

**ANALES DE LAS TESIS DOCTORALES
FRUTO DE LA COOPERACIÓN
INTERUNIVERSITARIA CON COLOMBIA
(1994-2005)**

Volumen II



**UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA**



Vicerrectorado de Cooperación y Proyectos Internacionales

ÍNDICE - VOLUMEN II

AUTOMÁTICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

Algoritmos masivamente paralelos para simulación dinámica molecular a largo plazo de sistemas multicuerpo de gran escala Autor: Andrés Jaramillo Botero Director: Alfons Crespo i Lorente Fecha de lectura: 11/06/98.....	571
Control por modos deslizantes de sistemas de datos muestreados Autor: Freddy Naranjo Pérez Director: Pedro Albertos Pérez Fecha de lectura: 21/12/98.....	589
Arquitecturas Hardware para planificadores de tiempo real Autor: Ángel García Baños Director: Joan Vila i Carbó Fecha de lectura: 29/07/99.....	601
Especificación de componentes para el diseño y validación de sistemas de control de tiempo real mediante Redes de Petri Autor: Apolinar González Potes Director: Alfons Crespo i Lorente Fecha de lectura: 18/10/99.....	615
Modelado y simulación de sistemas con muestreo No convencional Autor: Carlos Mario de Jesús Vélez Sánchez Director: Julián José Salt Llobregat Fecha de lectura: 18/06/01.....	629
Aprendizaje evolutivo de Reglas Fuzzy en un sistema clasificador modificado para control de agentes móviles Autor: Eric Vallejo Rodríguez Director: Ginés Benet Gilabert Fecha de lectura: 15/12/04.....	641

INGENIERÍA DE LA PROGRAMACIÓN E INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Desarrollo y gestión de componentes reutilizables en el marco de Oasis Autora: Raquel Anaya Hernández Director: Isidro Ramos Salavert Fecha de lectura: 15/12/99.....	655
Una metodología para el desarrollo de sistemas basados en el conocimiento de tiempo real: CommonKADS-RT Autora: Mónica Henao Cálad Director: Vicente Botti Navarro Fecha de lectura: 12/06/01.....	669
Algunos aportes a los modelos de lenguaje de máxima entropía de frase completa Autor: Fredy Ángel Amaya Robayo Director: José Miguel Benedí Ruiz Fecha de lectura: 18/07/01.....	679

Depuración declarativa de programas lógico funcionales Autor: Francisco José Correa Zabala Directora: María Alpuente Frasnado Fecha de lectura: 08/07/02.....	693
Gestión de Inconsistencias en la Evolución e Interoperación de los Esquemas Conceptuales OO, en el marco formal de OASIS Autor: Fernando Arango Isaza Director: Isidro Ramos Salavert Fecha de lectura: 21/02/03.....	711
Estimaciones de gramáticas incotextuales estocásticas y su aplicación en un modelo de lenguaje híbrido Autor: Diego Luis Linares Ospina Directores: José Miguel Benedí Ruiz; Joan Andreu Sánchez Peiró Fecha de lectura: 19/12/03.....	725
MATEMÁTICA APLICADA	
Construcción de aproximaciones precisas de soluciones de problemas diferenciales con cotas de error a priori Autor: Abel Enrique Posso Agudelo Director: Lucas Antonio Jódar Sánchez Fecha de lectura: 10/12/99.....	743
Construcción de soluciones numéricas estables de problemas de difusión fuertemente acoplados Autor: José Albeiro Sánchez Cano Director: Lucas Antonio Jódar Sánchez Fecha de lectura: 28/01/00.....	751
La modelización del espacio y del tiempo: Su estudio vía el Modelo de Van Hiele Autor: Andrés Felipe de la Torre Gómez Director: Pedro Pérez Carreras Fecha de lectura: 24/03/00.....	767
La noción de convergencia de una serie desde la óptica de los niveles de Van Hiele Autor: Carlos Mario Jaramillo López Director: Pedro Pérez Carreras Fecha de lectura: 31/03/00.....	777
Estudio Comparativo del concepto de Aproximación Local vía el Modelo de Van Hiele Autor: Pedro Vicente Esteban Duarte Director: José Luis Llorens Fuster Fecha de lectura: 05/04/00.....	787
Soluciones aproximadas con cotas de error prefijadas para ecuaciones diferenciales matriciales Autor: Jorge Iván Castaño Bedoya Director: Enrique Ponsoda Miralles Fecha de lectura: 06/07/00.....	801
Ideales de Operadores $(1, \sigma)$ – Absolutamente Continuos Autor: Gerardo Arango Ospina Directora: María José Rivera Ortún Fecha de lectura: 18/07/00.....	809

Una nueva formulación para el problema general de rutas en un grafo mixto (MGRP) Autor: Hermilson Velásquez Ceballos Directores: Ángel Corberán Salvador; José María Sanchis Llopis Fecha de lectura: 08/06/01	821
Ultraproductos de espacios de interpolación y normas tensoriales relacionadas Autora: María Eugenia Puerta Yepes Director: Juan Antonio López Molina Fecha de lectura: 22/06/01	831
Nuevas facetas para el problema general de rutas en un grafo mixto (MGRP) Autor: Gustavo A. Mejía Quirós Directores: Ángel Corberán Salvador; José María Sanchis Llopis Fecha de lectura: 06/07/01	843
Soluciones analítico-numéricas de sistemas singulares de ecuaciones en derivadas parciales Autor: Manuel José Salazar Jiménez Directores: Rafael Jacinto Villanueva Micó; Antonio Hervás Jorge Fecha de lectura: 25/09/01	851
Estudio del problema general de rutas con capacidades sobre Grafos mixtos. Autor: Julio Cesar Ángel Gutiérrez Directores: David Soler Fernández; Antonio Hervás Jorge Fecha de lectura: 02/10/01	869
Normas tensoriales y espacios de operadores que factorizan a través de Espacios de Orlicz Autor: Gabriel Ignacio Loaiza Ossa Directora: María José Rivera Ortún Fecha de lectura: 02/10/01	877
Soluciones numéricas con métodos multipaso variable de ecuaciones diferenciales con cotas de error a priori Autor: Orlando de Jesús García Jaimes Director: José Antonio Martín Alustiza Fecha de lectura: 10/12/01	887
La teoría local en el estudio de la tensor norma definida mediante un espacio de sucesiones y sus ideales de operadores asociados Autora: Patricia Gómez Palacio Directora: María José Rivera Ortún Fecha de lectura: 21/06/02	893
Normas tensoriales e Ideales de Operadores asociados a Espacios de Interpolación Real entre Espacios Perfectos de sucesiones Autor: Gustavo de Jesús Castañeda Ramírez Director: Juan Antonio López Molina Fecha de lectura: 21/06/02	903
Sobre Espacios de Ultradistribuciones Vectoriales de Hörmander-Beurling $B_{p,k}(X)$ Autor: Jairo Alberto Villegas Gutiérrez Director: Joaquín Motos Izquierdo Fecha de lectura: 09/06/03	915

NUEVOS MATERIALES Y SUS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN

Investigación de la influencia de los aleantes y de las microestructuras ferrito-perlítica, austenítica y martensítica de los aceros aceros endurecidos por nitruración en baño de sales y en plasma Autor: Rafael Bolívar Grimaldos Directores: Carlos Ferrer Jiménez; Vicente Amigó Borrás Fecha de lectura: 22/07/97	927
Investigación de los mecanismos de adherencia en la interface del material compuesto hormigón - fibra natural de fique y de la optimización de su comportamiento a la tenacidad en servicio Autor: Silvio Delvasto Arjona Directores: Carlos Ferrer Jiménez; Alfonso Cristóbal Cárcel González Fecha de lectura: 10/12/97	937
Optimización de un procedimiento de soldadura MIG para la aleación de Aluminio AA 6061-T6 a través del control del calor suministrado Autor: Jaime Elías Torres Salcedo Directora: María Dolores Salvador Moya Fecha de lectura: 06/03/01	953
Investigación de los mecanismos de desgaste en las cuchillas picadoras de caña de azúcar: Optimización de clases de materiales: Matrices de acero de bajo Carbono y acero aleado al Manganeso-tipo Hadfield y recubrimientos del tipo Fe-C-Cr y Fe-C-V/W Autor: Yesid Aguilar Castro Director: Carlos Ferrer Giménez Fecha de lectura: 26/11/04	963
TELECOMUNICACIONES (EAFIT Y UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA - MEDELLÍN)	
Un nuevo límite inferior para la sincronización de relojes en redes de área local con soporte a comunicaciones <i>multicast</i> Autor: Juan Guillermo Lalinde Pulido Director: Manuel Esteve Domingo Fecha de lectura: 06/10/00	977
Integración en Corba de mecanismos para el transporte y control de flujos multimedia Autor: Edwin Nelson Montoya Múnera Director: Manuel Esteve Domingo Fecha de lectura: 10/12/00	985
Contribución a la identificación de microcalcificaciones ductales y periductales en la mama, a partir de la simulación de la tomosíntesis digital Autor: David Stephen Fernández Mc Cann Director: José Manuel Mossi García Fecha de lectura: 04/07/02	999
Procesamiento de imágenes para hacer control de calidad en textiles Autor: Adalberto Gabriel Díaz Torres Director: Antonio Albiol Colomer Fecha de lectura: 28/02/03	1005

Análisis de capacidad en sistemas CDMA y WCDMA, usando herramientas de planificación basadas en GIS y Dinámica Poliédrica Autor: Andrés Navarro Cadavid Director: Narcís Cardona Marcet Fecha de lectura: 02/12/03	1023
Modelos para establecer el crecimiento de las Redes Ópticas de acceso Autora: Ana María Cárdenas Soto Director: Salvador Sales Maicas Fecha de lectura: 17/12/03	1033
ÍNDICE POR AUTOR	1049

MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS CON MUESTREO NO CONVENCIONAL

MODELING AND SIMULATION OF SYSTEMS WITH NON-CONVENTIONAL SAMPLING

AUTOR:

Carlos Mario Vélez Sánchez
cmvelez@sigma.eafit.edu.co
Departamento de Ciencias Básicas
Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

DIRECTOR:

Julián José Salt Llobregat
julian@isa.upv.es
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España

RESUMEN

En la tesis se implementa en MATLAB/SIMULINK una herramienta CACSD (el Multirate Control Toolbox) que simplifica y clarifica la simulación, el modelado y el diseño de los sistemas multifrecuencia. Para este fin se obtuvo inicialmente un modelo multifrecuencia que sintetiza en gran parte el estado actual de los sistemas multifrecuencia. El modelo presenta las características comunes de los métodos de modelado multifrecuencia (representación invariable en el tiempo, aplicación a sistemas SISO y MIMO, aplicación a sistemas con muestreo regular o irregular, número y períodos de muestreo arbitrarios de las entradas y salidas), además de una presentación compacta fácil de implementar en un algoritmo (incluyendo retardos) y la posibilidad de modelado del offset en entradas y salidas (útil para algunos casos especiales de muestreo, como se verá a lo largo del trabajo). Como ilustración, en el diseño se muestran las posibilidades de aplicación de reguladores convencionales a sistemas de control multifrecuencia, utilizando los grados de libertad adicionales que ofrece este tipo de muestreo no convencional y teniendo en cuenta que a un sistema multifrecuencia le puede corresponder una representación invariable en el tiempo a un período global, conservando las características del sistema original multifrecuencia. El diseño se integra en el Toolbox. Al principio se hace una descripción general del estado del arte del modelado y control de sistemas multifrecuencia. El trabajo se realizó bajo la asesoría del Doctor Julián Salt Llobregat y la colaboración del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Politécnica de Valencia.

ABSTRACT

In the dissertation we develop the Multi-rate Control Toolbox in MATLAB/SIMULINK, which simplifies the simulation, modeling and design of multi-rate control systems. For this purpose, a multi-rate modeling method was obtained initially, which synthesizes the state of art of multi-rate control systems modeling. The new model has the common characteristics of most multi-rate modeling methods (linear time-invariant representation, application to SISO and MIMO systems with regular or irregular sampling schemes); moreover, it has a compact representation that is easy to implement by means of a computer algorithm (including delays) and the possibility of inputs and outputs offset modeling (the inclusion of offsets is useful for some special cases of multi-rate sampling, such as will be looked at throughout the work). As an illustration of model advantages, in the design of multi-rate controllers we can see indicated the application possibilities of conventional single-rate control design to multi-rate control systems, using the degrees of freedom that allow this type of non-conventional

sampling and considering that a multi-rate system has a time-invariant representation, which maintains the characteristics of original multi-rate systems. The proposed design methods are integrated in the Multi-rate Control Toolbox. At the beginning of the work we can see the presentation of a general state-of-art description of multi-irate systems modeling and control. The work was developed under the advice of Doctor Julián Salt Llobregat, with the collaboration of Engineering Systems and Control Department (DISA) of the Polytechnic University of Valencia, Spain.

PALABRAS CLAVES: Modelado, simulación, multifrecuencia, control no-convencional.

KEYWORDS: Modeling, simulation, multirate, control, non-conventional control.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación y alcance de la tesis

En la literatura se encuentran varios tipos de modelado de sistemas multifrecuencia y diversos esquemas de control adecuados a éstos ([1]-[6]). Dicha variedad es injustificada, ya que se trata del mismo problema y todos los modelos son equivalentes, como lo han demostrado diferentes autores. Por ejemplo, Meyer [7] muestra que el modelado de Kranc [4] puede ser fácilmente extendido a sistemas MIMO y obtiene un método de modelado bastante general que es idéntico a otros que se agrupan bajo el término de la técnica del “lifting” (estirado), la cual a su vez proviene del área más general de los sistemas periódicos. La idea principal de la metodología (obtención de un sistema invariable en el tiempo con un vector estirado de entradas y salidas) coincide con las ideas originales de vectorización y reducción planteadas y descritas por otros autores ([8], [9]).

