

# ACTAS

DE LAS

## XXXVIII Jornadas de Automática

Gijón · Palacio de Congresos · 6, 7 y 8 de Septiembre de 2017



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*



**CEA**  
Comité Español  
de Automática

Colabora

**Gijón**

Convention Bureau



Actas de

**XXXVIII**

**Jornadas de Automática**

© 2017 Universidad de Oviedo  
© Los autores

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo  
Campus de Humanidades. Edificio de Servicios. 33011 Oviedo (Asturias)  
Tel. 985 10 95 03 Fax 985 10 95 07  
[http: www.uniovi.es/publicaciones](http://www.uniovi.es/publicaciones)  
[servipub@uniovi.es](mailto:servipub@uniovi.es)

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

Todos los derechos reservados. De conformidad con lo dispuesto en la legislación vigente, podrán ser castigados con penas de multa y privación de libertad quienes reproduzcan o plagien, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, fijada en cualquier tipo y soporte, sin la preceptiva autorización.

## Prefacio

Las *Jornadas de Automática* se celebran desde hace **40 años** en una universidad nacional facilitando el encuentro entre expertos en esta área en un foro que permite la puesta en común de las nuevas ideas y proyectos en desarrollo. Al mismo tiempo, propician la siempre necesaria colaboración entre investigadores del ámbito de la Ingeniería de Control y Automática, así como de campos afines, a la hora de abordar complejos proyectos de investigación multidisciplinares.

En esta ocasión, las Jornadas estarán organizadas por la Universidad de Oviedo y se han celebrado del 6 al 8 de septiembre de 2017 en el Palacio de Congresos de Gijón, colaborando tanto la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (EPI) como el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica de Computadores y de Sistemas del que depende el Área de Ingeniería de Sistemas y Automática.

Además de las habituales actividades científicas y culturales, esta edición es muy especial al celebrarse el **50 aniversario de la creación de CEA**, Comité Español de Automática. Igualmente este año se conmemora el 60 aniversario de la Federación Internacional del Control Automático de la que depende CEA. Así se ha llevado a cabo la presentación del libro que se ha realizado bajo la coordinación de D. Sebastián Dormido, sobre la historia de la Automática en España en una sesión en la que han participado todos los ex-presidentes de CEA conjuntamente con el actual, D. Joseba Quevedo.

Igualmente hemos contado con la presencia de conferenciantes de prestigio para las sesiones plenarias, comunicaciones y ponencias orales en las reuniones de los 9 grupos temáticos, contribuciones en formato póster. Se ha celebrado también el concurso de CEABOT, así como una nueva Competición de Drones, con el ánimo de involucrar a más estudiantes de últimos cursos de Grado/Máster.

En el marco de las actividades culturales programadas se ha podido efectuar un recorrido en el casco antiguo situado en torno al Cerro de Santa Catalina y visitar la Laboral.

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López  
Presidente del Comité Organizador



