 6 de esta tesis de máster. El primer punto a mejorar es validar dicha metodología aplicándola un mayor número de escenarios.

Otro aspecto a completar es el árbol de fallos programado en el *statechart*, ya que sería interesante vincularlo con modelos de comportamiento para mejorar la tarea de diagnóstico

Al desarrollar el pronosticador inteligente basado en redes neuronales solamente se ha utilizado la combinación descrita en el capítulo 4, se deberían estudiar otras combinaciones por tal de comprobar que la elegida es la mejor opción para conocer el estado de funcionamiento futuro del sistema, en este trabajo el utilizar 3 muestras pasadas para predecir ha sido suficiente, pero no se han probado otras alternativas. Otro inconveniente asociado al pronosticador es que la red neuronal no está implementada en entorno LabView, se utiliza un programa desarrollado en MatrixX el cual se alimenta con un fichero de datos. Sería

interesante programar el pronosticador inteligente en LabView para poder disponer de un supervisor basado en PHM en tiempo real.

Esta tesis de máster pretende ser una introducción al mantenimiento predictivo y a las tecnologías recientemente utilizadas en él, ya que se pretende realizar una tesis doctoral siguiendo los siguientes criterios y objetivos. La tesis estará enmarcada en el campo de PHM, y tiene como objetivo principal proponer nuevas metodologías de monitorización y supervisión de sistemas que integren aspectos de mantenimiento predictivo y control tolerante con el fin de incrementar la disponibilidad, fiabilidad y seguridad de los sistemas y procesos tecnológicos.

Con el fin de conseguir el objetivo principal de esta tesis se desarrollarán tres líneas principales que delimitan su alcance. Dichas líneas tienen como punto de partida los trabajos recientemente desarrollados en el grupo de investigación SAC, que tratan de la detección y diagnóstico de fallos utilizando modelos inciertos. Las líneas de trabajo serán:

- *Desarrollo de algoritmos orientados al pronóstico de fallos.* Un aspecto importante en la explotación de sistemas y procesos industriales es el de conocer el estado de todos los componentes que lo integran y prever cuanto legos estamos de que ocurra un determinado fallo. Ello puede conseguirse obteniéndose modelos de comportamiento y evaluando las tendencias de los mismos. Las aportaciones en esta línea serán las de generar metodologías de obtención de modelos híbridos de comportamiento a partir de datos experimentales con los cuales poder hacer pronóstico de averías futuras.

- *Diseño de modelos híbridos dedicados al pronóstico y la detección de fallos.* En los últimos años, los sistemas híbridos han atraído la atención tanto de los investigadores como de la industria (Red Europea de Excelencia HYCON). El nombre de híbrido proviene precisamente que en este tipo de sistemas combina dinámica continua descrita mediante ecuaciones diferenciales con dinámica discreta descrita mediante máquinas de estado y/o reglas lógicas. Estos modelos mixtos permiten representar sistemas con distintos modos de operación. La aportación en esta línea será la integración de herramientas que permitan caracterizar el comportamiento de sistemas mediante modelos denominados híbridos con el objetivo de ser aplicados tanto en pronóstico como detección de fallos.

- *Desarrollo de nuevos mecanismos de monitorización y supervisión avanzada que incluyan mantenimiento predictivo i control tolerante a fallos.* Para garantizar las prestaciones de **PHM Basado en Modelo Híbrido para Sistema Supervisor utilizando Labview**

funcionamiento y la disponibilidad/seguridad de un sistema, es necesario que una vez detectado un fallo o realizado un pronóstico se tomen decisiones. Las decisiones a tomar pueden ser desde planificar un paro del sistema para realizar tareas de mantenimiento a modificar la estrategia de control para finalizar una determinada acción. En la bibliografía consultada difícilmente se encuentran desarrollos en los que se tenga en cuenta de forma conjunta el mantenimiento predictivo y el control tolerante, se pretende en esta línea plantear metodologías de integración de ambas.

Todos los métodos desarrollados en las líneas de investigación anteriores se integrarán y aplicarán a alguno de los sistemas y procesos reales que dispone o dispondrá el grupo investigador, como es el sistema basado en una pila de combustible, procesos/sistemas reales (redes de agua potable y alcantarillado) o nuevas maquetas que se adquirirán en el grupo investigador.

Bibliografía

- Antsaklis, P. J. (2002). "A brief introduction to the theory and applications of hybrid systems." Proc. IEEE(Special Issue on Hybrid Systems: Theory and Applications): 88(7):879-886.
- Bemporad, A. (2006). Model Predictive Control of Hybrid Systems.
- Bemporad A., M. M. (1999). "Control of Systems Integrating Logic, Dynamic and Constraints." Automatica **35**: 407-427.
- Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J. and Staroswiecki, M. (2006). Diagnosis and Fault-tolerant Control, Springer Publisher.
- Byington, C. S., Romer, M.J., Gaile, T. (2002). "Prognostic Enhancements to diagnostic Systems for Improved Condition-Based Maintenance". " IEEE journal **0-7803-723-X**
- Cassandras, C. G., Lafontaine, S., Olsder G.J. (1995). Introduction to the modelling, control and optimisation of discrete event systems, Springer-Verlag.
- Cordier, M. O., Dague, P., Dumas, M., Lévy, M., Montmain, J., Staroswiecki, M. & Travé-Massuyès, L. (2004). "Conflicts vs. Analytical Redundancy Relations: a Comparative Analysis of the Model-based Diagnosis from the Artificial Intelligence and Automatic Control Perspectives." IEEE journal on systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics: 2163-2177.
- De Schutter, B. (1999). Optimal control of a class of linear hybrid systems with saturation. 38th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE: 3978-3983.
- Eklund, H. W. (2009). Prognostics and Health management. PHM Society Congress. 2009 PHM Conference Tutorial.
- Escobet T., V. P. (2008). Apuntes de la asignatura de máster Diagnóstico y Control Tolerante.
- Fu, C., Luqing Ye, Yongqian Liu, Ren Yu, Benoit Iung, Yuanchu Cheng, and Yuming Zeng (2004). "Predictive Maintenance in Intelligent-Control-Maintenance-Management System for Hydroelectric Generating Unit. ." IEEE journal Transactions on energy conversion, **vol.19, no. 1**,: 179-186.
- Gertler (1998). Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems.
PHM Basado en Modelo Híbrido para Sistema Supervisor utilizando Labview