Además, aunque la mayoría de métodos mencionan la posibilidad de tratar el problema de muestreo irregular (o no uniforme), éste no ha sido abordado con la suficiente profundidad. El trabajo de Salt [10] abre un camino importante en el modelado de este tipo de sistemas y motiva, con las ideas que allí se exponen, a un estudio más profundo del tema. Por ejemplo, al análisis de la posibilidad de extensión a sistemas más generales y la explotación de la irregularidad para efectos del diseño y cumplimiento de especificaciones.

En este contexto, el presente trabajo realiza una serie de aportes relacionados con la sistematización del estudio y simulación de sistemas multifrecuencia a partir de un modelo único de propiedades importantes e interesantes (muestreo regular e irregular, fácil deducción de casos particulares encontrados en la literatura, posibilidad de offset en entradas y salidas) y con la aplicación a sistemas multifrecuencia de métodos convencionales de control para sistemas monofrecuencia, muy bien definidos y claros, pero con explotación de los grados de libertad adicionales que ofrecen los esquemas multifrecuencia. Para esto se buscan coincidencias en el planteamiento de los distintos diseños con el fin de proponer métodos más generales. Además, se desarrollan y aplican herramientas CACSD (Computer Aided Control Systems Design) y de simulación digital (en MATLAB/SIMULINK), que facilitan el proceso de diseño y estudio del comportamiento de varios métodos de control.

Por supuesto, quedan algunas preguntas por resolver y otras que no se resolvieron a total satisfacción, y que tras el desarrollo de este documento se expondrán. Éstas se plantean a modo de recomendación para futuras investigaciones.

1.2. Objetivo general

Sistematizar el modelado, simulación y diseño de sistemas de control multifrecuencia con metodologías claras y precisas, semejantes a la de sistemas convencionales, partiendo de un modelo que sintetice en gran parte el estado actual de los sistemas multifrecuencia.

1.3. Objetivos específicos

- Presentar el estado del arte del control multifrecuencia. Mostrar el desarrollo histórico del área de control multifrecuencia en aspectos de modelado y diseño, y hacer una clasificación adecuada de las diversas metodologías empleadas, con miras a la detección de concordancias en su evolución.
- Desarrollar un método de modelado de sistemas multifrecuencia que sintetice y generalice algunos de los métodos más conocidos en la literatura y permita el diseño de reguladores multifrecuencia siguiendo la idea de que a un sistema multifrecuencia le corresponde una representación invariable en el tiempo.
- Concluir las características y propiedades del método de modelado obtenido. Indicar las ventajas y desventajas del nuevo modelo. Mostrar que en efecto el modelo contiene métodos de modelado previos, por medio de la obtención de casos particulares.
- Desarrollar herramientas en MATLAB/SIMULINK para el cálculo y simulación de sistemas multifrecuencia, que permitan de manera sistemática y clara el estudio de las ideas y de los métodos de diseño propuestos, además de otros encontrados en la bibliografía.
- Sistematizar el diseño de reguladores multifrecuencia y analizar su aplicabilidad, propiedades, extensiones y características. Buscar ideas comunes en varios métodos y generalizar su utilización. Explotar los grados de libertad adicionales que ofrecen los esquemas multifrecuencia para efectos del diseño.
- Ilustrar con ejemplos las posibilidades de la herramienta desarrollada, mostrando aspectos relevantes en el modelado y diseño en algunos esquemas especiales de muestreo.

1.4. Contribuciones

La principal contribución es el desarrollo de una serie de herramientas en MATLAB/SIMULINK (Multirate Control Toolbox) que facilitan y simplifican el estudio de sistemas multifrecuencia. El Toolbox es interesante e imprescindible en el trabajo ya que permite: i) el cálculo y simulación híbrida de sistemas multifrecuencia de una manera muy intuitiva; ii) el estudio de fenómenos como el de las oscilaciones ocultas; iii) el análisis de los efectos del muestreo irregular y el offset en entradas y salidas; iv) la implementación de diversos esquemas de control; v) el cálculo interactivo de algunos métodos de control. El Toolbox se puede extender fácilmente a sistemas periódicos, como se mostrará.

La base de la caja de herramientas (toolbox) desarrolladas, es un método que permite el modelado de sistemas multifrecuencia con múltiples entradas y salidas (MIMO), aplicable a esquemas de muestreo irregular y con offset en entradas y salidas. Esta característica hace posible el modelado de sistemas con esquemas de muestreo más general, como el caso del muestreo en serie (un solo sensor o actuador aplicado secuencialmente a varias señales). El muestreo irregular aporta un grado más de libertad que es aprovechado, por ejemplo, para el cumplimiento de algunas condiciones de diseño (por ejemplo, el rango de algunas matrices).

En el diseño se presentan dos métodos generales de control multifrecuencia (asignación de polos y mapeo del modelo) que permiten la aplicación de los respectivos métodos convencionales. Los métodos han sido presentados de muchas maneras en la literatura sobre el tema. En el trabajo, el interés de estos métodos se concentra en la posibilidad de su integración con el Toolbox y la aplicación a cierto esquema de muestreo, interesante y poco común, al que se le llamó FOLI (ver Fig. 5), y el cual da una gran flexibilidad en la selección de la dimensión de todas las matrices del modelo multifrecuencia y mayor libertad en el diseño, además de ser útil en algunos sistemas de control distribuido donde hay un medio de comunicación compartido, de manera que no siempre está disponible la comunicación entre el regulador y la planta. El esquema FOLI es posible modelarlo con el método propuesto en esta tesis y, aunque posiblemente se puede hacer con otros métodos, no se encontró en la literatura estudiada. Los reguladores se probaron con diversos ejemplos, los cuales entregan resultados aceptables en algunos casos, aunque con la conservación de un problema muy

común en este tipo de sistemas: el rizado en la respuesta temporal. Los métodos se implementan en el Toolbox. La aplicación al caso de muestreo en serie merece especial interés.

Al final se presentan algunos ejemplos que aclaran muchos de los conceptos generales de los sistemas multifrecuencia y, en particular, de los estudiados a lo largo del documento.

2. ESTADO DEL ARTE

Un sistema multifrecuencia es un sistema digital en el cual dos o más variables son actualizadas a frecuencias distintas. Las variables pueden pertenecer a un mismo lazo de control (Fig. 1) o a diferentes lazos, como en el caso de sistemas multivariables (Fig. 2).

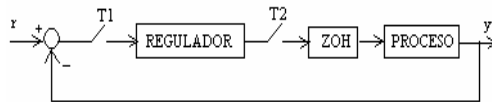


Figura 1. Sistema multifrecuencia SISO

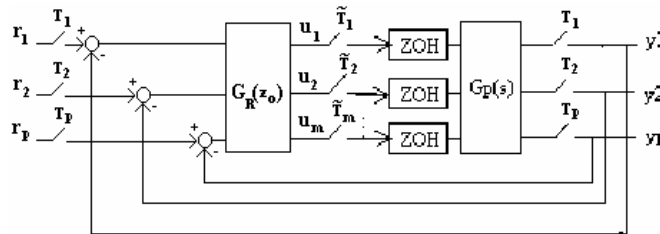


Figura 2. Sistema multifrecuencia MIMO

Los sistemas multifrecuencia son un caso especial de sistemas periódicos (el esquema de muestreo se repite cada período global, igual al mínimo común múltiplo de los períodos de muestreo de todas las señales del sistema) o variables en el tiempo, por lo que muchos conceptos e ideas de estos últimos son aplicables a aquellos. Por ejemplo, el método del “lifting” es concebido para los sistemas periódicos en general. El “lifting” es un método muy utilizado en el modelado de sistemas multifrecuencia y consiste básicamente en la obtención de un modelo monofrecuencia invariable en el tiempo equivalente del sistema multifrecuencia, pero con mayor número de entradas y salidas que el sistema original (vectores estirados). El proceso de “lifting” conserva las operaciones algebraicas en los sistemas, en las normas de señales (picos, potencia, sumas) y sistemas, en la estabilidad. Sin embargo, el diseño introduce la restricción de causalidad en el compensador.

El control multifrecuencia presenta ciertas propiedades que lo hacen interesante al momento de diseñar reguladores digitales de altas prestaciones que tengan en cuenta las distintas dinámicas de los elementos del sistema. Aunque es posible muestrear un sistema a la mayor frecuencia posible, esto puede traer problemas numéricos y de resolución. Además, como lo han demostrado varios autores, la introducción intencionada de esquemas multifrecuencia puede mejorar el comportamiento de un sistema, en comparación con la aplicación de esquemas monofrecuencia.

En este capítulo se hace una referencia de los aspectos históricos relacionados con el área del control multifrecuencia, mostrando los aspectos de modelado y diseño más relevantes para el trabajo actual.

Se clasifican las diversas metodologías empleadas, con miras a la detección de puntos de tangencia e ideas sobresalientes en su evolución. Se realiza una cuidadosa revisión bibliográfica, acudiendo a bases de datos disponibles (muchas de ellas a través de Internet). Se propone una clasificación de acuerdo a los temas tratados en las revistas y memorias de los eventos internacionales de control más importantes.

Al final, se especifican los métodos que sirven de base para la investigación actual: el método de operadores de Kranc y el método de Araki - Yamamoto. Estos métodos se deducen de una manera muy directa e intuitiva a partir de sustituciones progresivas y podrían ser extendidos al caso de esquemas de muestreo más generales, como el muestreo irregular de entradas y salidas. El análisis de los dos métodos aporta ideas importantes a la deducción de un modelo más general de muestreo multifrecuencia (como se presentará en el siguiente capítulo).

Como conclusión del capítulo, se observa que la mayoría de métodos de modelado actuales para los sistemas periódicos (entre ellos los sistemas multifrecuencia) utilizan representaciones en variables de estado, de tiempo discreto e invariables en el tiempo, con más entradas y salidas que el sistema original. Esta preferencia se debe a la posibilidad de aplicar métodos de control diseñados, estudiados y probados adecuadamente para sistemas monofrecuencia. Utilizando una terminología muy difundida en la literatura, se agrupará este tipo de métodos bajo el término de "lifting", que podría traducirse como "estirado". El sistema obtenido se denominará "lifted system" (sistema estirado). El término "estirado" hace referencia al estiramiento de entradas y salidas a la que se llega al convertir el modelo del sistema a un modelo de tiempo discreto invariable en el tiempo.

Se logró determinar que: i) el modelado irregular es poco explotado y analizado en la literatura; ii) faltan herramientas de cálculo y simulación de sistemas multifrecuencia que faciliten la comprensión y análisis de éstos; iii) existen muchos métodos de modelado (que podrían ser resumidos en uno solo); iv) muchos métodos de control parten de un modelado y análisis específico que podría obviarse de utilizar un método general; v) los problemas más preocupantes del control multifrecuencia son la restricción de causalidad y el rizado; vi) es recomendable dar respuestas sistemáticas a muchos de los problemas del área de los sistemas multifrecuencia.

3. MODELADO MULTIFRECUENCIA

En este capítulo se deduce un método de modelado de sistemas multifrecuencia a partir de sustituciones progresivas, y se discutieron algunas características del mismo. El método de modelado introducido presenta ciertas características interesantes tanto para el análisis como para la simulación. Entre ellas están: muestreo irregular, posibilidad de offset en entradas y salidas, aplicación a sistemas MIMO, representación invariable en el tiempo, fácil implementación en computador, deducción sencilla y directa de casos particulares de muestreo. El modelo utiliza el enfoque del "lifting" (en el sentido explicado con anterioridad), en el cual se enmarcan la mayoría de métodos de modelado de sistemas periódicos y multifrecuencia; la diferencia está en su presentación concreta y manejo claro de sus parámetros.

Se estudian igualmente las condiciones para la estabilidad y rango completo de las matrices del modelo multifrecuencia. Se destaca la posibilidad de garantizar el rango completo con un muestreo irregular. En un ejemplo se ilustra lo relacionado con este tema. Estos aspectos se utilizan más adelante en el diseño.

A partir del modelo se deducen varios casos particulares que confirman la validez del método. Entre los casos particulares se encuentran algunos que no están en la bibliografía, al menos en la forma planteada aquí (por ejemplo, los casos de muestreo en serie y el modelo MROC). Estos casos particulares simplifican el análisis y diseño en casos particulares debido a su representación simplificada. En el siguiente capítulo se diseñarán reguladores para algunos de estos casos particulares y otros esquemas de muestreo, pero buscando aspectos comunes que permitan diseños más generales. Es

interesante la aplicación que se hace para un tipo de muestreo no presentado antes en la bibliografía: el esquema FOLI (Fig. 5). Este esquema es fundamental para el capítulo de diseño y solamente puede ser modelado (hasta donde se conoce) con el modelo propuesto aquí.

De esta manera, se cuenta con un modelado con unas propiedades y características que se tratarán de explorar en el diseño de reguladores multifrecuencia, acompañado de unas adecuadas herramientas de cálculo.

Se considera en el presente trabajo un sistema multifrecuencia irregular de orden n con m entradas y p salidas, tal y como se muestra en la Fig. 3. En la Fig. 4 se ilustra un caso del muestreo irregular a estudiar, donde no hay sincronización de entradas y salidas en cada período global (se llamará offset a este desfase de las entradas y salidas).