## Program Committee

Antonio Agudo	Institut de Robòtica i Informàtica Industrial
Rosa M Aguilar	University of La Laguna.
Luciano Alonso	University of Cantabria
Ignacio Álvarez García	Universidad de Oviedo
Antonio Javier Artuñedo García	Centre for Automation and Robotics (CSIC-UPM)
José M. Azorín	Miguel Hernandez University of Elche
Pedro Balaguer	Universitat Jaume I
Antonio Javier Barragán Piña	Universidad de Huelva
Alfonso Baños	Universidad de Murcia
Guillermo Bejarano	University of Seville
Gerardo Beruvides	Centro de Automática y Robótica
Carlos Bordons	University of Seville
Jose Manuel Bravo	University of Huelva
Jose Luis Calvo-Rolle	University of A Coruña
Fernando Castaño Romero	Centro de Automática y Robótica (UPM -CSIC)
José Luis Casteleiro-Roca	University of Coruña
Alvaro Castro-Gonzalez	Universidad Carlos III de Madrid
Ramon Costa-Castelló	Universitat Politècnica de Catalunya
Abel A. Cuadrado	University of Oviedo
Arturo De La Escalera	Universidad Carlos III de Madrid
Emma Delgado	Universidad de Vigo
Jose-Luis Diez	Universitat Politecnica de Valencia
Manuel Domínguez	Universidad de León
Juan Manuel Escaño	Universidad de Sevilla
Mario Francisco	University of Salamanca
Maria Jesus Fuente	Universidad de Valladolid
Juan Garrido	Universtiy of Cordoba
Antonio Giménez	Universidad de Almeria
Evelio Gonzalez	Universidad de La Laguna
José-Luis Guzmán	Universidad de Almería
Rodolfo Haber	Center for Automation and Robotics (UPM-CSIC)
César Ernesto Hernández	Universidad de Almería
Eloy Irigoyen	UPV/EHU
Agustin Jimenez	Universidad PolitÁcnica de Madrid
Emilio Jiménez	University of La Rioja
Jesus Lozano	Universidad de Extremadura
Jorge Luis Madrid	Centro de Automática y Robótica
Luis Magdalena	Universidad Politécnic de Madrid
David Martin Gomez	Universidad Carlos III de Madrid
Fernando Matia	Universidad Politecnica de Madrid
Joaquim Melendez	Universitat de Girona
Juan Mendez	Universidad de La Laguna
Luis Moreno	Universidad Carlos III de Madrid
María Dolores Moreno Rabel	Universidad de Extremadura
David Muñoz	Universidad de Sevilla
Antonio José Muñoz-Ramirez	Universidad de Málaga
Jose Luis Navarro	Universidad Politecnica de Valencia
Manuel G. Ortega	University of Seville
Andrzej Pawlowski	UNED
Mercedes Perez de La Parte	University of La Rioja
Ignacio Peñarrocha	Universitat Jaume I de Castelló, Spain
José Luis Pitarch	Universidad de Valladolid

Daniel Pérez	University of Oviedo
Emilio Pérez	Universitat Jaume I
Juan Pérez Oria	Universidad de Cantabria
MiguelÁngel Ridao	Universidad de Sevilla
Gregorio Sainz-Palmero	Universidad de Valladolid
Antonio Sala	Universitat Politecnica de Valencia
Ester Sales-Setién	Universitat Jaume I
Jose Sanchez	UNED
Javier Sanchis Saez	Universitat Politecnica de Valencia (UPV)
José Pedro Santos	ITEFI-CSIC
Matilde Santos	Universidad Complutense de Madrid
Alvaro Serna	University of Valladolid
José Enrique Simó	Universidad Politécnica de Valencia
José A. Somolinos	ETS I Navales. Universidad Politecnica de Madrid
Fernando Tadeo	Univ. of Valladolid
Alejandro Tapia	Universidad de Loyola Andalucía
David Tena	Universitat Jaume I
Jesús Torres	Universidad de La Laguna
Pedro M. Vallejo	Universidad de Salamanca
Guilherme Vianna	Universidad de Sevilla
Alejandro Vignoni	AI2 - UPV
Ramón Vilanova	UAB
Francisco Vázquez	Universidad de Cordoba
Jesús M. Zamarreño	University of Valladolid

## Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

Balbastre, Patricia  
Beltrán de La Cita, Jorge  
Bermudez-Cameo, Jesus  
Blanco-Claraco, Jose-Luis  
Blanes, Francisco  
Bonin-Font, Francisco

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

Garita, Cesar  
Gimenez, Antonio  
Gruber, Patrick  
Guindel, Carlos

Hernandez Ruiz, Alejandro  
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

Marin, Raul  
Marín Plaza, Pablo  
Mañanas, Miguel Angel  
Morales, Rafael  
Moreno, Francisco-Angel

Núñez, Luis Ramón

Ponz Vila, Aurelio  
Posadas-Yague, Juan-Luis  
Poza-Luján, Jose-Luis  
Pumarola, Albert

Raya, Rafael  
Revestido Herrero, Elías  
Rocon, Eduardo  
Ruiz Sarmiento, José Raúl  
Ruiz, Adria