- Henzinger, T. A. (1997). HYTECH: A model checker for Hybrid Systems. P.-H. Ho.
- Hines, D. J. W. (2009). Empirical Methods for Process and Equipment Prognostics. PHM Society Congress. 2009 PHM Conference Tutorial.
- IEC-IEV-191-04-01 Dependability and Quality of Service / Failures. IEV 191-04-01. I. E. Comission.
- IEC-IEV-191-05-01 Dependability and Quality of Service/ Faults, errors and mistakes. IEV-191-05-01. I. E. Comission.
- IEC-IEV-191-07-01 Dependability and Quality of service / Maintenance. IEV 191-07-01. I. E. Comission.
- IEC-IEV-191-07-08 Dependability and Quality of Service/ Corrective Maintenance. IEV-191-07-08. I. E. Comission.
- Instruments, N. (2006). NI CompactDAQ USB Data Adquisition System. N. Tutorials.
- Instruments, N. (2007). NI MatrixX. System Build Neural Network Module. N. Tutorial.
- Instruments, N. (2008). Operating Instructions and Specifications NI9401. N. Tutorials.
- Instruments, N. (2008). Operating Instructions and Specificatiosn NI9205. N. Tutorials.
- Kalgen, P. W., Byngton, C.S., Romer, M.J., Watson, M.J. (2006). "Defining PHM, a lexical evolution of maintenance and logistics." Proc. IEEE: 335-358.
- Krysander M., A. J., Nyrberg M., (2008). "An Efficient Algorithm for Finding Minimal Overconstrained Subsystems for Model-Based Diagnosis Systems." IEEE journal on systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics **38 (1)**: 197-206.
- Lajara Vizcaíno J. R., P. S. J. (2007). LabVIEW entorno gráfico de programación.
- Luo M., W. D., Pham M., Low C.B., Zhang J. B., Zhang D. H., (2005). "Model-based Fault Diagnosis/prognosis for Wheeled Movbile Robots: A review." Proceedings of the 31st anual conference of IEEE: 2267-2272.
- Mobley, R. K. (2002). An introduction to Predictive Maintenance, Elsevier Science(USA).
- Mobley, R. K. (2002). "An introduction to Predictive Maintenance"., Elsevier Science(USA).
- Morari, M., M. Baotic M., Borrelli, F. (2003). "'Hybrid Systems Modeling and Control". . " European. Journal of Control **9, n. 2-3**: 177-189.

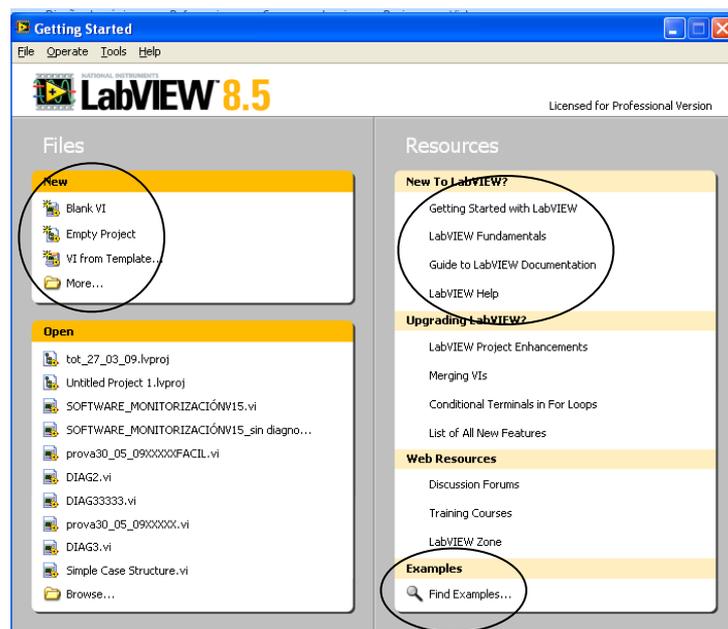
- Nyberg M., F. E. (2008). Model Based Diagnosis of Technical Processes.
- P.W. Kalgren, C. S. B., P.E., M.J. Roemer, M.J. Watson (2006). "Defining PHM, a lexical evolution of maintenance and logistics." IEEE journal: 353-358.
- Parra X., A. C. (2007). Artificial Neural Network, Artificial Intelligence for control and identification, Apuntes de la asignatura Inteligencia Artificial aplicada al Control y a la Identificación de Modelos.
- S. Katipamula, M. R. B. (2005). "Methods for Fault Detection, Dignostics, and Prognostics for Build Systems." HVAC&R research.
- Silva B., S. O., Krogh B., Engell S., (2001). An Assessment of the Current Status od Algorithm Approaches to the Verification of Hybrid Systems. Decision and Control (CDC 2001). IEEE. Orlando: 2867-2874.
- Sontag, E. (1981). "Nonlinear regulation: The piecewise linear approach." IEEE Transactions on Automatic Control **26**, **no. 2**: 346-358.
- Staroswiecki M., J. P. C. a. P. D. (2000). A Structural Framework for the Design of FDI System in Large Scale Industrial Plants., Springer-Verlag.
- Torrisi, T. a. A. B. (2004). "Hysdel - A tool for generating computational hybrid models for analysis and synthesis problems." IEEE Transactions on Control Systems Technology **12**, **no. 2**: 235-249.
- Tu F., G. S., Luo J., Biswas G., Mahadevan S., Jaw L., and Navarra K., (2007). "PHM Integration with Maintenance and Inventory Management Systems. ." IEEE journal aerospace conference digest: 1-12.
- Villada F., C. D. R., Molina J. D. (2008). "Electricity Price Forecastinf Using Artificial Neural Networks." Facultad Ingenieria Univ. Antioquia **44**: 111-118.
- Yan, J., Lee, J. (2007). "A Hybrid Method for on-line Performance Assessment and Life Prediction in Drilling Operation." Proc. IEEE: 2500-2505.
- Yan, J., Lee, J. (2007). "A Hybrid Method for on-line Performance Assessment and Life Prediction in Drilling Operation". ." Proc. IEEE: 2500-2505.
- Yin, R. K. (2005). Case Study Research, Design and Methods, SAGE Publications.
- Zhang G., P. E., Hu M. Y. (1997). "Forecasting with Artificial Neural Networks: The State of The Art." ELSEVIER.

Anexos

1. INTRODUCCIÓN A LABVIEW

Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs, lo que da una idea de su uso en origen: el control de instrumentos. La versión utilizada en este proyecto es la 8.5.