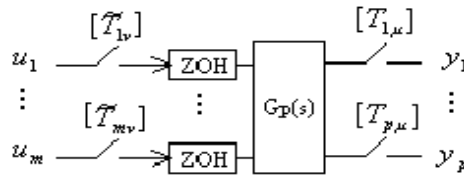


Figura 3. Sistema con muestreo irregular considerado en el trabajo

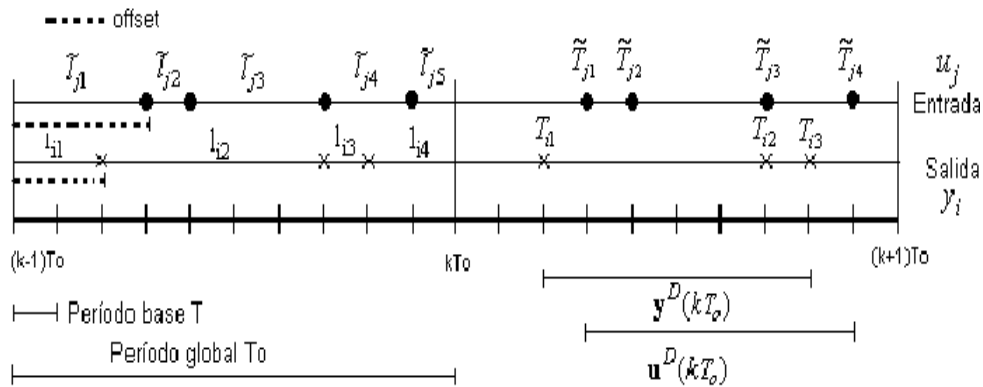


Figura 4. Esquema de muestreo irregular (con offset) considerado en el trabajo

En la Fig. 4, $[T_{i\mu}]$ y $[T_{jv}]$ representan esquemas o secuencias de muestreo, posiblemente irregular. La Fig. 5 es un ejemplo de la posibilidad de dicho muestreo. Se observa la irregularidad del muestreo y la presencia de offset de la entrada u_j y la salida y_i ($l_{j1} \neq 0, l_i \neq 0$). El offset es el lapso de tiempo entre el instante de muestreo global y la primera muestra de una señal y se refiere a la posibilidad de que las entradas y salidas puedan no estar sincronizadas cada período global. El esquema general se repite cada período global.

En el trabajo se obtiene y trabaja con una representación interna. No es posible, en general, obtener la función de transferencia de un sistema multifrecuencia ([11], [12]). Sólo es posible obtener la función de transferencia en el caso de un esquema de muestreo MRIC. La razón es simple: cuando sólo se expanden las entradas de la planta (esquema MRIC) es posible construir las señales de salida como el producto de un vector de entradas (correspondiente a una entrada estirada) por la matriz de funciones

de transferencia; la operación es completamente lineal. En el caso cuando se expanden las salidas (por ejemplo, en esquemas MROC), la salida no se puede reconstruir a partir de las salidas estiradas como una simple superposición de señales. La salida se puede obtener como la suma de sus diferentes componentes, pero no se pueden separar las entradas de las funciones de transferencia (ver [13], [14]).

El siguiente conjunto de ecuaciones sintetiza el modelo multifrecuencia que se utilizará para el análisis, simulación y diseño en los siguientes capítulos.

$$\begin{cases} \mathbf{x}^D((k+1)T_o) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{x}^D(kT_o) + \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u}^D(kT_o) \\ \mathbf{y}^D(kT_o) = \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{x}^D(kT_o) + \tilde{\mathbf{D}}\mathbf{u}^D(kT_o) \end{cases}$$

donde

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^D(kT_o) &= [\dots | u_j(kT_o + \tilde{T}_{j1}) \quad u_j(kT_o + \tilde{T}_{j2}) \quad \dots \quad u_j(kT_o + \tilde{T}_{j,\tilde{N}_j}) \quad | \dots]^T \\ \mathbf{y}^D(kT_o) &= [\dots | y_i(kT_o + T_{i1}) \quad y_i(kT_o + T_{i2}) \quad \dots \quad y_i(kT_o + T_{iN_i}) \quad | \dots]^T \\ \mathbf{x}^D(kT_o) &= [x_1(kT_o) \quad \dots \quad x_n(kT_o) \quad u_1((k-1)T_o + \tilde{T}_{1,\tilde{N}_1}) \quad \dots \quad u_m((k-1)T_o + \tilde{T}_{m,\tilde{N}_m})]^T \\ i &= 1, 2, 3, \dots, p \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned}$$

Las matrices, parámetros e índices se definen con mayor detalle en el documento final de la tesis.

4. DISEÑO DE REGULADORES MULTIFRECUENCIA

En este capítulo se deducen dos métodos generales de control multifrecuencia (mapeo del modelo y ubicación de polos) y se tratan aspectos de diseño y comportamiento. El método del mapeo corresponde a un diseño con dos grados de libertad, mientras el de ubicación de polos sólo considera un grado de libertad. En cada método se aplican y se analizan los problemas típicos del diseño multifrecuencia.

Para ambos diseños propuestos se parte de un esquema FOLI, del cual el esquema MRIC es un caso particular (la primera acción de control se hace igual a cero). El esquema FOLI se puede estudiar únicamente con el modelo propuesto, de acuerdo a lo que se pudo ver en la bibliografía registrada. Las principales ventajas de dicho esquema son: cumplimiento de la restricción de causalidad y simplificación de los cálculos (eliminación de términos y obtención de matrices de rango completo), utilizando las respectivas ventajas de los esquemas MRIC y MROC. En el lema 4.1 de la tesis se muestra claramente que la condición $\tilde{\mathbf{D}} = \mathbf{0}$, que simplifica los cálculos, se cumple sólo para los casos MRIC y FOLI.

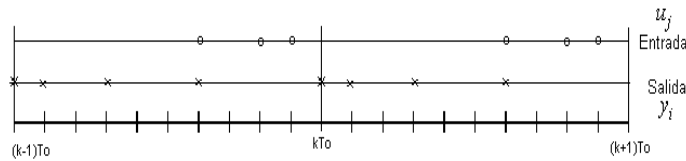


Figura 5. Esquema de muestreo FOLI (The Output First, the Inputs of Last) de la planta

Los diferentes resultados se aplican al caso de muestreo MRIC con el fin de comparar los resultados con información conocida y permitir el cálculo del control para un esquema de muestreo en serie de la acción de control. Se muestra como el esquema FOLI supera al método MRIC en aspectos como la ubicación de ceros en plantas de fase no mínima. No obstante, quedan abiertos aún muchos aspectos por investigar.

Aunque la principal aplicación del esquema FOLI y los métodos de control aquí expuestos es en el ámbito de los sistemas distribuidos con un medio de comunicación compartido, es importante resaltar la forma cómo se llevó un problema del ámbito multifrecuencia al monofrecuencia, por medio de una selección del esquema de muestreo. En este caso se considera (a diferencia de otros trabajos y de acuerdo a la propuesta de Araki [15]) que las frecuencias de acción y medida se pueden seleccionar de acuerdo a los objetivos de diseño. El problema se reduce entonces a uno, en el cual la técnica convencional de realimentación del estado es siempre aplicable. Los reguladores son, de esta manera, diseñados de manera directa. Los métodos se implementaron en MATLAB y se ilustran en el siguiente capítulo.

Los diferentes ejemplos muestran que, en general:

- El diseño es sencillo y directo.
- Se ubican bien los polos y ceros, aunque se puede presentar un rizado intermuestreo, el cual se puede eliminar en la respuesta estacionaria por medio de un integrador. En el trabajo se generaliza la idea del uso del integrador a un muestreo irregular.
- En algunas ocasiones el rizado se puede eliminar con un adecuado diseño que tenga en cuenta aspectos como la aplicación de métodos exactos y esfuerzo de control.
- La ubicación de ceros de fase no mínima es posible, ya que no hay cancelación directa de términos. En comparación con esquemas MRIC, éste es un gran paso adelante.
- Se cuenta con gran flexibilidad durante el diseño al poder seleccionar esquemas adecuados de muestreo irregular.

5. EJEMPLOS Y SIMULACIÓN

En este capítulo se describe una serie de herramientas para MATLAB y SIMULINK ([16], [17]), agrupadas con el nombre de Multirate Control Toolbox (MCT), que implementan el modelo obtenido en el trabajo y los diferentes métodos de diseño discutidos, permitiendo su cálculo y simulación de una manera sencilla e intuitiva. La herramienta es una propuesta entre otras posibles, pero que presenta algunas características que la hacen original y que están ligadas estrechamente con el método de modelado propuesto:

- Posibilidad de cálculo y simulación de sistemas con muestreo irregular arbitrario de sistemas SISO y MIMO.
- Posibilidad de offset de entradas y salidas.
- Bloques de simulación compactos que realizan internamente operaciones de vectorización, reducción y simplificación, dejándole la tarea de ingresar la información mínima necesaria.
- Diagramas de simulación semejantes a los correspondientes a sistemas monofrecuencia, con todas las ventajas intuitivas que esto conlleva.
- Posibilidad de análisis directo del comportamiento intermuestreo de las diferentes señales, ya que la simulación se hace de manera híbrida y desde el punto de vista de un observador externo. Es decir, las señales que corren por el sistema son señales “correctas” y no son señales “estiradas”.
- Extensión a la simulación de sistemas periódicos en los cuales se tienen distintos reguladores en diferentes intervalos de muestreo.

- Además de los ejemplos aquí propuestos, el MCT se probó y comparó con diferentes ejemplos encontrados en otros trabajos y, en especial, con problemas con operadores de Kranc. Por esta razón se introdujo en el Toolbox este popular operador.

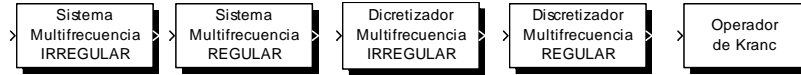


Figura 6. Bloques de simulación del MCT

Para MATLAB/SIMULINK no existen herramientas de simulación de sistemas multifrecuencia con el alcance planteado aquí: representación en variables de estado para sistemas SISO y MIMO, simulación híbrida (posibilidad de ver el efecto intermuestreo en la respuesta temporal de la planta), simulación multifrecuencia con reguladores continuos o discretos a máximo común divisor (sin necesidad de realizar el paso previo de discretización) y reguladores discretos multifrecuencia (calculados de manera directa por algún método de diseño), implementación de distintos esquemas de muestreo (regular o irregular, MRIC o MROC, en serie, etc.), implementación semejante a la de sistemas monofrecuencia (los operadores de vectorización y reducción se incluyen en cada bloque, de manera que estos procesos quedan ocultos al usuario).

Los diferentes ejemplos expuestos en el capítulo agrupan casos concretos de aplicación de los métodos discutidos con anterioridad. Se realizan diferentes pruebas y se consignan los casos más generales. Se podrían incluir otros ejemplos, pero se optó por poner los suficientemente necesarios.

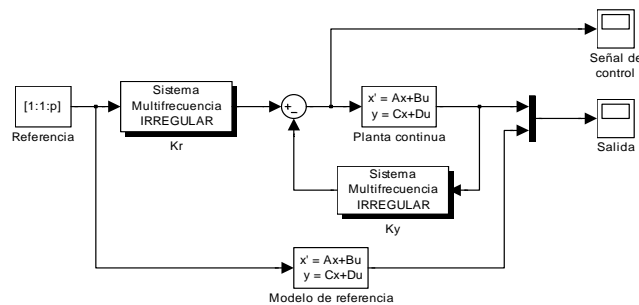


Figura 7. Diagrama de simulación de un sistema de control multifrecuencia por mapeo del modelo con realimentación de la salida

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se presentó de una manera resumida, pero bastante completa, el desarrollo histórico del área del control multifrecuencia en aspectos relacionados con el modelado, análisis, diseño y aplicación. Varios aspectos e ideas complementarias se discutieron dentro de las propuestas nuevas y los ejemplos, como es el caso del problema de rizado, la restricción de causalidad, los sistemas periódicos, la representación externa, algunos métodos particulares de diseño (Eckardt, Hagiwara, In, etc). Esta presentación se facilita con la utilización del Multirate Control Toolbox.