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor



## Table of Contents

---

### Ingeniería de Control

---

TÚNEL DE AGUA PARA PRUEBAS Y CARACTERIZACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS .....	1
<i>Eduardo Alvarez, Manuel Rico-Secades, Antonio Javier Calleja Rodríguez, Joaquín Fernández Francos, Aitor Fernández Jiménez, Mario Alvarez Fernández and Samuel Camba Fernández</i>	
Reduction of population variability in protein expression: A control engineering approach.	8
<i>Yadira Boada, Alejandro Vignoni and Jesús Picó</i>	
CONTROL ROBUSTO DEL PH EN FOTOBIORREACTORES MEDIANTE RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES .....	16
<i>José Carreño, Jose Luis Guzman, José Carlos Moreno and Rodolfo Villamizar</i>	
Control reset para maniobra de cambio de carril y validación con CarSim .....	23
<i>Miguel Cerdeira, Pablo Falcón, Antonio Barreiro, Emma Delgado and Miguel Díaz-Cacho</i>	
Maniobra de aterrizaje automática de una Cessna 172P modelada en FlightGear y controlada desde un programa en C .....	31
<i>Mario de La Rosa, Antonio Javier Gallego and Eduardo Fernández</i>	
Alternativas para el control de la red eléctrica aislada en parques eólicos marinos .....	38
<i>Carlos Díaz-Sanahuja, Ignacio Peñarrocha, Ricardo Vidal-Albalade and Ester Sales-Setién</i>	
CONTROL PREDICTIVO DISTRIBUIDO UTILIZANDO MODELOS DIFUSOS PARA LA NEGOCIACIÓN ENTRE AGENTES .....	46
<i>Lucía Fargallo, Silvana Roxani Revollar Chavez, Mario Francisco, Pastora Vega and Antonio Cembellín</i>	
Control Predictivo en el espacio de estados de un captador solar tipo Fresnel .....	54
<i>Antonio Javier Gallego, Mario de La Rosa and Eduardo Fernández</i>	
Control predictivo para la operación eficiente de una planta formada por un sistema de desalación solar y un invernadero .....	62
<i>Juan Diego Gil Vergel, Lidia Roca, Manuel Berenguel, Alba Ruiz Aguirre, Guillermo Zaragoza and Antonio Giménez</i>	
Depuración de Aguas Residuales en la Industria 4.0 .....	70
<i>Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel, Ana María Jiménez Arévalo, Laura Eiroa Mateo and Fco. Javier Fernández-De-Cañete-Rodríguez</i>	
Control robusto con QFT del pH en un fotobioreactor raceway .....	77
<i>Ángeles Hoyo Sánchez, Jose Luis Guzman, Jose Carlos Moreno and Manuel Berenguel</i>	
Revisión sistemática de la literatura en ingeniería de sistemas. Caso práctico: técnicas de estimación distribuida de sistemas ciberfísicos .....	84
<i>Carmelina Ierardi, Luis Orihuela Espina, Isabel Jurado Flores, Álvaro Rodríguez Del Nozal and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Desarrollo de un Controlador Predictivo para Autómatas programables basado en la normativa IEC 61131-3 .....	92
<i>Pablo Krupa, Daniel Limon and Teodoro Alamo</i>	
Diseño de un emulador de aerogenerador de velocidad variable DFIG y control de pitch ...	100
<i>Manuel Lara Ortiz, Juan Garrido Jurado and Francisco Vázquez Serrano</i>	