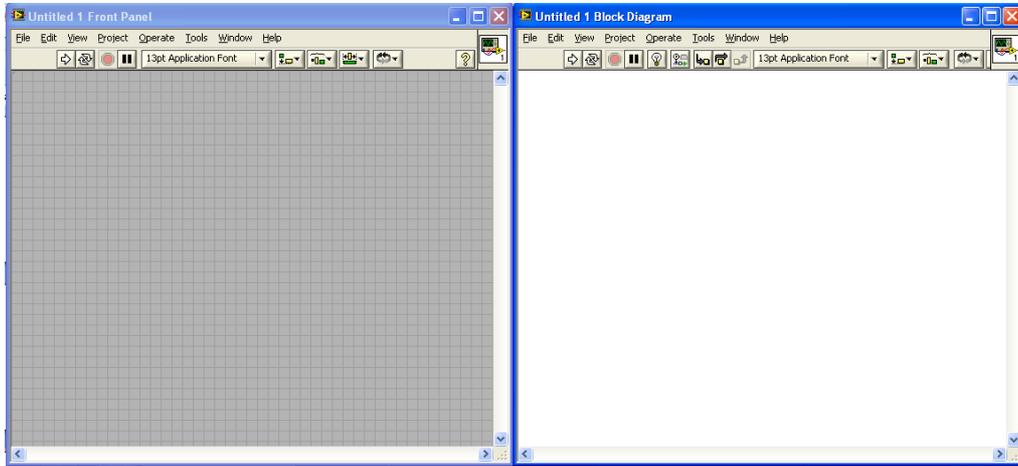
Al abrir el software de programación aparece una ventana que da paso a la elección de un nuevo proyecto o VI, así como la posibilidad de ejecutar ejemplos o tutoriales.



Caratula de LABVIEW

Para la creación de un programa se abre un nuevo documento, un blank VI. Todo programa consta de dos ventanas principales: un instrumento real, donde aparecerán los botones pantallas...; y una circuitería interna. Estas partes reciben el nombre de Panel Frontal y Diagrama de Bloques respectivamente.

- Panel Frontal, es la parte que verá el usuario, suele tener fondo gris.
- Diagrama de bloques, es donde se realizará la programación y suele tener fondo blanco.



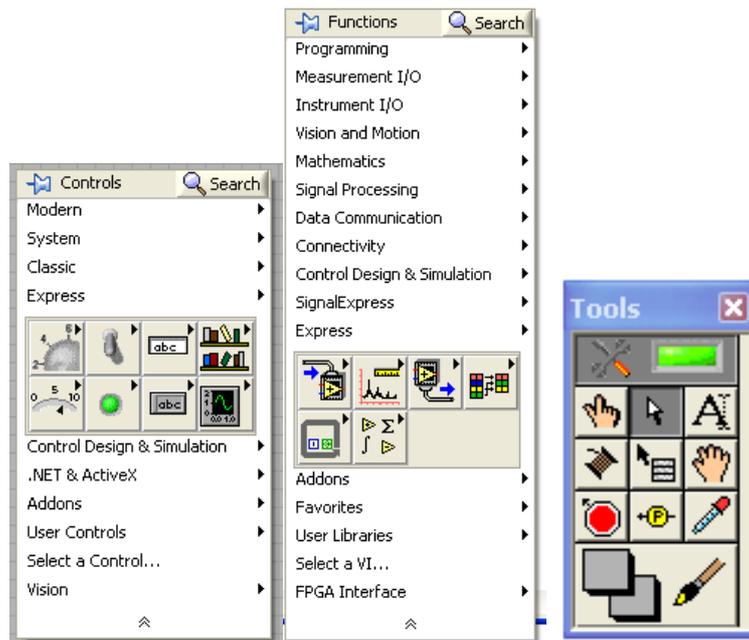
Panel frontal y diagrama de bloques de un VI

En la parte superior de estas ventanas se sitúa una barra con varias herramientas.



Este grupo de herramientas sirve para controlar la ejecución de un programa. El primer botón indica si hay errores en el programa (flecha rota), cuando no los hay (flecha completa como en la imagen), ejecuta una vez el programa. El segundo botón ejecuta de forma continua el programa, en general este botón no suele usarse, sino que se utilizan bucles en el programa. El tercer botón aborta la ejecución y el último permite realizar una pausa.

Para la programación existen tres tipos de paletas, la de controles, la de funciones y la de herramientas.



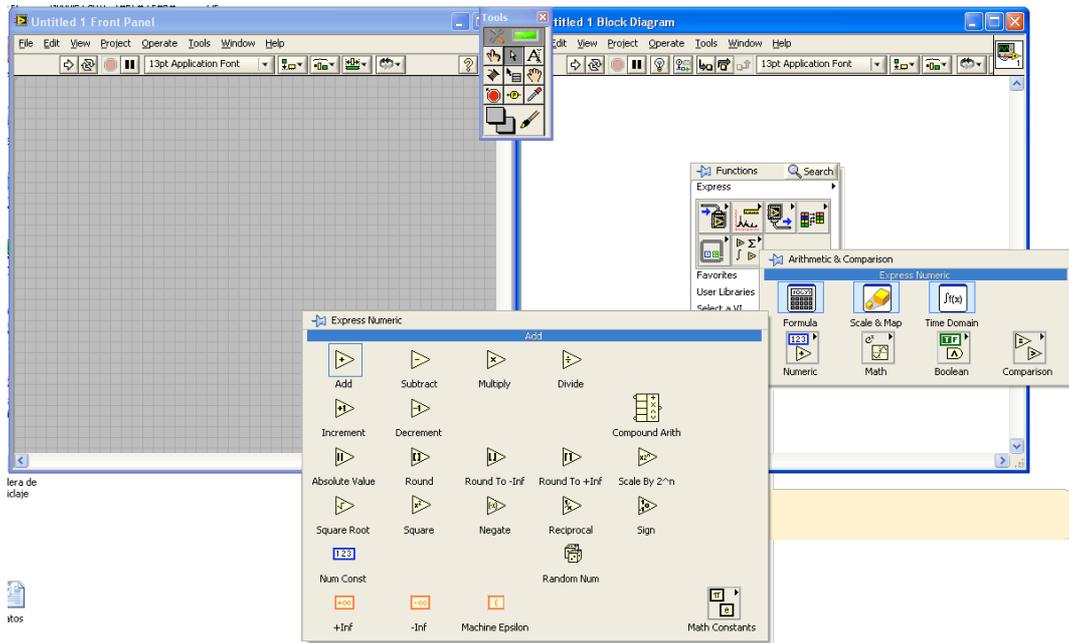
Paleta de control, de funciones y de herramientas para la programación de VIs

La de funciones es la que permite la incorporación de bloques de programación en la ventana de diagrama de bloques. La de controles permite la incorporación de bloques de programación en el panel frontal, y la paleta de herramientas es común para ambas ventanas.