- A partir de bases de datos en Internet se hizo una pesquisa bibliográfica que permitió obtener la cita bibliográfica de 380 artículos de revistas y eventos internacionales de prestigio, desde 1955 hasta enero de 2001. De la mayoría de ellos se obtuvo un resumen y de 230 el texto completo. Esta base sirvió para hacer una clasificación y un breve análisis de las áreas y aplicaciones del control multifrecuencia.
- La característica distintiva del modelo propuesto, en relación a métodos previos, es la posibilidad de modelar sistemática y sistemáticamente problemas de plantas y reguladores con offset en las entradas (sobre todo) y en las salidas, con la posible extensión al muestreo en serie y luego al muestreo FOLI. Aunque originalmente se planteó el problema de obtener a partir del método de sustituciones progresivas un método de modelado de sistemas multifrecuencia que permita el caso de muestreo irregular y plantas MIMO propias ($\mathbf{D} = \mathbf{0}$), buscando una generalización del método de Araki - Yamamoto y características valiosas del modelo de Salt, al final se encontraron métodos equivalentes (Godbout et al, Albertos y el mismo Salt). A partir de la revisión bibliográfica se detectó el caso de esquemas de muestreo muy particulares, como el del muestreo en serie de entradas, que no podía ser abordado con los modelos anteriores.
- El muestreo irregular mejora el rango de las matrices de los sistemas multifrecuencia. Se analizó con detenimiento el problema del rango de las matrices de sistemas multifrecuencia, haciendo énfasis en la incidencia del muestreo irregular en estas características. Se mostró en un ejemplo que estas características sí se pueden mejorar con la adopción de esquemas irregulares de muestreo. Incluso se aplicó dichas ideas a un problema de diseño concreto, donde el esquema regular no aporta una solución, bajo condiciones similares de diseño.
- Se presentaron dos reguladores multifrecuencia (asignación de polos y mapeo del modelo) con la aplicación de un esquema de muestreo FOLI. A pesar de la similitud con otros métodos de la literatura, los métodos expuestos explotan el grado de libertad dado por la irregularidad del muestreo y permiten su aplicación en algunos casos especiales de control en sistemas distribuidos con un medio común de comunicación.
- El esquema FOLI es una de las posibilidades del método de modelado propuesto. Esta posibilidad se explota en el diseño, pues permite varias cosas: cumplir con la restricción de causalidad, simplificar los cálculos ($\mathbf{D} = \mathbf{0}$ en la planta y obtención de matrices cuadradas), dar mayor flexibilidad al muestreo (en el MRIC el muestreo de las salidas era fijo, a período global), lograr diseños semejantes al de realimentación del estado, pero con realimentación de la salida (pseudo - medición), ilustrar y explotar claramente el grado de libertad adicional en el control multifrecuencia.
- Se desarrolló una herramienta CACSD para MATLAB y SIMULINK (Multirate Control Toolbox) para el modelado, simulación y diseño de sistemas multifrecuencia, con base en los métodos de modelado y diseño propuestos. La metodología de implementación se discutió con cierto detalle y se comparó con ideas semejantes ya desarrolladas. A pesar de que no se hallaron herramientas semejantes a la presentada, se considera ésta como una posibilidad entre otras.

El trabajo desarrollado, como se decía, ha abierto varios interrogantes y posibilidades que se recomiendan a continuación como futuros trabajos de investigación.

- Diseño de reguladores dinámicos.
- Aunque se abrió la puerta para el estudio de las incidencias del muestreo irregular en el comportamiento y diseño, y se entró un poco en el tema, es importante formalizar y generalizar más los resultados.
- Es importante integrar otros métodos de control propuestos en la literatura, al esquema de muestreo propuesto (u otros de igual o mayor alcance). El modelo contiene como casos

particulares otros datos en la literatura, a partir de los cuales se diseñan reguladores multifrecuencia. ¿Se podrán muchos de estos unificar en una sola metodología?

- ¿Se podrá utilizar la no causalidad de un regulador multifrecuencia para efectos del diseño, en lugar de luchar con la restricción de causalidad? Si se utiliza la referencia en lugar de la medida futura, ¿no se tendrá las condiciones para un regulador predictivo?
- Eliminación del rizado en esquemas MRIC con las diferentes técnicas propuestas en el trabajo y su integración más sinérgica con los diversos métodos de control multifrecuencia.
- Aplicaciones reales de los métodos propuestos, en especial en sistemas distribuidos.
- Estudio de otros métodos de control, en especial el control robusto y el control predictivo, que utilicen expresiones e ideas semejantes a la del control multifrecuencia.

El área del control multifrecuencia es apasionante y se puede concebir como una “teoría general” del control en tiempo discreto. Dicha área no habría sido introducida en Colombia (e incluso Latinoamérica) sin el aporte y presencia invaluable de la Universidad Politécnica de Valencia en Colombia, y sin el entusiasmo y dedicación de profesores del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (ISA), como Julián Salt L. Este trabajo ([18]-[21]) es un ejemplo claro de intercambio cultural y científico, sobre ideas de cooperación internacional. En Colombia existen muchas personas que valoran el esfuerzo e interés de la UPV y que han empezado a formar grupos de investigación y comunidades alrededor de su trabajo de tesis doctoral, algunos de los cuales, como el de este trabajo que se culmina, es nuevo en nuestro medio.

REFERENCIAS

- [1] P. Albertos, *Block Multirate Input-Output Model for Sampled-Data Control Systems*, IEEE Transactions on Control, No. 9, Vol. 35, pp. 1085-1088, 1990.
- [2] D. Eckardt, *Design of finite response controllers by pole assignment in multirate sampled-data systems*, International Journal of Control, No. 4, Vol. 49, pp. 1185-1193, 1989.
- [3] T. Hagiwara., M. Araki., *Design of a stable feedback controller based on the multirate sampling of the plant output*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 33, pp. 812-819, 1988.
- [4] G. M. Kranc, *Input-output analysis of multirate feedback systems*, IRE Transactions on Automatic Control, PGAC-3, Vol 3, pp. 21-28, 1957.
- [5] S. Longhi., *Structural Properties of Multirate Sampled-Data Systems*, IEEE Transactions on Automatic Control, No. 3, Vol. 39, 1994.
- [6] R. A. Meyer, C. S. Burrus, *A unified analysis of multirate and periodically time-invariant digital filters*, IEEE Transactions on Circuits Systems, Vol. 22, pp. 162-168, 1975.
- [7] D. G. Meyer, *A new class of shift-varying operators, the shift-invariant equivalents and multirate digital systems*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 35, pp. 429-433, 1990.
- [8] C. Camiña, *Modelado y respuesta en frecuencia de los sistemas muestreados multifrecuencia*, Tesis Doctoral, DISA, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1999.
- [9] P. M. Thompson, *Gain and phase margin of multirate sampled-data feedback systems*, International Journal of Control, Vol. 44, pp. 833-846, 1986.
- [10] J. Salt, *Control de Procesos con Muestreo No-Convencional*, Tesis Doctoral, DISCA, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1992.
- [11] A. W. Truman, *An analysis of sub-rate control systems*, International Journal of Control, Vol. 63, pp. 365-392, 1996.
- [12] R. Aracil, A. Jiménez, V. Feliu., *Multirate sampling technique in digital control systems simulation*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, No. 5, Vol. 14, pp. 776-780, 1984.
- [13] L. F. Godbout, D. Jordan., I. S. Apostolakis, *Closed-loop model for general multirate digital control systems*, IEE Proceedings, Vol. 137, pp. 326-336, 1990.

- [14] M. Araki, K. Yamamoto, *Multivariable multirate sampled-data systems: state-space description, transfer characteristics, and Nyquist criterion*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 31, pp. 145-154, 1986.
- [15] M. Araki, *Recent development in digital control theory*, 12th IFAC World Congress, Vol. 9, pp. 951-960, 1993.
- [16] *Using MATLAB, Version 5, MathWorks Inc*, 1997.
- [17] *Using SIMULINK: Dynamic System Simulation Software*, User's Guide, Mathworks Inc, 1997.
- [18] C. M. Vélez, J. Salt, *Métodos, conceptos y perspectivas del diseño de controladores multifrecuencia*, VIII Congreso Latinoamericano de Control Automático, Viña del Mar, Vol. 2, pp. 541-546, 1998.
- [19] C. M. Vélez, J. Salt, *Simulation of multirate control systems in MATLAB/SIMULINK*, Second World Manufacturing Congress, pp. 84-90, 1999.
- [20] C. M. Vélez, J. Salt, *Simulation of irregular multirate systems*, 8th IFAC Symposium on Computer Aided Control System Design, 2000.
- [21] C. M. Vélez, J. Salt, *Modelación de sistemas multifrecuencia con muestreo irregular*, IX Congreso Latinoamericano de Control Automático, Cali, pp. 13-19, 2000.

CURRICULUM VITAE

Carlos Mario Vélez Sánchez

Nació en Medellín, Colombia. Recibió su grado de físico en la Universidad de Kichinev (Kichinev, ex URSS) en 1987 y su Master of Sciences en Física y Matemáticas en la misma Universidad (1989). Su título de Doctor en Ciencias Físicas lo obtuvo en 2001 en la Universidad Politécnica de Valencia (Valencia, España) en la Especialidad de Automática e Informática Industrial. Ha sido profesor de varias universidades de Medellín y desde 1999 es Profesor Asociado de la Universidad EAFIT (Medellín, Colombia), en el Departamento de Ciencias Básicas donde trabaja fundamentalmente en el programa de Ingeniería Matemática. Sus áreas de interés incluyen el control multifrecuencia, modelado y simulación de sistemas dinámicos, identificación de sistemas y sistemas de tiempo real. Fue Presidente de la Asociación Colombiana de Automática (ACA, 1999 - 2000) y Editor del medio de difusión Control-Automatico.NET durante cuatro años.

Julián Salt Llobregat

Nació en Valencia, España. Cursó la titulación de Ingeniero Industrial en la Universidad Politécnica de Valencia (Valencia, España) y el Doctorado en Ingeniería Industrial en la Especialidad de Automática e Informática Industrial, leyendo su Tesis Doctoral en 1992 en la misma universidad. Actualmente es Catedrático de Universidad en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Politécnica de Valencia. Sus áreas de interés incluyen el control multifrecuencia, y la simulación continua y discreta. Es autor de libros, numerosos artículos y responsable de proyectos de investigación nacionales e internacionales.

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES PARA HACER CONTROL DE CALIDAD EN TEXTILES

IMAGE PROCESSING TO ENSURE QUALITY CONTROL IN TEXTILES

AUTOR:

Adalberto Gabriel Díaz Torres
gdiaz@eafit.edu.co
Departamento de Producción
Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

DIRECTOR:

Antonio Albiol Colomer
aalbiol@dcom.upv.es
Departamento de Comunicaciones
Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España

RESUMEN

En el desarrollo de esta tesis, se presentan alternativas técnicas de un sistema para la inspección del entramado del tejido, con el fin de identificar en forma automática, los diferentes tipos de defectos textiles más usuales, proponiendo criterios para el desarrollo de algoritmos en aplicaciones de procesamiento de señales (imágenes) para su detección e identificación y así hacer Control de Calidad respecto al acabado de texturas superficiales de tejidos planos.

Se ha desarrollado un Sistema de Adquisición de Imágenes, resaltando y extrayendo las características de inspección más relevantes, con el fin de aumentar el contraste frente a una decisión de clasificación. En este caso se trata de pequeños levantamientos de superficies, debido al proceso de entrelazado de los hilos, por medio una algorítmica basada en imágenes de sombras, las cuales corresponden a superficies que han sido iluminadas oblicuamente con lámparas en el norte, en el sur, en el este y en el oeste. Estas imágenes producen información del levantamiento topológico manifestado en la proyección de las sombras que hacen los pequeños levantamientos de los hilos sobre la superficie, las cuales con operaciones de procesamiento básico, generan imágenes, en las cuales se aprecia la estructura del entramado del tejido, con un alto nivel de independencia de los acabados de tintorería.

Un proceso de reconocimiento de patrones, identifica las diferentes situaciones del recorrido de los hilos en el tejido, para lo cual se ha propuesto una operación de morfo-varianza. Generándose así una imagen, en la cual los píxeles brillantes, muestran la densidad y distribución de unas estructuras periódica de situaciones de los hilos reconocidas en el tejido, reflejándose la existencia de posibles fallos en el entramado del tejido.

La clasificación final se hace por un análisis de las características de distribución espacial y su reducción por medio de un análisis de distribución de frecuencias, por semejanza con el patrón del tejido, por medio de sistemas de clasificación con algoritmos de redes neuronales artificiales.

ABSTRACT

In the development of this thesis, technical alternatives of a system are presented for the inspection of the weaves of the fabric, with the purpose of automatically identifying, the most usual types of textile defects and proposing criteria for the development of algorithms in applications of signal processing (image) for their detection and identification and in this way to ensure Quality Control regarding the finish of superficial textures of textiles planes.

A System of Acquisition of Images has been developed, highlighting and extracting the most relevant inspection characteristics, with the purpose of increasing the contrast before a classification decision. In this case it is small surface protuberances, due to the process of having intertwined the threads, by means of an algorithm based on images of shades, which belong to surfaces that have been illuminated sideways with lamps in the north, in the south, in the east and in the west. These images produce information of the topologic protuberances manifested in the projection of the shades of the small protuberances of the threads on the surface, which with operations of basic prosecution, generate images, in which the structure of the lattice of the fabric is appreciated, with a high level of independence of the color.

A process of recognition of patterns identifies the different situations of the path of the threads in the weave, for which a morfo-variance operation has been nominated. Having thus generated an image, one in which the brilliant pixels show the density and distribution of a periodic structures of situations of the threads recognized in the fabric, we can show the existence of possible shortcomings in the lattice of the weave.

The final classification is made by an analysis of the characteristics of space distribution and its reduction by means of an analysis of frequency distribution, for likeness with the pattern of the weave, by means of classification systems with algorithms of neuronal networks.

1. INTRODUCCIÓN

Los conceptos de calidad [1], se resumen en aquel producto o servicio con propiedades y características capaces de satisfacer las necesidades expresadas o implícitas del cliente. En tal sentido, sobre definición de la calidad de un producto textil, se involucran aspectos tanto de diseño del tejido, como el mismo proceso de producción textil.

El Objetivo General de la tesis, consiste en proponer criterios para el desarrollo de algoritmos en aplicaciones de procesamiento de señales (imágenes) para la detección e identificación de fallos en el proceso de tejeduría. El desarrollo del proceso de inspección se ha realizado con el siguiente procedimiento:

1. Estableció un sistema de adquisición de imágenes, buscando que las características de inspección sean lo más relevante posibles, con el fin de aumentar el contraste frente de una decisión de clasificación.
2. Luego una etapa de pre-procesamiento, con el fin de aislar el ruido de la imagen y dejar la información que es relevante en el proceso de identificación.
3. Luego se ha desarrollado un proceso de obtención de la estructura real del tejido.
4. Finalmente se establece un proceso de análisis y clasificación de fallos a partir de las características identificadas en la imagen.