Observación de la fracción de agua líquida en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto.....	108
<i>Julio Luna and Ramon Costa-Castelló</i>	
Control Predictivo Basado en Datos.....	115
<i>José María Manzano, Daniel Limón, Teodoro Álamo and Jan Peter Calliess</i>	
Control MPC basado en un modelo LTV para seguimiento de trayectoria con estabilidad garantizada.....	122
<i>Sara Mata, Asier Zubizarreta, Ione Nieva, Itziar Cabanes and Charles Pinto</i>	
Implementación y evaluación de controladores basados en eventos en la norma IEC-61499.	130
<i>Oscar Miguel-Escrig, Julio-Ariel Romero-Pérez and Esteban Querol-Dolz</i>	
AUTOMATIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE ENSAYO DE MOTORES.....	138
<i>Alfonso Poncela Méndez, Miguel Ochoa Vega, Eduardo J. Moya de La Torre and F. Javier García Ruíz</i>	
OPTIMIZACIÓN Y CONTROL EN CASCADA DE TEMPERATURA DE RECINTO MEDIANTE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.....	146
<i>David Rodríguez, José Enrique Alonso Alfaya, Guillermo Bejarano Pellicer and Manuel G. Ortega</i>	
Diseño LQ e implementación distribuida para la estimación de estado.....	154
<i>Álvaro Rodríguez Del Nozal, Luis Orihuela, Pablo Millán Gata, Carmelina Ierardi and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Estimación de fugas en un sistema industrial real mediante modelado por señales aditivas.	160
<i>Ester Sales-Setién, Ignacio Peñarrocha and David Tena</i>	
Advanced control based on MPC ideas for offshore hydrogen production.....	167
<i>Alvaro Serna, Fernando Tadeo and Julio. E Normey-Rico</i>	
Transfer function parameters estimation by symmetric send-on-delta sampling.....	174
<i>José Sánchez, María Guinaldo, Sebastián Dormido and Antonio Visioli</i>	
An Estimation Approach for Process Control based on Asymmetric Oscillations.....	181
<i>José Sánchez, María Guinaldo Losada, Sebastian Dormido, José Luis Fernández Marrón and Antonio Visioli</i>	
Robust PI controller for disturbance attenuation and its application for voltage regulation in islanded microgrid.....	189
<i>Ramon Vilanova, Carles Pedret and Orlando Arrieta</i>	
Infraestructura para explotación de datos de un simulador azucarero.....	197
<i>Jesús M. Zamarréño, Cristian Pablos, Alejandro Merino, L. Felipe Acebes and De Prada César</i>	
<hr/> <b>Automar</b> <hr/>	
INFRAESTRUCTURA PARA ESTUDIAR ADAPTABILIDAD Y TRANSPARENCIA EN EL CENTRO DE CONTROL VERSÁTIL.....	203
<i>Juan Antonio Bonache Seco, José Antonio Lopez Orozco, Eva Besada Portas and Jesús Manuel de La Cruz</i>	
ARQUITECTURA DE CONTROL HÍBRIDA PARA LA NAVEGACIÓN DE VEHÍCULOS SUBMARINOS NO TRIPULADOS.....	211
<i>Francisco J. Lastra, Jesús A. Trujillo, Francisco J. Velasco and Elías Revestido</i>	