A continuación se presentará un ejemplo para observar cómo trabaja LabView:

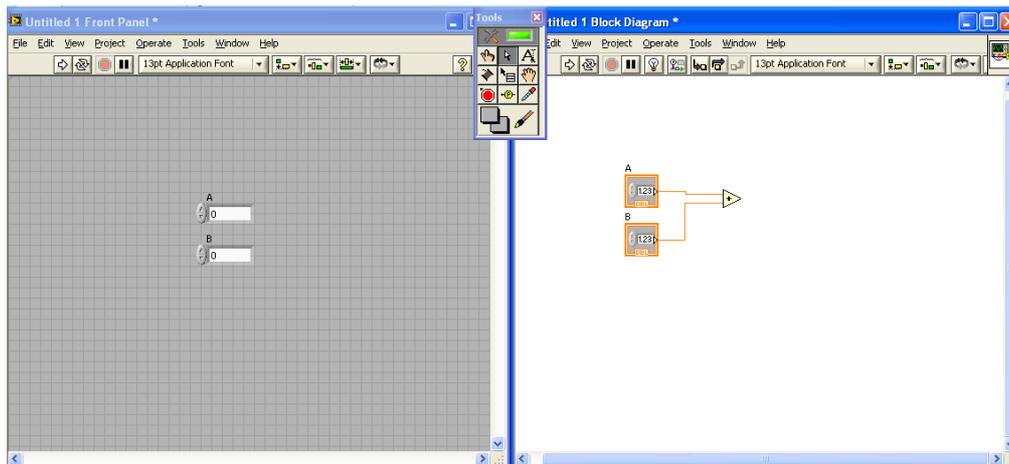
EJEMPLO: $A+B \cdot C$

Para realizar esta operación se trabaja sobre la ventana de Diagrama de Bloques, insertando los componentes necesarios:



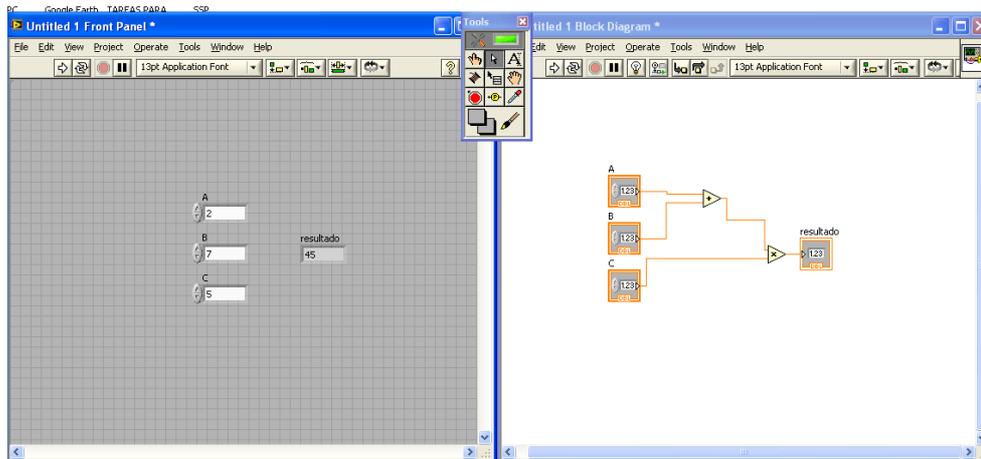
Introducción de una función en un nuevo VI

Se observa como al insertar comandos de control sobre el diagrama de bloques aparecen sus correspondientes indicadores en el panel frontal.



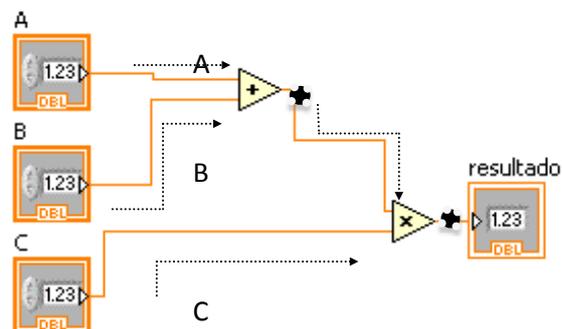
Correspondencia entre el panel frontal y el diagrama de bloques en LabView

Se le asignan los valores de 2, 7 y 5 a A, B y C respectivamente, y tras la ejecución del programa aparece el resultado (45).



Ejemplo de una VI

La ejecución en LABVIEW funciona de la siguiente manera:

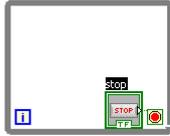


Ejecución de datos en LABVIEW

Todos los bloques de funciones necesitan tener los datos de todas sus entradas antes de poder ejecutarse.

Estructuras

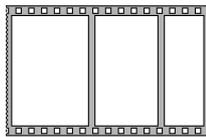
Para la programación son utilizadas diferentes estructuras que gráficamente representan funciones clásicas de otros lenguajes de programación.



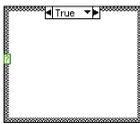
WHILE LOOP: este bucle repetirá el código de su interior hasta que se cumpla una condición, la cual es evaluada en cada iteración.



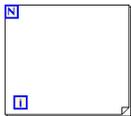
TIMED LOOP: el dibujo recuerda a un while loop, pero no es necesaria ninguna condición para su funcionamiento, una de sus características es la posibilidad de programar con que frecuencia se repetirá el código de su interior.



SEQUENCE: En los lenguajes tradicionales basados en texto, el orden de ejecución se corresponde con el orden en que están escritas las instrucciones, de manera que las estructuras sequence sirven para esto mismo, ordenar el flujo de ejecución del código que se encuentra en su interior.

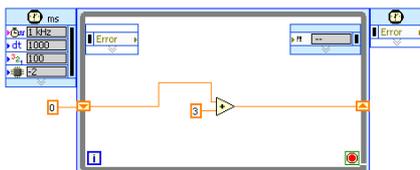


CASE: es el equivalente a varias de los lenguajes basados en texto: IF, SWITCH y TRY. Su utilidad es ejecutar un código u otro dependiendo de una condición.

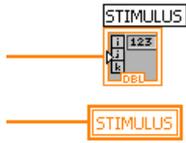


FOR: esta estructura también es muy parecida a la WHILE, repite el código de su interior un número N de veces, pero a diferencia del anterior este número es fijado a priori y no puede cambiarse una vez empieza la ejecución.