1.1. Estructura del Tejido Plano

Toda la superficie tejida, es cubierta por hilos que se cruzan definiendo situaciones del recorrido del hilo dentro de una estructura del patrón de tejido [2]. En tejidos planos se tienen dos tipos de hilos, conocidos como: hilos de trama aquellos que entrelazan el tejido, en dirección transversal a la longitud del tejido y los hilos de urdimbre a lo largo del tejido, según la ley de ligamento, densidad y disposición, para formar un entramado con ambos haces de hilos. En la Figura 1, se pueden ver algunos diseños de patrones de estructuras de tejidos donde se manifiestan posibles situaciones de los hilos que se entrelazan.

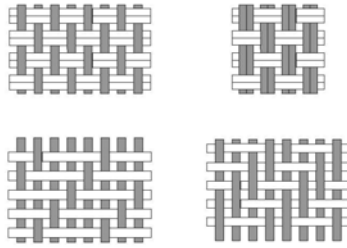


Figura 1. Estructuras de tejidos planos

Fallos textiles

El hecho que un tejido se presenta como una estructura periódica repetitiva, con características de un proceso estocástico, hace que el proceso de inspección busque un análisis de semejanza y variabilidad de características y distribución de estos patrones.

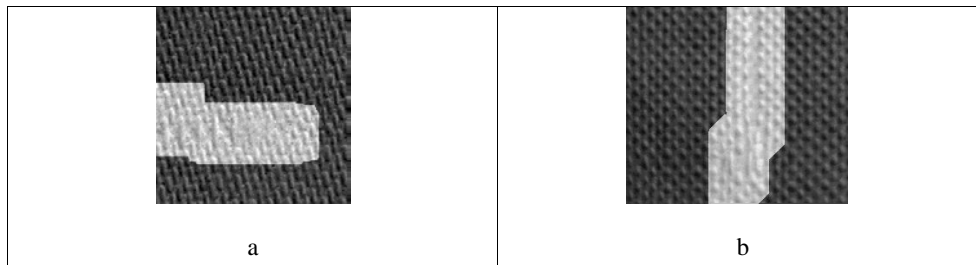


Figura 2. a) Trama rota, b) Urdimbre rota

2. ADQUISICIÓN Y PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Esta etapa, consiste en llevar a la memoria de un ordenador, la información visual que manifiesta una superficie (tejido) resaltando sus características. En este caso se trata de pequeños levantamientos de superficies, debido al proceso de entrelazado de los hilos, por medio una algorítmica basada en imágenes de sombras.

Los objetos que no presentan luz propia, son visibles gracias a la iluminación que se hace sobre ellos. En la Figura 3, se resume las diferentes zonas de brillo de una superficie, al ser iluminadas por una misma fuente de luz.

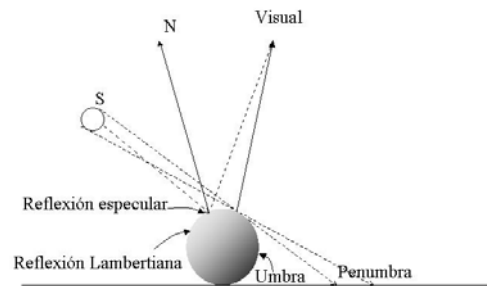


Figura 3. Zonas de iluminación de una superficie

Considerando que las superficies con un gradiente alto, en el cambio de nivel y acabado no metalizado, las zonas de reflexión especular se consideran despreciables. Si además la fuente de luz se encuentra muy distante de la superficie, las zonas de penumbra se pueden considerar también despreciables. Siendo solamente apreciables por el sistema de visión las zonas reflexión lambertianas y las zonas de Umbral.

De acuerdo al análisis del sistema de iluminación sobre una superficie, se puede apreciar que la proyección de la Umbral, está relacionada con la altura topográfica de la montaña que la produce respecto a la altura de la superficie que la recibe, como también el ángulo de altura de la fuente de luz.

La algorítmica del problema, está enfocada en conseguir información 3D, acerca del levantamiento de los hilos en un tejido plano, a partir de imágenes 2D iluminadas con fuentes de luz en dirección oblicua.

El principio se ha definido como “**Visión de relieve por el Principio de Sombras**”, el cual permite modelar en una imagen, muchas de las características topográficas de su superficie [3], aplicando algoritmos de procesamiento en imágenes, las cuales en su proceso de adquisición fueron iluminadas en dirección oblicua y donde los levantamientos del relieve se proyectan como sombras. El principio consiste en iluminar un hilo sobre una superficie, con lámparas en lados opuestos y en dirección oblicua al eje de la cámara [4]. La imagen de la Figura 4, muestra la distribución de las zonas de reflexión (lambertiana) [5] en las superficies del costado del hilo que dan de frente a la fuente de luz, y las zonas de sombras (Umbras) en las superficies profundas al lado opuesto de la fuente de luz, las cuales forman cuencas por el cambio en el levantamiento topográfico de los hilos.

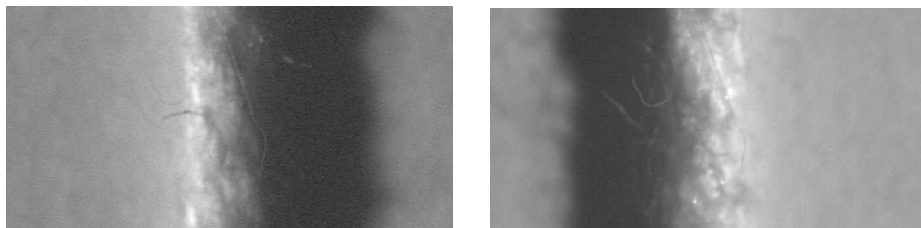


Figura 4. a) Iluminación izquierda; b) Iluminación derecha

En la Figura 5, se muestra gráficamente las relaciones geométricas del sistema de iluminación que la óptica de estas imágenes produce.

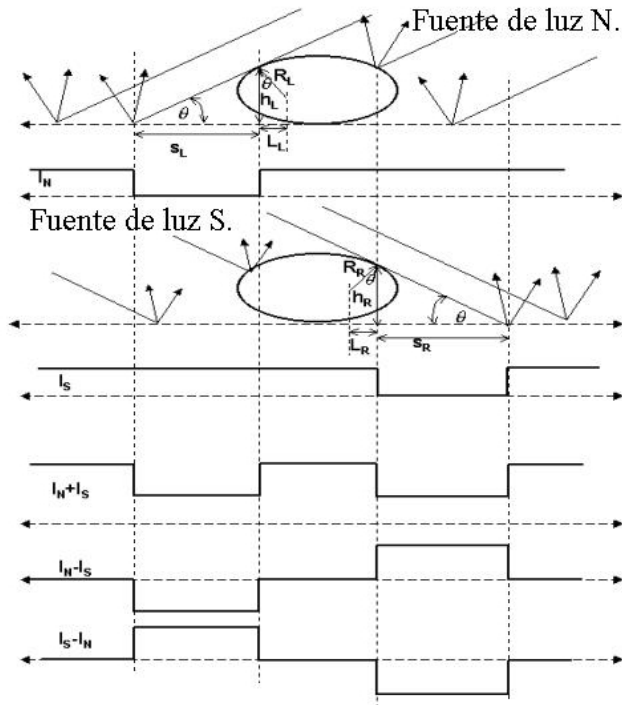


Figura 5. Geometría de sombras en tejidos

Se observa que al operar con las imágenes de sombras, se obtienen diferentes resultados geométricos, que relacionan y dimensionan el hilo independizando en alto nivel la componente del color.

La suma de las dos imágenes con sombras, se ilustra en Figura 5, con el perfil suma.

$$I_N + I_S. \quad (0-1)$$

Considerando que genéricamente los hilos en su corte transversal no son siempre redondos, sino más bien obedecen a un corte elíptico, se pueden apreciar en la Figura 6 (a) la suma de las imágenes de la Figura 4. Aquí se observa unas zonas de sombras laterales proyectadas desde los puntos de tangencia entre los respectivos rayos de luz y la superficie del hilo que están relacionadas con la altura del hilo, y la zona brillante (lambertiana), visible entre las dos zonas de sombras y cuyo ancho da una idea del calibre del hilo.

La resta de las imágenes, como se muestra en la Figura 6 (b), donde se puede apreciar que las sombras del término positivo se convierten en zonas de brillo, mientras que las sombras del término negativo toman un valor de nivel negativo, pero se corrigen sumando un valor medio de la imagen. En este caso, se puede apreciar que en el sitio donde existe un hilo, se presenta una zona con pendiente en los niveles de grises orientadas en el sentido de la resta.

En esta imagen hay información de características de simetría, tanto del hilo como las alturas de las regiones laterales del hilo, las cuales por ahora no son muy relevantes; como también hay información del levantamiento del hilo manifestado en el ancho de la proyección de la sombra. El análisis de esta imagen de sombras permite adquirir información sobre el levantamiento de los hilos.

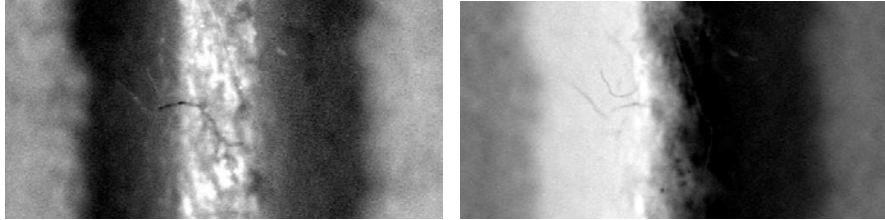


Figura 6. a) Imagen suma; b) Imagen resta

2.1. Imagen estructural del tejido

Aplicando la técnica de sombras al proceso de inspección del entramado del tejido, se logra extraer la estructura real del tejido. Dado que las características de los tejidos planos se extienden a lo largo de la dirección del recorrido de los hilos y las sombras son perpendiculares entre trama y urdimbre, el proceso se desarrolla a partir de la captura de 4 imágenes aproximadamente simultáneas sobre la misma área del tejido, como se muestran en la Figura 7.

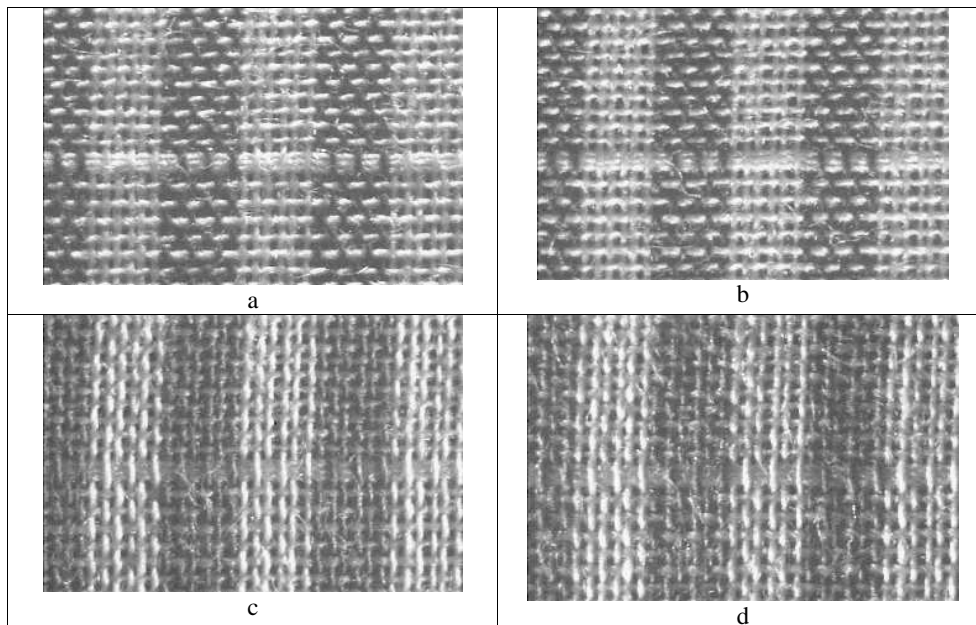


Figura 7. Tejido con iluminación: a) Norte, b) Sur, c) Este, d) Oeste

Al restar las imágenes S-N, como se aprecia en la Figura 8 (a), se tiene la distribución de los hilos de trama, y en la Figura 8 (b) los hilos de urdimbre, eliminándose en un alto nivel el efecto de la componente de color:

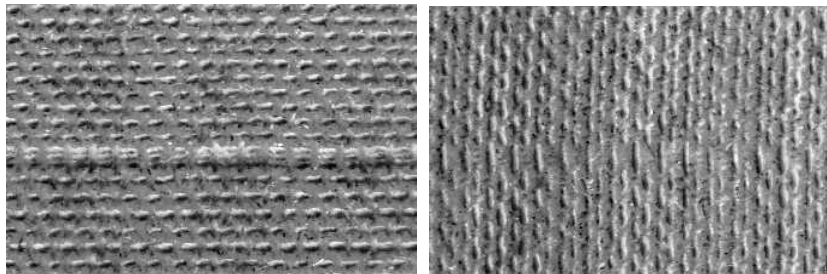


Figura 8. a) Imagen resta S-N; b) Imagen resta O-E

La suma de las imágenes anteriores, permite obtener una imagen compuesta, como se muestra en la Figura 9, haciéndose visible la estructura del tejido en una textura regularmente distribuida, separando en un alto nivel la componente de acabado y pudiendo observarse el arreglo del patrón del tejido, como también la existencia de posibles fallos debidos al proceso de tejido.