Exploración y Reconstrucción 3D de Fondos Marinos Mediante AUVs y Sensores Acústicos .....	218
<i>Oscar L. Manrique Garcia, Mario Andrei Garzon Oviedo and Antonio Barrientos</i>	
AUTOMATIZACIÓN DE MANIOBRAS PARA UN TEC DE 2GdL .....	226
<i>Marina Pérez de La Portilla, José Andrés Somolinos Sánchez, Amable López Piñeiro, Rafael Morales Herrera and Eva Segura</i>	
MERBOTS PROJECT: OVERALL DESCRIPTION, MULTISENSORY AUTONOMOUS PERCEPTION AND GRASPING FOR UNDERWATER ROBOTICS INTERVENTIONS .....	232
<i>Pedro J. Sanz, Raul Marin, Antonio Peñalver, David Fornas and Diego Centelles</i>	
<hr/> <b>Bioingeniería</b> <hr/>	
MARCADORES CUADRADOS Y DEFORMACIÓN DE OBJETOS EN NAVEGACIÓN QUIRÚRGICA CON REALIDAD AUMENTADA .....	238
<i>Eliana Aguilar, Oscar Andres Vivas and Jose Maria Sabater-Navarro</i>	
Entrenamiento robótico de la marcha en pacientes con Parálisis Cerebral: definición de objetivos, propuesta de tratamiento e implementación clínica preliminar .....	244
<i>Cristina Bayón, Teresa Martín-Lorenzo, Beatriz Moral-Saiz, Óscar Ramírez, Álvaro Pérez-Somarriba, Sergio Lerma-Lara, Ignacio Martínez and Eduardo Rocon</i>	
PREDICCIÓN DE ACTIVIDADES DE LA VIDA DIARIA EN ENTORNOS INTELIGENTES PARA PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA .....	251
<i>Arturo Bertomeu-Motos, Santiago Ezquerro, Juan Antonio Barios, Luis Daniel Lledó, Francisco Javier Badesa and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
Sistema de Visión Estereoscópico para el guiado de un Robot Quirúrgico en Operaciones de Cirugía Laparoscópica HALS.....	256
<i>Carlos Castedo Hernández, Rafael Estop Remacha, Eusebio de La Fuente López and Lidia Santos Del Blanco</i>	
Head movement assessment of cerebral palsy users with severe motor disorders when they control a computer thought eye movements.....	264
<i>Alejandro Clemotte, Miguel A. Velasco and Eduardo Rocon</i>	
Diseño de un sensor óptico de fuerza para exoesqueletos de mano.....	270
<i>Jorge Diez Pomares, Andrea Blanco Ivorra, José María Catalan Orts, Francisco Javier Badesa Clemente, José María Sabater and Nicolas Garcia Aracil</i>	
POSIBILIDADES DEL USO DE TRAMAS ARTIFICIALES DE IMAGEN MOTORA PARA UN BCI BASADO EN EEG .....	276
<i>Josep Dinarès-Ferran, Christoph Guger and Jordi Solé-Casals</i>	
EFFECTOS SOBRE LA ERD EN TAREAS DE CONTROL DE EXOESQUELETO DE MANO EMPLEANDO BCI.....	282
<i>Santiago Ezquerro, Juan Antonio Barios, Arturo Bertomeu-Motos, Luisa Lorente, Nuria Requena, Irene Delegido, Francisco Javier Badesa and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
Formulación Topológica Adaptada para la Simulación y Control de Exoesqueletos Accionados con Transmisiones Harmonic Drive.....	288
<i>Andres Hidalgo Romero and Eduardo Rocon</i>	

Identificación de contracciones isométricas de la extremidad superior en pacientes con lesión medular incompleta mediante características espectrales de la electromiografía de alta densidad (HD-EMG) .....	296
<i>Mislav Jordanic, Mónica Rojas-Martínez, Joan Francesc Alonso, Carolina Migliorelli and Miguel Ángel Mañanas</i>	
Diseño de una plataforma para analizar el efecto de la estimulación mecánica aferente en el temblor de pacientes con temblor esencial .....	302
<i>Julio S. Lora, Roberto López, Jesús González de La Aleja and Eduardo Rocon</i>	
DEFINICIÓN DE UN PROTOCOLO PARA LA MEDIDA PRECISA DEL RANGO CERVICAL EMPLEANDO TECNOLOGÍA INERCIAL .....	308
<i>Álvaro Martín, Rafael Raya, Cristina Sánchez, Rodrigo Garcia-Carmona, Oscar Ramirez and Abraham Otero</i>	
SISTEMA BRAIN-COMPUTER INTEFACE DE NAVEGACIÓN WEB ORIENTADO A PERSONAS CON GRAVE DISCAPACIDAD.....	313
<i>Víctor Martínez-Cagigal, Javier Gómez-Pilar, Daniel Álvarez, Eduardo Santamaría-Vázquez and Roberto Hornero</i>	
ESTRATEGIAS DE NEUROESTIMULACIÓN TRANSCRANEAL POR CORRIENTE DIRECTA PARA MEJORA COGNITIVA .....	320
<i>Silvia Moreno Serrano, Mario Ortiz and José María Azorín Poveda</i>	
COMPARATIVA DE ALGORITMOS PARA LA DETECCIÓN ONLINE DE IMAGINACIÓN MOTORA DE LA MARCHA BASADO EN SEÑALES DE EEG .....	328
<i>Marisol Rodriguez-Ugarte, Irma Nayeli Angulo Sherman, Eduardo Iáñez and Jose M. Azorin</i>	
DETECCIÓN, MEDIANTE UN GUANTE SENSORIZADO, DE MOVIMIENTOS SELECCIONADOS EN UN SISTEMA ROBOTIZADO COLABORATIVO PARA HALS	334
<i>Lidia Santos, José Luis González, Eusebio de La Fuente, Juan Carlos Fraile and Javier Pérez Turiel</i>	
BIOSENSORES PARA CONTROL Y SEGUIMIENTO PATOLOGÍAS REUMATOIDES .....	340
<i>Amparo Tirado, Raúl Marín, José V Martí, Miguel Belmonte and Pedro Sanz</i>	
Assessment of tremor severity in patients with essential tremor using smartwatches .....	347
<i>Miguel A. Velasco, Roberto López-Blanco, Juan P. Romero, M. Dolores Del Castillo, J. Ignacio Serrano, Julián Benito-León and Eduardo Rocon</i>	
INTERFAZ CEREBRO-ORDENADOR PARA EL CONTROL DE UNA SILLA DE RUEDAS A TRAVÉS DE DOS PARADIGMAS DE NAVEGACIÓN .....	353
<i>Fernández-Rodríguez Álvaro, Velasco-Álvarez Francisco and Ricardo Ron-Angevin</i>	
<hr/> <b>Control Inteligente</b> <hr/>	
Aprendizaje por Refuerzo para sistemas lineales discretos con dinámica desconocida: Simulación y Aplicación a un Sistema Electromecánico .....	360
<i>Henry Diaz, Antonio Sala and Leopoldo Armesto</i>	
Diseño de sistemas de control en cascada clásico y borroso para el seguimiento de trayectorias .....	368
<i>Javier G. Gonzalez, Rodolfo Haber, Fernando Matia and Marcelino Novo</i>	