Otros conceptos interesantes



SHIFT REGISTERS: En esta representación se observa un hilo que sale del sumador y finaliza en el borde del bucle convirtiéndose en un pequeño triángulo, y a su vez aparece un hilo desde la otra parte del bucle que entra en el sumador a través de otro triángulo, estos terminales sirven para transferir un valor de una iteración del bucle a la siguiente. Siendo $X(t) = 3 + X(t-1)$



VARIABLE LOCALES: en LABVIEW los datos circulan por los cables, pero cuando los datos deben fluir entre estructuras o diferentes hilos de programación es recomendable el uso de variables locales tanto por su sencillez a la hora de visualizar el código del programa como para un funcionamiento correcto a la hora de trabajar con datos cruzados. (Siendo los bloques rectangulares variables locales que representan las variables de su mismo nombre)



SUB-VI: Estos bloques son a su vez VI, pequeñas funciones diseñadas por el programador se pueden incorporar dentro de otros VI a través de sus entradas y salidas (previamente definidas al englobar el SUB-VI)

2. TABLAS CARACTERISITCAS DEL STATECHART

Estado	Transiciones	Condición lógica	Descripción
Funcionamiento normal	T1	Botón abrir = \uparrow	Inició del movimiento de la puerta, pulsador abrir
	T2	FC puerta cerrada = \downarrow	El sensor lógico de puerta cerrada cambia el estado de 1 a 0
	T3	FC virtual puerta abierta = \uparrow	Indicador de puerta abierta suministrado por FERMATOR
	T4	FC puerta abierta = \uparrow	El sensor lógico de puerta abierta cambia el estado de 0 a 1
	T5	Botón cerrar = \uparrow	Inició del movimiento de la puerta, pulsador cerrar
	T6	FC puerta abierta = \downarrow	El sensor lógico de puerta abierta cambia el estado de 1 a 0
	T7	FC puerta cerrada = \uparrow	El sensor lógico de puerta cerrada cambia el estado de 0 a 1
	T8	FC gatillo = \uparrow	El sensor lógico del gatillo cambia el estado de 0 a 1
	T9	FC fotocélula = \uparrow	La fotocélula cambia el estado de 0 a 1
Anomalía	T10	Time out	Superado el tiempo de espera para la activación de T2
	T11	Time out	Superado el tiempo de espera para la activación de T3
	T12	Time out	Superado el tiempo de espera para la activación de T4
	T13	Time out	Superado el tiempo de espera para la activación de T6
	T14	Time out	Superado el tiempo de espera para la activación de T7
Avería	T15	Time out & posición < 12 cm	Superado el tiempo de espera para la activación de T3 y sensor de posición indica que no ha habido movimiento en la puerta.
	T16	FC gatillo = ON	El sensor lógico del gatillo sigue en estado ON
	T17	Posición < 38 cm	La puerta no ha avanzado ni la mitad del recorrido
	T18	Posición > 12 cm	La puerta no ha llegado a la zona de cierre (puerta cerrada, no enclavada)
	T19	Time out	Superado el tiempo de espera para la activación de T8

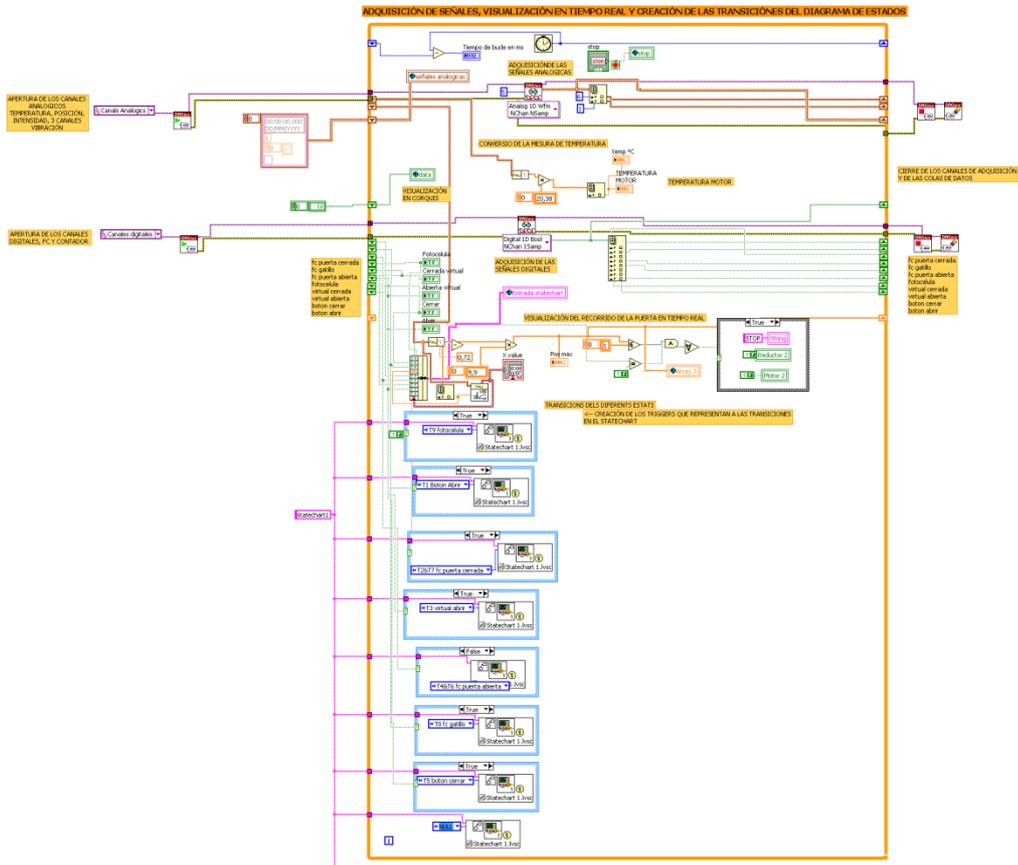
Tabla 1 Descripción de las transiciones entre estados

Estado	Estados	Descripción	Transición entrada	Transición salida	Diagnostico
Funcionamiento normal	E1	Puerta cerrada	T5, T8	T1	Estatus OK
	E2	Abriendo gatillo	T1	T2, T5, T10	Estatus OK
	E3	Abriendo puerta	T1, T2, T9	T3, T5, T11	Estatus OK
	E4	Final apertura (menor velocidad)	T1, T3	T4, T5, T12	Estatus OK
	E5	Puerta abierta	T1, T4	T5	Estatus OK
	E6	Cerrar puerta	T5	T1, T6, T9, T13	Estatus OK
	E7	Cerrando puerta	T5, T6	T1, T7, T9, T14	Estatus OK
	E8	Cerrando gatillo	T5, T7	T1, T8, T19	Estatus OK
Anomalía	F1	Problemas FC puerta cerrada (apertura)	T10	T3, T15, T16	Problemas en la apertura.
	F2	Problemas FC virtual puerta cerrada	T11	T4, T5, T17	Problemas sensor virtual de puerta abierta
	F3	Problemas FC puerta abierta (apertura)	T12	T5	Problemas FC puerta abierta
	F4	Problemas FC puerta abierta (cierre)	T13	T7	Problemas FC puerta abierta
	F6	Problemas FC puerta cerrada (cierre)	T14	T8, T18	Problemas en el cierre.
Avería	F1_1	Avería en la apertura, puerta no abre	T15		Avería en la apertura, puerta no abre
	F1_2	Avería sensor gatillo	T16		Avería sensor gatillo
	F2_1	Avería en la apertura	T17		Avería en la apertura, puerta medio abierta
	F5_1	Avería en el cierre	T18		Avería en el cierre, puerta no cierra
	F6	Avería sensor gatillo	T19		Avería sensor gatillo, puerta no enclavada