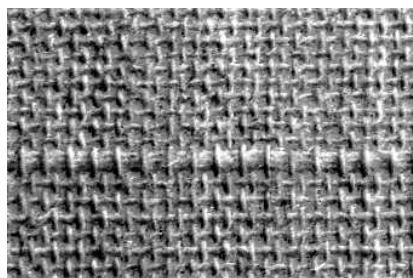


Figura 9. Imagen estructural

3. OBTENCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL TEJIDO

Ahora se busca identificar las diferentes situaciones del recorrido de los hilos en el tejido, por medio de un proceso de reconocimiento de patrones, para lo cual se ha desarrollado una operación de morfovarianza. Generándose así una imagen, en la cual los píxeles brillantes, muestran la distribución de las situaciones de los hilos reconocidas en el tejido. Reflejándose la existencia de posibles fallos de tejido, en la densidad y distribución de estas situaciones.

La imagen estructural del tejido, presenta una distribución de la textura relacionada con el entramado del tejido. En un tejido plano se puede apreciar que hay una distribución regular vertical y horizontal de un patrón de tejido, obedeciendo al diseño del tejido [6]. En forma más detallada se aprecian las diferentes situaciones del recorrido de los hilos (trama y urdimbre), manifestadas morfológicamente en un patrón definido con características de forma, en la distribución de niveles de grises.

3.1. Algoritmo de morfo - varianza

Para el reconocimiento de las diferentes situaciones de los hilos en una imagen de estructural, se utiliza operadores morfológicos no planos [7], los cuales deben operar sobre características morfológicas definidas en niveles de gris, donde una situación en la estructura del tejido es un área que corresponde a la definición de un patrón, conservando características de variabilidad y semejanza, debido a que los hilos y el proceso en sí, presentan características de no ser estrictamente uniformes. De ahí que el proceso de reconocimiento de estas situaciones, deba ser tolerable en cierto grado a la variabilidad de las situaciones que se presenten, dentro de la región de clasificación.

La regla de clasificación, se apoya en el elemento clasificador (Kernel) para realizar la operación de morfo-varianza. El algoritmo de morfo-varianza, se aplica al considerar que un grupo de estos puntos de características, se asocia a un patrón reconocido, para lo cual se establece un método que permita definir la región en el hiper-espacio n-dimensional que encierra la superficie de clasificación. Este se apoya entonces, en la hipótesis de valoración de similitud o dispersión de dos poblaciones de píxeles correspondientes, entre el kernel y la porción respectiva de la imagen. La similitud se hace por resta entre píxeles correspondientes, en cada posición del kernel, tal que cada píxel tendrá un valor resta.

$$Pixel_{x,y} = Pixel(I_{x,y}) - Pixel(K_{x,y}). \quad (0-1)$$

La población de píxeles resta, indican el grado de similitud entre el kernel y la imagen en esta zona correspondiente. Al ser idénticos, la tendencia de los píxeles resta es a cero, la cual se medirá calculado la varianza de este conjunto.

$$S^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n Pixel_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n Pixel_i \right)^2}{n(n-1)} \quad (0-2)$$

El valor de varianza S^2 , se asigna a un píxel de información morfológica en una nueva imagen de varianzas.

Experimentalmente se observa que al recorrer la imagen estructural de la Figura 9, explorando con esta operación, se tiene una imagen de morfo varianzas, como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Exploración de Reconocimiento con Morfo Varianza

El mejor punto en cada aproximación corresponderá exactamente al píxel más alto, el cual es visto como un píxel máximo regional.

El problema inicial es tener un kernel que mejor corresponda a un patrón, para lo que se utiliza técnicas de sintonía del mejor del kernel patrón a partir de una población de patrones, por medio de algoritmos genéticos [8].

La aplicación de este algoritmo se hace al reconocimiento de las situaciones de los hilos en cualquiera de las imágenes estructurales del tejido, que pueda tener una representación del estado de distribución del patrón de entrelazado, según las diferentes situaciones de los hilos del tejido.

Experimentalmente, el reconocimiento de la situación trama y urdimbre sobre un trozo de tejido como en la Figura 9, se observan en la Figura 11, respectivamente, justificando que este método tiene validez como alternativa de reconocimiento de patrones.

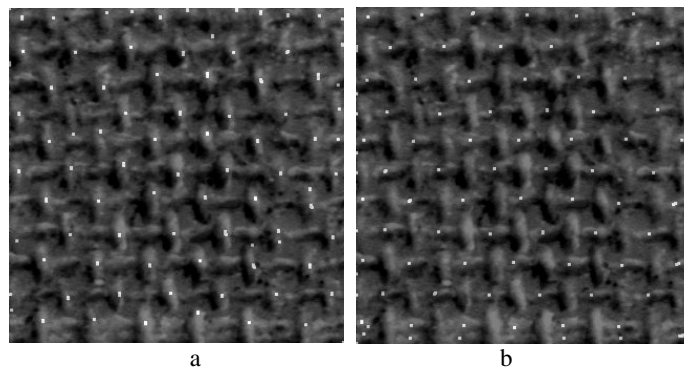


Figura 11. Situaciones Reconocidas: a) en urdimbre, b) en trama

4. BÚSQUEDA Y ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS PERIÓDICAS

Un tejido es una estructura periódica uniforme, generada por la composición de arreglos perpendiculares de hilos entrelazados en dirección de su recorrido, los cuales corresponden a la estructura del patrón de un tejido, según la ley de ligamento. En el caso de tejidos planos, esta estructura se repite en la dirección de la trama como de la urdimbre, donde la distribución de estas situaciones se considera: como una distribución uniforme en las regiones donde el tejido presenta características de estar en buen estado, y como una distribución aleatoria en las regiones donde presenta características de existencia de un fallo.

El método consiste en estudiar la disposición espacial de los píxeles de una región de la tela y sobre la base de la distribución de frecuencias de distribución de las situaciones, las cuales están referidas a la oportunidad y espacio de presentación de la situación. Esta distribución espacial cuenta con la ventaja de posibilidad de ajuste, infiriendo el grado de tolerancia de separación y divergencia de las situaciones.

El proceso de calificación de la textura de un tejido, se hace con la observación de la repetitividad fiel de este patrón a lo largo y ancho del tejido. Considerando en un tejido la periodicidad de su estructura [9] (patrón de tejido). Aquí el concepto de inspección tiene validez bajo dos alternativas técnicas:

- Análisis espacial, como el reconocimiento periódico de la distribución espacial de los componentes del patrón y la distribución espacial del patrón.
- Análisis frecuencial, como un reconocimiento de características de periodicidad a partir del espectro de frecuencias que lo componen.

En la Figura 12 se muestra un ejemplo de tipos de fallos referidos y relacionados con la estructura del tejido: a) Imagen del tejido con fallo de trama rota; b) Imagen de situaciones reconocidas de los hilos en un sector bueno de la imagen para análisis espacial; c) Imagen del espectro de fourier en la zona buena para análisis frecuencial; d) Imagen de situaciones reconocidas de los hilos en un sector con fallo de la imagen para análisis espacial; e) Imagen del espectro de fourier en la zona con fallo para análisis frecuencial.

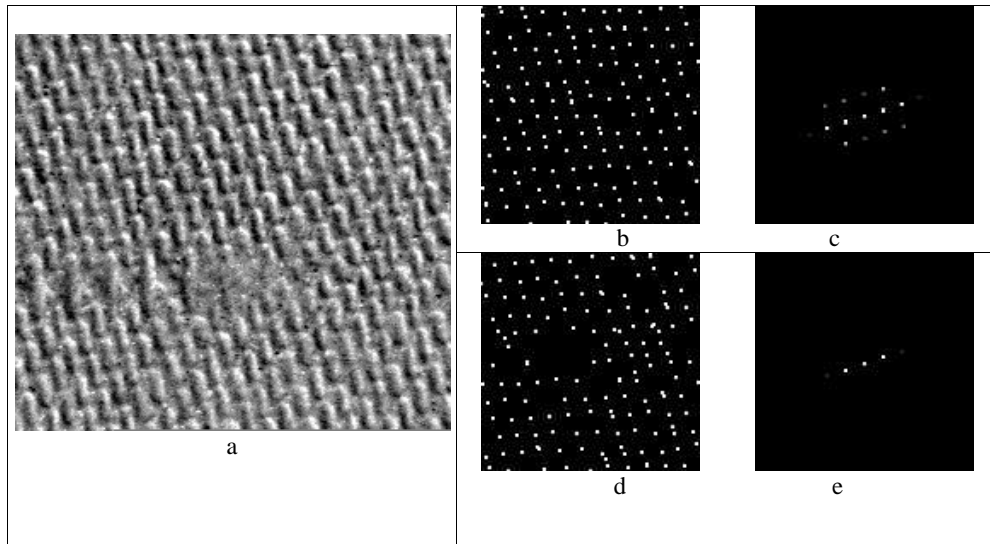


Figura 12. Trama Rota

4.1. Análisis espacial

En estructuras periódicas, la textura tiene influencia visual, relacionada con la distribución espacial del patrón repetitivo, de tal forma que su homogeneidad, variabilidad, periodicidad, intensidad, ausencia o modificación de estos patrones, dan una sensación de armonía, agrado y por consiguiente se puede determinar una calificación de calidad por medio de una visual de textura. El proceso de identificación de los tipos de fallos de la textura en un tejido, consiste en evaluar los aspectos que están relacionados con los cambios espaciales en su estructura, expresados como consecuencias de apretamiento o estiramiento del tejido, existencia o ausencia de situaciones de los hilos, o secuenciamiento de entrelazado de ellos; obteniendo así los parámetros de clasificación de los fallos del tejido, como se muestra en la Figura 13, donde cada una de las situaciones de los hilos es codificada de acuerdo a su participación en el diseño del tejido.

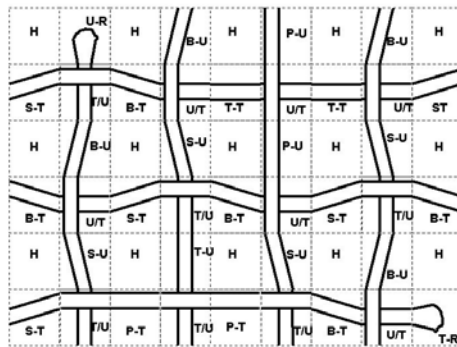


Figura 13. Distribución de Situaciones de hilos en el Patrón del tejido

La propuesta de análisis espacial, consiste en explorar la imagen de situaciones reconocidas de los hilos, haciendo un reconocimiento de patrones, referenciado a un patrón clasificador generado por un trozo de tejido ideal, el cual dispone una distribución de puntos coordenados por cada una de las situaciones del tejido, de acuerdo a su diseño estructural, superponiendo en su recorrido el patrón clasificador a la imagen de las situaciones reales reconocidas en un tejido, realizando operaciones de reconocimiento de este patrón y clasificación de eventuales fallos.

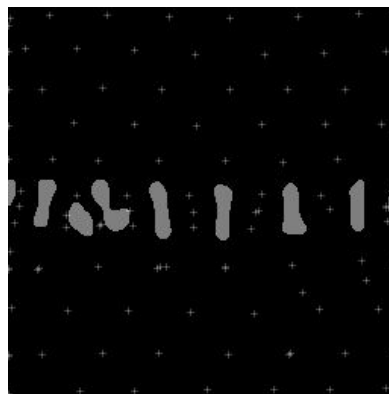


Figura 14. Reconocimiento espacial de patrones correspondientes a un fallo cordón

4.2. Análisis frecuencial

Una manera más simplificada de analizar datos en un modelo de distribución de píxeles en el contexto de la totalidad de una imagen, examinando características de periodicidad de una distribución de frecuencias bidimensionales, dentro del área de estudio, observando cómo varía la intensidad del proceso manifestado en los coeficientes frecuenciales, consiguiéndose una reducción del espacio de características de la imagen; es por medio de la transformada rápida de Fourier, FFT.

El análisis de la información resultante de Fourier sobre las imágenes de situaciones reconocidas, sus coeficientes y frecuencias, permiten determinar genéricamente aspectos de textura en el tejido, donde se relaciona aspectos, tales como densidad del tejido, uniformidad, dirección de los hilos, repetición de patrones, dirección de las franjas patronales, etc.

Cada punto del espectro de fourier está definido por su magnitud, fase y componentes de frecuencias (F_x , F_y , Magnitud, Fase). El análisis de cada uno de estos coeficientes, permite determinar las características de periodicidad del tejido.

El problema se reduce ahora a la situación de determinar la clasificación del vector de coeficientes de Fourier, donde los k elementos definen el espacio k -dimensional de la región de clasificación. De otra forma se trata de definir las fronteras de clasificación de esta región, tal que los coeficientes se puedan asociar a vecindades de las respectivas clases, que definan los estados de calidad.

Siendo que un tejido es una estructura periódica con generación de características patronales de forma estocástica, un procedimiento muy adecuado para analizar y evaluar el grado de la semejanza entre elementos estructurales, se hace por medio de técnicas de reconocimiento de los patrones ([10], [11]), las cuales permiten clasificar las estructuras de representación del patrón, reconocidas dentro de unas regiones de clasificación, pertenecientes a una zona del espacio de prototipos de patrones P . Los patrones de una misma clase, tienden a agruparse en regiones más pequeñas del espacio de patrones, lo que permite asociar regiones disjuntas en P , a cada una de las clases existentes, las cuales serán separadas por una superficies de decisión, haciendo posible la ayuda a la clasificación de nuevas observaciones. Otra forma de expresarlo, es considerando que el problema de clasificación se presenta como la búsqueda de superficies fronterizas entre regiones de decisión [12].