ANÁLISIS FORMAL DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS NO LINEALES MEDIANTE REDES NEURONALES.....	376
<i>Eloy Irigoyen, Mikel Larrea, A. Javier Barragán, Miguel Ángel Martínez and José Manuel Andújar</i>	
Predicción de la energía renovable proveniente del oleaje en las islas de Fuerteventura y Lanzarote. ....	384
<i>G.Nicolás Marichal, Deivis Avila, Ángela Hernández, Isidro Padrón and José Ángel Rodríguez</i>	
Aplicación de Redes Neuronales para la Estimación de la Resistencia al Avance en Buques	393
<i>Daniel Marón Blanco and Matilde Santos</i>	
Novel Fuzzy Torque Vectoring Controller for Electric Vehicles with per-wheel Motors . . . .	401
<i>Alberto Parra, Martín Dendaluze, Asier Zubizarreta and Joshué Pérez</i>	
REPOSTAJE EN TIERRA DE UN AVIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS .	408
<i>Elías Plaza and Matilde Santos</i>	
VISUALIZACIÓN WEB INTERACTIVA PARA EL ANÁLISIS DEL CHATTER EN LAMINACIÓN EN FRÍO.....	416
<i>Daniel Pérez López, Abel Alberto Cuadrado Vega and Ignacio Díaz Blanco</i>	
BANCADA PARA ANÁLISIS INTELIGENTE DE DATOS EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL.....	424
<i>Daniel Pérez López, Diego García Pérez, Ignacio Díaz Blanco and Abel Alberto Cuadrado Vega</i>	
CONTROL DE UN VEHÍCULO CUATRIRROTOR BASADO EN REDES NEURONALES.....	431
<i>Jesus Enrique Sierra and Matilde Santos</i>	
CONTROL PREDICTIVO FUZZY CON APLICACIÓN A LA DEPURACIÓN BIOLÓGICA DE FANGOS ACTIVADOS.....	437
<i>Pedro M. Vallejo Llamas and Pastora Vega Cruz</i>	
<hr/> <b>Educación en Automática</b> <hr/>	
REFLEXIONES SOBRE EL VALOR DOCENTE DE UNA COMPETICION DE DRONES EN LA EDUCACIÓN PARA EL CONTROL.....	445
<i>Ignacio Díaz Blanco, Alvaro Escanciano Urigüen, Antonio Robles Alvarez and Hilario López García</i>	
Uso del Haptic Paddle con aprendizaje basado en proyectos .....	451
<i>Juan M. Gandarias, Antonio José Muñoz-Ramírez and Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel</i>	
REPRESENTACION INTEGRADA DE ACCIONAMIENTOS MECANICOS Y CONTROL DE EJES ORIENTADA A LA COMUNICACIÓN Y DOCENCIA EN MECATRONICA .....	457
<i>Julio Garrido Campos, David Santos Esterán, Juan Sáez López and José Ignacio Armesto Quiroga</i>	
Construcción y modelado de un prototipo fan & plate para prácticas de control automático	465
<i>Cristina Lampon, Javier Martin, Ramon Costa-Castelló and Muppaneni Lokesh Chowdary</i>	