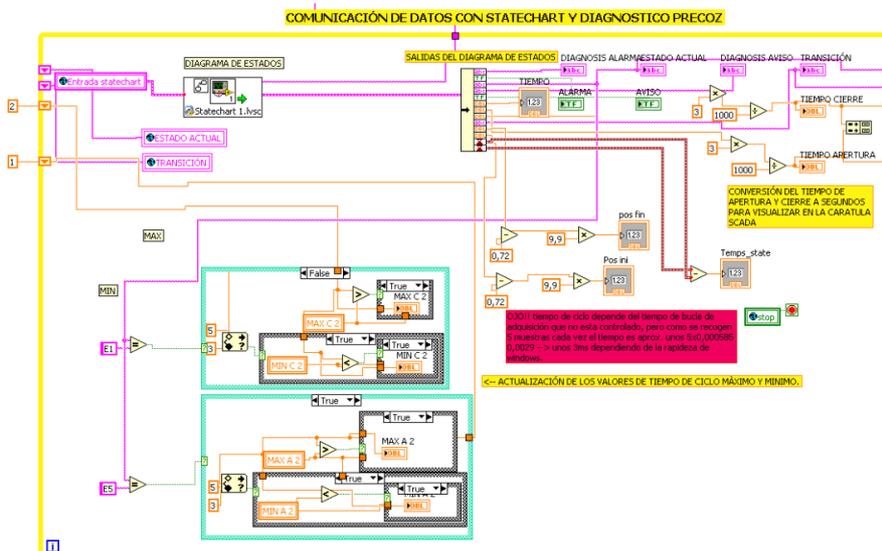
Tabla 2 Descripción de los estados

3. PROGRAMAS

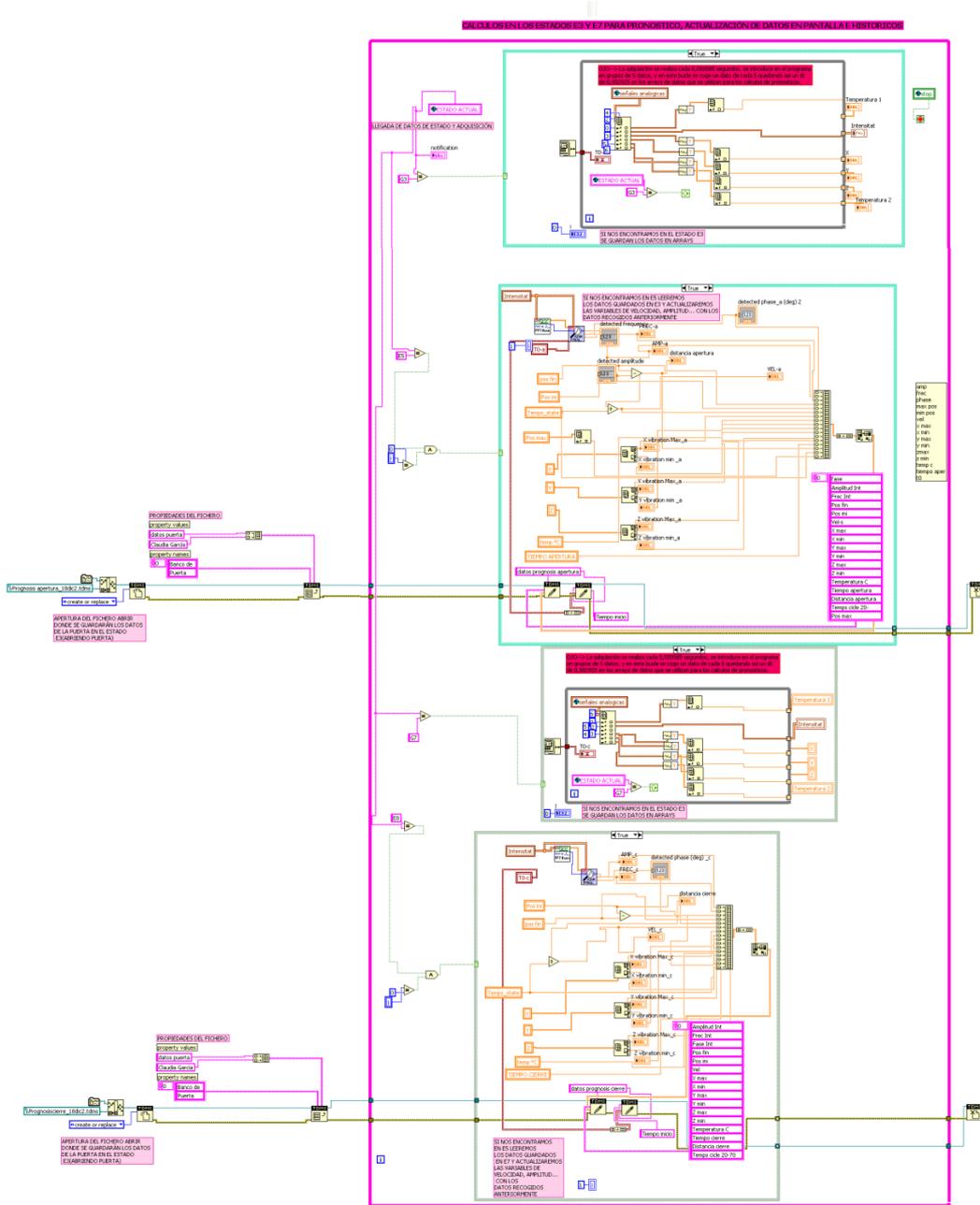
Bucle 1: Adquisición de señales, visualización en tiempo real y creación de las transiciones del diagrama de estados.