5. CONCLUSIONES

El desarrollo de esta tesis ha permitido incursionar en un gran abanico de temáticas, las cuales se han depurado y estructurado para que sean elementos funcionales dentro del gran sistema de inspección, en aspectos de calidad por medio de algoritmos de visión, procesamiento digital de imágenes, algoritmos de redes neuronales. Estos aspectos se resumen por objetivos más específicos en las siguientes conclusiones:

5.1. Visión de pequeños levantamientos en la superficie

La observación de información de pequeños levantamientos en superficies de mayor extensión, es complicada bajo métodos tradicionales de visión estéreo, debido a las desproporciones de dimensiones del sistema óptico y las dimensiones del levantamiento de las superficies. Además que lleva una complicación en el tratamiento de imágenes, debido a las componentes de acabados y colorimetría de los tejidos.

Con el **principio de sombras**, se ha extraído cierta información no relevante; relacionada con la geometría del objeto de relieve; independizando la información de la imagen relacionada con el color y acabados de su superficie.

5.2. Reconocimiento de patrones con operaciones de morfología

Se ha desarrollado una algorítmica de reconocimiento de patrones, definidos en forma genérica, sobre los niveles de gris en porciones de la imagen, por medio de operaciones de morfo-varianza, ayudados con un kernel (patrón clasificador), el cual ha sido optimizado por medio de algoritmos genéticos, para poder cubrir una gran gama de situaciones en niveles de gris reconocidas.

5.3. Clasificación de estructuras repetitivas con redes neuronales

Por la naturaleza de este tipo de estructuras, que no se acomodan fácilmente dentro de un análisis prescriptivo, se ha logrado obtener y extraer características y parámetros de clasificación de estas estructuras, dentro de un análisis frecuencial y/o espacial, las cuales permiten calificar y clasificar fallos, dentro de una interpretación de estructuras repetitivas. El proceso de clasificación se realiza por medio de algoritmos de redes neuronales artificiales, las cuales después de un proceso de

entrenamiento adecuado, permiten la clasificación de estas estructuras en forma satisfactoria. Lográndose de esta forma identificar un fallo en el proceso de tejido.

5.4. Análisis frecuencial vs. Análisis espacial

Se ha podido apreciar que el análisis frecuencial reúne características de periodicidad en toda la imagen, lo cual hace que este tipo de proceso sea más rápido, pero a su vez es más genérico, sobre la extensión del tamaño de la imagen.

En cambio, el análisis espacial es más exploratorio, lo cual se hace con un proceso de barrido de toda la imagen. Esto hace que el proceso sea más lento, pero a su vez se caracteriza por ser más puntual, determinando con mayor precisión el tipo de fallo.

5.5. Aportes

A través del desarrollo de este trabajo, se han hecho propuestas con nuevos métodos en las áreas de visión, de procesamiento de imágenes, reconocimiento de patrones; que se han convertido en aportes a la ciencia, para fortalecer el campo de investigación científica y apoyo a nuevos desarrollos tecnológicos de este campo. Estas propuestas son las siguientes:

5.5.1. Principio de sombras

Es una propuesta de adquisición de imágenes, que permite la observación de características de pequeños levantamientos topológicos de superficies, al procesar varias imágenes 2D, obtenidas sobre la misma superficie, las cuales han sido iluminadas con fuentes de luz desde un mismo ángulo de elevación y con diferentes ángulos distribución horizontal.

5.5.2. Morfo-varianza

Esta propuesta, presenta un método para el reconocimiento de patrones amorfos orientados en el mismo sentido del prototipo patrón y definidos sobre niveles de grises, con operaciones de morfología durante un proceso de barrido de la imagen, validando la identidad de la superficie de gris por medio del calculo de la varianza de la semejanza de cada uno de los píxeles, de un prototipo de una imagen de tejido, con un kernel patrón.

5.5.3. Utilización de algoritmos genéticos en la optimización de kernels en la operación de morfo-varianza

Se presenta el desarrollado de un método de optimización de kernels patrón más representativos, por medio de algoritmos genéticos, de tal forma que el mejor tenga mayor identidad con el universo de patrones a reconocer en imagen de muestras, para el proceso de reconocimiento de situaciones de hilos, por medio de operaciones de morfo-varianza.

5.5.4. Reconocimiento y clasificación de estructuras periódicas mediante redes neuronales

Dada la situación de que en el análisis de estructuras repetitivas en una imagen de tejido, no es fácil clasificar las estructuras por medio de métodos prescriptivos, se propone un método de clasificación de patrones de estas estructuras, extrayendo los vectores de características que definen el patrón y luego realizando esta clasificación por medio de clasificadores con algoritmos de redes neuronales.

REFERENCIAS

- [1] J.M. Juran, F.M. Gryna; *Análisis y planeación de la calidad*, (3a ed.), Mc. Graw Hill; pag. 437; 1995.
- [2] Konik, H.; Laget, B. Redortier, B.; Calonnier, M.; *Automatic vision system for an objective cotation of textile surfaces*; proc. SPIE, Machine Vision Applications in Industrial Inspection IV, Vol. 2665, 1996.
- [3] Fazekas Z.; Komuves J.; Renyi I.; Surjan L. *Automatic Visual Assessment of Fabrick Quality*; ISIE'99 – Bled, Slovenia.
- [4] Abril, Héctor C.; M.S. Millán; Torres, Yesid; *Objective automatic assessment of pilling in fabrics by image analysis*; Opt. Eng. 39(6) pp. 1477-1488, June 2000.
- [5] M. Oren and S. Nayar; *Generalization of the Lambertian Model and Implications for Machine Vision*, The International Journal of Computer Vision, Vol. 14:3.
- [6] Escofet J., Millán M.S., Rallo M.; *Specification and identification of woven patterns based on Fourier techniques*; SPIE, Vol. 4419, pag 62; 2001.
- [7] Dougherty, Edward R.; *Mathematical Morphology in image Processing*; Rochester Institute of Technology, N.Y. pp. 446-481. 1992.
- [8] Golberg D.; *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*; Reading, Mass. Addison Wesley Pub. 1989: 2-25.
- [9] Hepplewhite, L.; Stonhan, T.J.; *Texture Clasifcation Using N-Tuple Pattern Recognition*; Proceedings of ICPR'96; 1996.
- [10] Stojnovic R., Mitropulos P., Koulamas S., Koubias S., Papadopoulos G., Karayanis G.; *Automated detection and neural classification of local defects in textile Web*; Image Processing and its Applications, Conference Publication NO 465, IEE 1999.
- [11] Mitropulos P., Koulamas C., Stojnovic R., Koubias S., Papadopoulos G., Karayanis G.; *Real-Time Vision for Defect Detection and neural classification of web Textile Fabric*; IS &T/SPIE Conference on Machine Vision Applications in Industrial Inspection VII; San Jose de California; SPIE Vol. 3652; 1999.
- [12] Cortijo F.J. *Reconocimiento de Patrones y Análisis de Imágenes*; <http://decsai.ugr.es/~cb>.

BIBLIOGRAFÍA

1. J.M. Juran, F.M. Gryna; *Análisis y planeación de la calidad*, (3a ed.), Mc. Graw Hill; pag. 437; 1995.
2. Chetverikov, Dmitry; *Structural Defects: General Approach and Application to Textile Inspection*; Proc. 15th ICPR, Barcelona 2000.
3. Chetverikov, Dmitry; *Texture Analysis Using Feature Based Pairwise Interaction Maps*; Pattern Recognition, Special Issue on Color and Texture; <http://visual.ipan.sztaki.hu/fbimweb/fbimweb.html>, 1998.
4. Chetverikov, Dmitry; *Pattern Regularity as a Visual Key*; In Proc. *British Machine Vision Conf.*, pp. 23-32, 1998.
5. Escofet, J, Millán, M.S., Rallo, M.; *Specification and identification of woven patterns based on Fourier techniques*; SPIE, Vol. 4419, p. 62; 2001.
6. Abril, Héctor C.; M.S. Millán; Torres, Yesid; *Objective automatic assessment of pilling in fabrics by image analysis*; Opt. Eng. 39(6), pp. 1477-1488, June 2000.
7. J. Escofet, R. Navarro, M.S. Millán; *Detection of local defects in textile webs using Gabor filtros*; Opt. Eng. 37(8), pp. 2297-2397, August 1998.
8. Rallo, Miquel; M.S. Millán; Escofet, J.; *Wavelet based techniques for textile inspection*; Laboratori de Processat d'Imatges, UPC; Terrassa(Barcelona), Spain; <http://www.imub.up.es/wavelets/Rallo.pdf>.

9. Jasper and Garnier, *Texture Analysis and Woven Defect Detection Using Wavelets*; Mechatronics '96, The 5th UK Mechatronics Forum International Conference, Guimaraes, Portugal, Sept 18-20, 1996.
10. Jasper, Garnier, Potlapalli, *Texture Characterization and Defect Detection Using Adaptive Wavelets*; Optical Engineering, Vol. 35 No. 11, pp. 3140-3149, November 1996.
11. Chan, C.; Pang, G.; *Fabric defect detection by Fourier analysis*; IEEE transactions on Industry Applications, Vol. 36, No 05, September/October, p.1267, 2000.
12. Tae Jin Kang, Chang Hoon Kim and Kyung Hwa Oh, *Automatic Recognition of the Fabric Weave Pattern by Digital Image Analysis*; Textile Research Journal, 69(2), pp.77-83, 1999.
13. Tae Jin Kang, Soo Hyun Choi, and Sung Min Kim; *Automatic Structure Analysis and Objective Evaluation of Woven Fabric Using Image Analysis*; Textile Research Journal., 71(3), 2001
14. Hu M.C.; Tsai I.S.; *Fabric Inspection Based on best Wavelet Packet Bases*, Textile Research Journal, 70(8), pp. 662-670, 2000.
15. Galceran, E. Vicente; *Tecnología del tejido*; Tarrasa; 1960.
16. McIntyre, J.E., and Daniels, P.N. (eds); *Textile Terms and Definitions*; The Textile Institute 10th Ed 1995.
17. Miller, Edward; *Textiles; B. T Batsford Book*; London, 1992.
18. Konik, H.; Laget, B. Redortier, B.; Calonnier, M.; *Automatic vision system for an objective cotation of textile surfaces*; proc. SPIE, Machine Vision Applications in Industrial Inspection IV, Vol. 2665, 1996.
19. S. Özdemir, A. Baykut, R. Meylani, A. Erçil and A. Ertüzün, *Comparative Evaluation of Texture Analysis Algorithms for Defect Inspection of Textile Products*; Proceedings ICPR 98 (International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition), Aug. 14-17, Brisbane, Australia, pp. 1738-1740, 1998.
20. Baykut, R. Meylani, S. Ozdemir, A. Erçil and A. Ertüzün; *A Study on the Texture Analysis Algorithms in the Context of Defect Detection of Textile Products*; Proceedings SIU 97 (5th National Signal Processing and Applications Conference), Kuşadası, Turkey, pp.557-563, (in Turkish), May 1-3, 1997.
21. ICONTEC; *Telas Definición de defectos*; Norma Colombiana, No 1046; 1976.
22. Huart, j; Postaire, J.-G.; *Integration of computer vision on to weavers for quality control in the textile industry*; SPIE Vol. 21183/155; 1994.
23. Hung, D., Whang, C., Cheng, H. *A New Model for Representing and Retrieving Structural Patterns*; in *5th International Conference on Intelligent Systems Proceeding*, pp.98-101.; Cheng, H. (1995). *Don't Forget Traditional Media*, American Society of Training and Development (ASTD) Newsletter, Winter 1995.
24. Bahners, T. Ringens, W., Schollmeyer, E.; *On-Line Inspection of Textile Geometries*; SPIE, Vol. 2088; 1997.
25. Darrell R. Hougen, Narendra Ahuja; *Shape from Appearance: A Statistical Approach to Surface Shape Estimation*; pp. 127-136, ECCV (1) 1996.
26. Adelson, E. H., Pentland, A. P., and Kuo, J.; *The Extraction of Shading and Reflectance*. Association for Research in Vision and Ophthalmology; Spring, Inv. Opth. and Vis. Sci. (supp), 30, p. 262, 1989.
27. Oren, Michael; Nayar, Shree K.; *A theory of Specular Surface Geometry*; The Proceedings of the Fifth Int. Conf. on Computer Vision (ICCV 95), Boston, June 1995.
28. Jiang, Caxia; Ward, Matthew O; *Shadow Segmentation and Classification in a Constrained Environment*; CVGIP: Image Understanding; Vol. 59, No 2, March, pp. 213-225; 1994.
29. Fazekas, Z.; Komuves, J.; Renyi, I.; Surjan, L. *Automatic Visual Assessment of Fabrick Quality*; ISIE'99 – Bled, Slovenia.
30. M. Oren and S. Nayar; *Generalization of the Lambertian Model and Implications for Machine Vision*, The International Journal of Computer Vision, Vol. 14:3
31. Cortijo, F.J. *Reconocimiento de Patrones y Análisis de Imágenes*; <http://decsai.ugr.es/~cb>.