Bucle 2: Comunicación de datos con statechart y diagnóstico precoz



Bucle 3: cálculos en los estados E3 y E7 para pronóstico, actualización de datos en pantalla e historicos



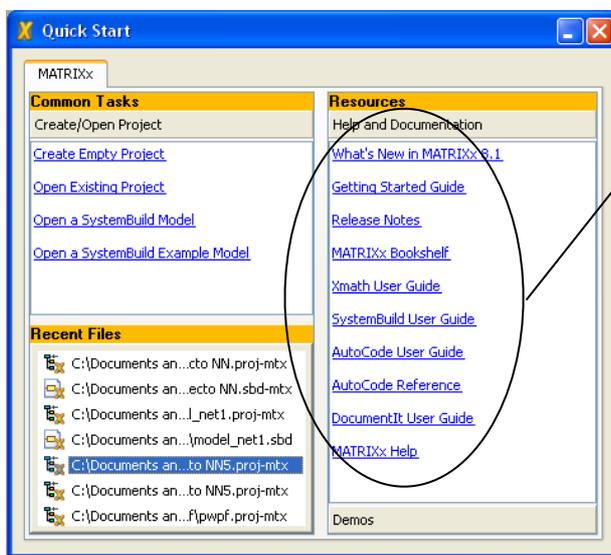
4. INTRODUCCIÓN A MATRIXX

National Instruments dispone de un conjunto de softwares llamados MATRIXX especialmente diseñados para generar modelos de alta fidelidad, y realizar simulaciones de modelos de sistemas interactivos, analizar y desarrollar algoritmos de control robusto para generar controladores. MATRIXX incluye:

- *System Build*: Programa de modelado gráfico de sistemas de simulación.
- *Xmath*: diseñado para el análisis interactivo, visualización y control.
- *DocumentIt*: capacitado para la generación automática de documentación.
- *AutoCode*: Este programa permite generar automáticamente código embebido en C o Ada de los objetos creados en MATRIXX para su utilización en hardware NI, en tiempo real para su aplicación en prototipos o bancos de pruebas.

MATRIXX dispone de varias *toolkit* específicas para trabajar, la utilizada en esta tesis de máster es la *SystemBuild Neural Network Module (NNM)* como su nombre indica esta *toolkit* está diseñada específicamente para trabajar con redes neuronales, a continuación se se mostrará como diseñar una red neuronal en MATRIXX a través de esta *toolkit*.

Al inicializar MATRIXX aparece una pantalla de inicio donde se puede elegir diversas funciones, abrir un proyecto antiguo, crear uno nuevo, abrir ejemplos, y en la parte derecha se dispone de tutoriales y manuales de iniciación a MATRIXX.

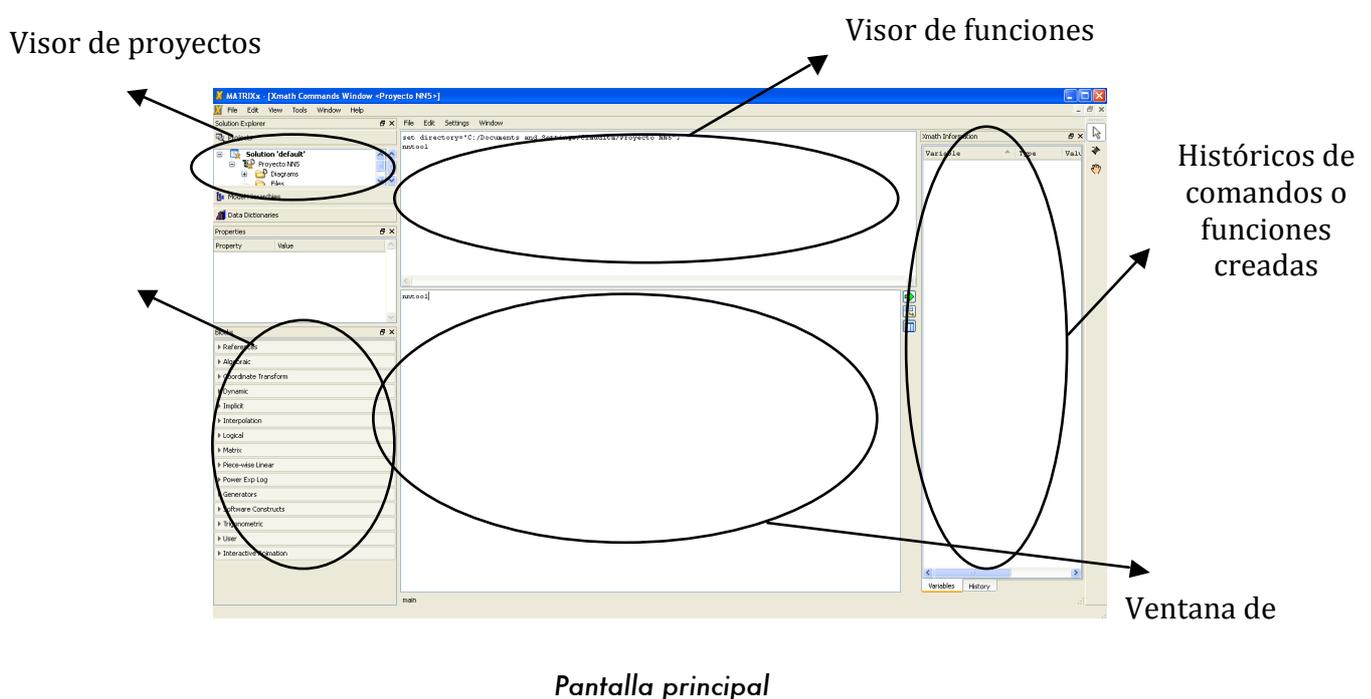


Manuales y guías de usuario

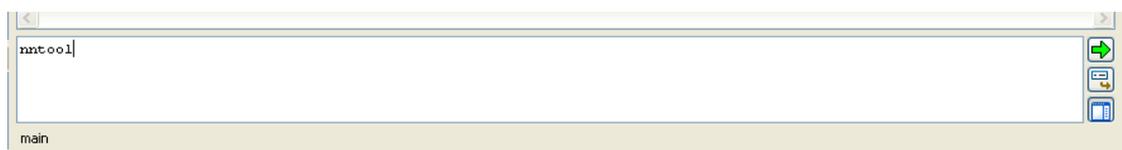
Pantalla de inicio de MATRIXX

Para crear un nuevo proyecto se debe clickar en *create Empty Project*, al crear un nuevo proyecto aparece la pantalla de inicio.

En esta pantalla se encuentra la ventana de proyecto arriba a la izquierda, donde se muestra el proyecto actual. Justo debajo aparecen las librerías con los bloques funcionales de que dispone MATRIXX. La parte central es la ventana de comandos, en la parte inferior se escriben las funciones y en la parte superior se muestra la ejecución de las mismas. La parte derecha consta de dos pestañas, una con que registra los comandos utilizados y la otra para las variables creadas.