32. Millán, M.S.; Escofet, J.; Abril, Héctor C.; Navarro, R.; *Automatic quality control of textile webs by image processing*; SPIE; Vol. 3572; 1999.
33. Amet A. L., Ertuzun A., Ercil A.; *Subband Domain Co-occurrence Matrices for Texture Defect Detection* ; submitted to Image and Vision Computing Journal, 1998.
34. Chetverikov, Dmitry, *Pattern Orientation and Texture Symmetry*; Computer Analysis of Images and Patterns; p.p. 222-229; Springer lecture notes in Computer Science Vol. 970; 1995.
35. Chetverikov, Dmitry; Gede, Krisztián; *Textures and structural defects*; Computer Analysis of Images and Patterns, volume Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1296, pp. 167-174. Springer Verlag, 1997.
36. Chetverikov, Dmitry; *Structural Filtering with texture Feature Based Iteration Maps: Fast Algorithm and Applications*; Proc. 13th ICPR, Vienna, Vol. 11, pp. 795-799, 1996.
37. Jain, Anil K.; Duin R.P.W.; Kasturi, R.; *Statistical Pattern Recognition: A Review*; .IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No 1, January, 2000.
38. Sohn, So Young; *Meta Analysis of Classification algorithms for Pattern Recognition*; IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 21, No 11, nov. 1999.
39. Birkan Aras, Aybın Ertüzün ve Aytül Erçil, *Defect Detection in Textile Images using Higher order Statistics*; Submitted to ICIP 98 (IEEE International Conference on Image Processing), Chicago, Sept. 1998.
40. M. Bishop.; *Neural Networks for Pattern Recognition*; Clarendon Press-Oxford, 1995.
41. Tekstil ürünlerinin yapay sinir ağı ile yüzey kalite kontrolü; *Surface Quality Control of Textile Products Using Neural Networks*; Proceedings of IEEE SIU'98, V. 2, pp. 560-565, May 1998.
42. Baykut A., Atalay A., Ercil A., Guler M., *Real Time Defect Inspection of Textured Surfaces*, accepted for publication in Real Time Imaging Journal, 1998.
43. Jitendra Malik, Serge Belongie, Thomas Leung and Jianbo Shi, *Contour and Texture Analysis for Image Segmentation In Perceptual Organization for Artificial Vision Systems*; K.L. Boyer and S. Sarkar, editors. Kluwer Academic Publishers, 2000.
44. M. Mirmehdi, R. Marik, M. Petrou, and J. Kittler. *Iterative Morphology for Fault Detection in Stochastic Textures*. IEE Electronic Letters, 32(5): 443-444, February 1996.
45. Karayiannis Y.A.; Stojanovic R.; Mitropoulos P.; Koulamas,C.; Stouraitis,T.; Koubias,S.; Papadopoulos,G; *Defect detection and classification on web textile fabric using multiresolution decomposition and neural networks* ;ICECS'99. Proceedings of ICES'99. 6th IEEE International conference on electronics, Circuits and Systems, 1999.
46. R. O. Duda, P. E. Hart and D. G. Stork, *Pattern Classification*; (2nd ed.), John Wiley and Sons, 2001.
47. Godbole S., Amin A., *Mathematical Morphology for Edge and Overlap Detection for Medical Images*, Real-Time Imaging, 1(3), pp. 191-204, 1995.
48. Chetverikov, Dmitry; *Pattern Regularity as a Visual Key*; Proc. British Machine Vision Conference BMVC'98, Southampton. UK; 1998.
49. Pico, F.I.; Asensi, S.C.; Carcia-Chamizo, J.M.; *Feature extraction with an associative neural network and its application in industrial quality control*; Engineering Applications of Bio-Inspired Artificial Neural Networks. International Work-Conference on Artificial and Natural Neural Networks, IWANN, 99. Proceedings, Vol. 2 (Lecture Notes in Computer Science Vol. 1607) p. xxiii+907, 460-6.; 1999.
50. M. Mirmehdi, R. Marik, J. Kittler, and M. Petrou.; *Structural Defect Detection in Random Macro Textures*; *In Proceedings of Signal Processing VIII, Theories and Applications*, Volume III, pp. 1499-1502, September 1996.
51. Serra, Jean; *Image Analysis and Mathematical Morphology*; V.1, Academic Pres, 1982.
52. Serra, Jean; *Image Analysis and Mathematical Morphology*; V.2 Theoretical Advances, Academic Pres, pp. 141-157, 1988.
53. Dougherty, Edward R.; *Mathematical Morphology in image Processing*; Rochester Institute of Technology, N.Y., pp. 446-481, 1992.

54. Golberg D.; *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*; Reading, Mass. Addison Wesley Pub.: 2-25, 1989.
55. Hepplewhite, L.; Stonhan, T.J.; *Texture Classification Using N-Tuple Pattern Recognition*; Proceedings of ICPR'96; 1996.
56. Anselin, Luc. *Local Indicators of Spatial Association--LISA*. Geographical Analysis 27: pp. 93-115, 1995.
57. Stojnovic R.; Mitropulos P.; Koulamas S.; Koubias S.; Papadopoulos G.; Karayanis G.; *Automated detection and neural classification of local defects in textile Web*; Image Processing and its Applications, Conference Publication N0 465, IEE, 1999.
58. Mitropulos P.; Koulamas C.; Stojnovic R.; Koubias S.; Papadopoulos G.; Karayanis G.; *Real-Time Vision for Defect Detection and neural classification of web Textile Fabric*; IS &T/SPIE Conference on Machine Vision Applications in Industrial Inspection VII; San José de California; SPIE Vol. 3652; 1999.
59. A. A. Vedenov, M. V. Zurin, E. B. Levchenko, G. D. Myl'nikov, A. N. Timashev, A. Yu. Turygin: *Optical Image Preprocessing for Neural Network Classifier Systems*. PPSN 1990: pp. 284-291.
60. Haykin, Simon. *Neural Networks*; 2 ed; Prentice Hall, N.J.; 1999.
61. Nikhil R. Pal; Gautam K. Mandal; Eluri Vijaya Kumar; *Comments on A fuzzy Neural Network and its Application to Pattern Recognition*; IEEE Transactions on Fuzzy Systems; Vol. 7, N0 4, August 1999.
62. Duda R. y Hart P., *Pattern Classification and Scene Analysis*; John Wiley & Sons, 1973.
63. Shaw, Leonard, (editor in chief);. *Neural Networks Theoretical Foundations and analysis*; IEEE Neural Networks Council, N.Y, 1991.
64. Simon, Juan M.; Echarri, Rodolfo M.; *Recognition of similar shapes*; SPIE Vol. 4419; 2001.
65. J. Malik, S. Belongie, J. Shi, and T. Leung; Textons, *Contours and Regions: Cue Combination in Image Segmentation*; International Conference on Computer Vision, September 1999.
66. Zalesny, V. Ferrari, G. Caenen, D. Auf der Maur, L. Van Gool; *Composite Texture Descriptions*; Lecture Notes on Computer Science - 2352, Proceedings of the European Conference on Computer Vision, A. Heyden, ed., Vol. 3, pp. 180-194, May 2002, Springer Verlag.

PUBLICACIONES RELACIONADAS CON EL TEMA

A través del desarrollo de la tesis, se han realizado las siguientes publicaciones:

1. Díaz; Adalberto G. *Vision 3-D with Images 2D, by Mediate the Analysis of Shades for the Illumination Angle with the Surface*; proc. SPIE, Vol. 4419-242, 2001.
2. Díaz; Adalberto G. *Extracción de Características de Entramados de hilos para la Clasificación de patrones de fallos de textura en tejidos planos*; Congreso internacional en Inteligencia Computacional, Universidad Nacional de Colombia, Agosto de 2001.
3. Díaz, Adalberto Gabriel; *Inspección de Calidad por medio de Procesamiento de Imágenes*, Congreso de Ingeniería de Producción, Universidad EAFIT; Octubre 2001.

CURRICULUM VITAE

Adalberto Gabriel Díaz Torres

Fecha de nacimiento: 09 Octubre de 1955.

Títulos Académicos:

- Universidad Pontificia Bolivariana, Ingeniería Electrónica, Noviembre de 1982.
- Universidad de BOCHUM (Alemania), Especializado en Automatización y Control Numérico. Duración 20 meses, Diciembre de 1987.
- Doctor en Telecomunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia (España) 2003.

Publicaciones:

- Díaz, Adalberto G; "*Control de Procesos*"; Universidad EAFIT, 1990.
- Díaz, Adalberto G; "*Cámaras de medición*"; Revista Universidad EAFIT, No 80 de Oct., Nov. y Dic. de 1990.
- Díaz, Adalberto G; "*Visión y Procesamiento de Imágenes para Control de Calidad*"; Revista Universidad EAFIT, No 103 de Julio, Agosto, Septiembre 1996.
- Díaz, Adalberto G; "*Vision 3-D with Images 2D, by Mediate the Analysis of Shades for the Illumination Angle with the Surface*"; proc. SPIE, Vol. 4419-242, 2001.
- Díaz, Adalberto G; "*Extracción de características de entramados de hilos para la clasificación de patrones de fallos de texturas en tejidos planos*"; Congreso internacional en Inteligencia Computacional, Universidad Nacional de Colombia, Agosto de 2001.
- Díaz, Adalberto Gabriel; "*Inspección de Calidad por medio de Procesamiento de Imágenes*", Congreso de Ingeniería de Producción, Universidad EAFIT; Octubre 2001.
- Díaz, Adalberto G; "*Visión 3-d de rugosidades en superficies, bajo el principio de imágenes de sombras, en aplicación textil*", Revista Universidad EAFIT, No 130, 2003.

Antonio Albiol Colomer

Fecha de nacimiento: 16 julio de 1963.

Títulos Académicos:

- Ingeniero de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 1987.
- Dr. Ing. Telecomunicación, Universidad Politécnica de Valencia, 1993.

Docencia:

- Titular Escuela Universitaria en la UPV: 1989-1995.
- Titular de Universidad en la UPV: 1995-1999.
- Catedrático de Universidad en la UPV: 1999-actualidad.

Asignaturas impartidas: Señales y Sistemas, Sistemas de Telecomunicación, Tratamiento Digital de la Señal, Aplicaciones del Tratamiento Digital de la Señal, Lab. de Trat. Digital de la Señal, Análisis de Circuitos.

Número de Proyectos Fin de Carrera dirigidos: 40.

Investigación:

- Número de Tesis Doctorales Dirigidas: 7.
- Número de Artículos en revistas internacionales: 11.
- Número de Artículos en Congresos Internacionales: 29.
- Dirección de proyectos de investigación: 6.

ÍNDICE – POR AUTOR

Aguilar Castro, Yesid	963
Alvis Guzmán, Nelson Rafael	513
Amar Sepúlveda, Paola Andrea	255
Amaya Robayo, Fredy Ángel	679
Anaya Hernández, Raquel	655
Ángel Gutiérrez, Julio Cesar.....	869
Arango Isaza, Fernando	711
Arango Ospina, Gerardo	809
Arango Serna, Martín Darío	307
Ayala Aponte, Alfredo Adolfo	159
Baena Marulanda, Ernesto.....	413
Bermúdez Quintana, Elba María	547
Bolívar Grimaldos, Rafael.....	927
Cano Hernández, Carlos Arturo	319
Cárdenas Guevara, Daniel Humberto	459
Cárdenas Soto, Ana María	1033
Castañeda Ramírez, Gustavo de Jesús.....	903
Castaño Bedoya, Jorge Iván	801
Castrillón Gómez, Omar Danilo	11
Chicaíza Becerra, Liliana Alejandra.....	501
Correa Zabala, Francisco José	693
Cortés Rodríguez, Misael	213
De la Torre Gómez, Andrés Felipe.....	767
Delvasto Arjona, Silvio	937
Díaz Torres, Adalberto Gabriel	1005
Dueñas Ruiz, Domingo Ernesto	445
Esteban Duarte, Pedro Vicente	787
Estupiñán Paipa, Alirio	371
Fernández Juan, Amelia.....	485
Fernández Mc Cann, David Stephen	999
Florez Pardo, Luz Marina	183
García Baños, Ángel	601
García Jaimes, Orlando de Jesús	887
Giraldo Giraldo, Germán Antonio	197
Gómez Palacio, Patricia.....	893
Gómez Vélez, Hilda María	475
González Ariza, Ángel León	383
González Mariño, Gloria Eugenia	99
González Potes, Apolinar	615
Gutiérrez López, Luis Gonzaga.....	21

Henao Cálad, Mónica	669
Jaramillo Botero, Andrés	571
Jaramillo López, Carlos Mario	777
Lalinde Pulido, Juan Guillermo	977
Linares Ospina, Diego Luis	725
Loaiza Ossa, Gabriel Ignacio	877
López de Murillo, Aura	269
Luna Amaya, Carmenza	427
Medina Rivas, Miguel Ángel	51
Mejía Gallón, Amanda Inés	87
Mejía Quirós, Gustavo A.	843
Mena Marmolejo, Alicia	35
Moncaleano Rodríguez, Gloria Ilse	359
Montoya Múnera, Edwin Nelson	985
Mora Gutiérrez, Luis Alberto	243
Naranjo Pérez, Freddy	589
Navarro Cadavid, Andrés	1023
Niño Osorio, Jaime	61
Niño Vera, Jorge E.	283
Pérez Castaño, Bernardo Javier	333
Pérez Urrego, Martha Lucía	349
Pinzón Fandiño, Magda Ivonne	127
Posso Agudelo, Abel Enrique	743
Puerta Yepes, María Eugenia	831
Ríos Hurtado, Alicia	75
Rodríguez Barona, Sneyder	169
Ruiz Anzola, Eduardo	397
Salamanca Grosso, Guillermo	143
Salazar Jiménez, Manuel José	851
Sánchez Cano, José Albeiro	751
Sotelo Díaz, Luz Indira	113
Tischer, Irene	293
Toro Giménez, Walter	537
Torres Salcedo, Jaime Elías	953
Vallejo Rodríguez, Eric	641
Velásquez Ceballos, Hermilson	821
Vélez Sánchez, Carlos Mario de Jesús	629
Villegas Gutiérrez, Jairo Alberto	915
Villegas López, Gustavo Adolfo	229