Para ejecutar la *toolkit* NNM se debe escribir 'mntool' en la ventana de comandos y ejecutar. Al ejecutar aparece una nueva ventana, esta se muestra en la siguiente figura

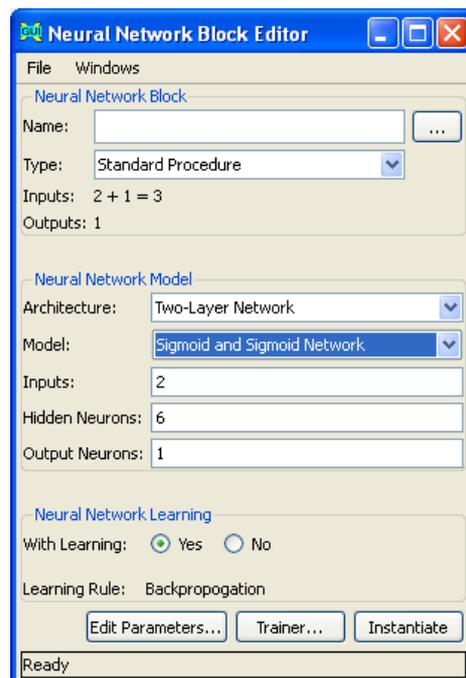


Ejecución de la toolkit MMN

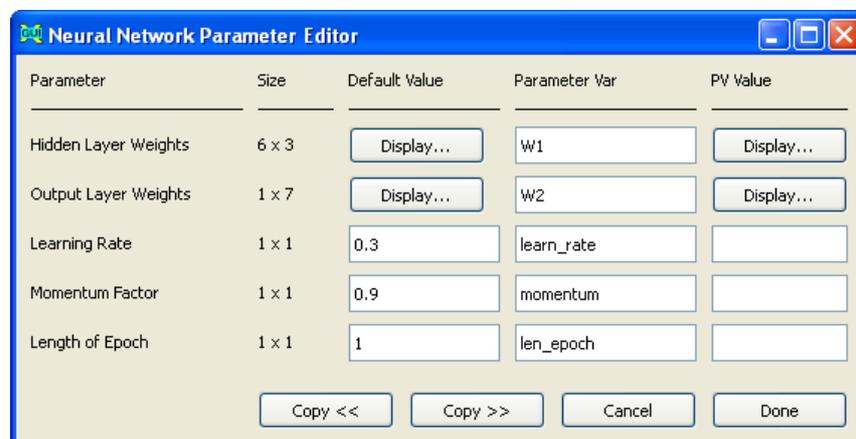
En esta ventana se diseña la red neuronal, se inserta el número de entradas de la red, el número de capas, el número de neuronas en las capas ocultas, el número de salidas y la *PHM Basado en Modelo Híbrido para Sistema Supervisor utilizando Labview* 134

función de activación (desplegable). A su vez se puede elegir entre entrenamiento supervisado o no supervisado.

Una vez diseñada la red se deben escoger los parámetros de tolerancia de error por época para asegurar un buen entrenamiento, los valores modificables aparecen en la pantalla de parámetros.



Pantalla de generación de redes neuronales



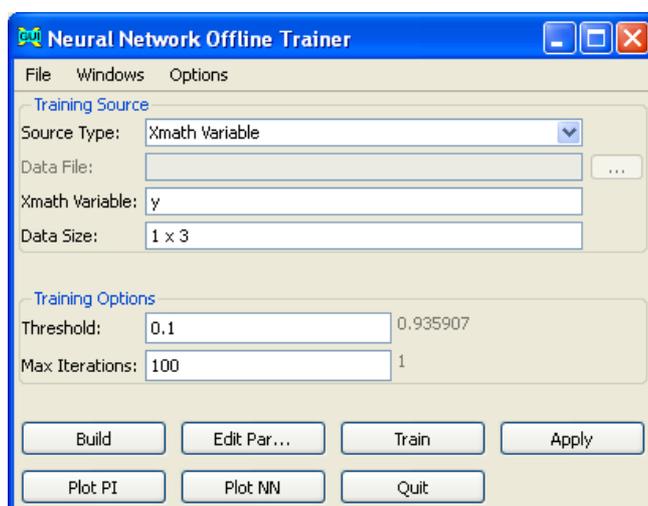
Pantalla de parámetros

Una vez configurados los parámetros de la red se pasa al entrenamiento clicando el botón de ‘trainer’ de la ventana de generación de redes neuronales. De esta ventana emerge una nueva, la pantalla de entrenamiento. En la ventana de entrenamiento se deben introducir los datos de entreno.

Antes de entrenar se debe construir la red con el botón ‘build’, este botón genera la red neuronal diseñada con los parámetros de tolerancia de error escogidos. En esta pantalla es posible modificar dichos parámetros.

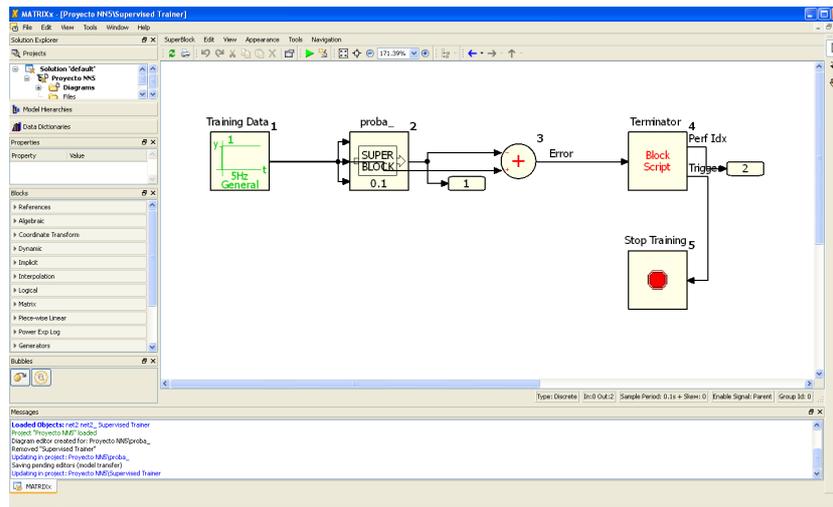
Asimismo se pueden graficar los resultados del entrenamiento.

Si se trata de un entrenamiento supervisado los datos se deben introducir en forma vectorial con un numero de columnas igual al número de entradas + el numero de *targets* de salida.



Pantalla de entrenamiento

Una vez finalizado el entrenamiento *offline* se puede realizar un entrenamiento *online* con el modelo generado (Ver a continuación), o bien se pueden exportar los vectores de pesos de las capas de la red y simular la misma.



Entrenador online.