EDUCACION EN AUTOMATICA E INDUSTRIA 4.0 MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS 3D .....	471
<i>Jose Ramon Llata, Esther Gonzalez-Sarabia, Carlos Torre-Ferrero and Ramon Sancibrian</i>	
Desarrollo e implementación de un sistema de control en una planta piloto hibrida.....	479
<i>Maria P. Marcos, Cesar de Prada and Jose Luis Pitarch</i>	
LA INFORMÁTICA INDUSTRIAL EN LAS INGENIERÍAS INDUSTRIALES .....	486
<i>Rogelio Mazaeda, Eusebio de La Fuente López, José Luis González, Eduardo J. Moya de La Torre, Miguel Angel García Blanco, Javier García Ruiz, María Jesús de La Fuente Aparicio, Gregorio Sainz Palmero and Smaranda Cristea</i>	
Ventajas docentes de un flotador magnético para la experimentación de técnicas control ..	495
<i>Eduardo Montijano, Carlos Bernal, Carlos Sagües, Antonio Bono and Jesús Sergio Artal</i>	
PROGRAMACIÓN ATRACTIVA DE PLC .....	502
<i>Eduardo J. Moya de La Torre, F. Javier García Ruíz, Alfonso Poncela Méndez and Victor Barrio Lángara</i>	
MODERNIZACIÓN DE EQUIPO FEEDBACK MS-150 PARA EL APRENDIZAJE ACTIVO EN INGENIERÍA DE CONTROL .....	510
<i>Perfecto Reguera Acevedo, Miguel Ángel Prada Medrano, Antonio Morán Álvarez, Juan José Fuertes Martínez, Manuel Domínguez González and Serafín Alonso Castro</i>	
INNOVACIÓN PEDAGÓGICA EN LA FORMACIÓN DEL PERFIL PROFESIONAL PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL A TRAVÉS DE UNA APROXIMACIÓN HOLÍSTICA. ....	517
<i>Juan Carlos Ríos, Zaneta Babel, Daniel Martínez, José María Paredes, Luis Alonso, Pablo Hernández, Alejandro García, David Álvarez, Jorge Miranda, Constantino Manuel Valdés and Jesús Alonso</i>	
Aprendiendo Simulación de Eventos Discretos con JaamSim .....	522
<i>Enrique Teruel and Rosario Aragüés</i>	
RED NEURONAL AUTORREGRESIVA NO LINEAL CON ENTRADAS EXÓGENAS PARA LA PREDICCIÓN DEL ELECTROENCEFALOGRAMA FETAL...	528
<i>Rosa M Aguilar, Jesús Torres and Carlos Martín</i>	
ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN REACTORES RACEWAYS.....	534
<i>Marta Barceló, Jose Luis Guzman, Francisco Gabriel Acién, Ismael Martín and Jorge Antonio Sánchez</i>	
MODELADO DINÁMICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE FRÍO VINCULADO A UN CICLO DE REFRIGERACIÓN .....	539
<i>Guillermo Bejarano Pellicer, José Joaquín Suffo, Manuel Vargas and Manuel G. Ortega</i>	
Predictor Intervalar basado en hiperplano soporte .....	547
<i>José Manuel Bravo Caro, Manuel Vasallo Vázquez, Emilian Cojocarú and Teodoro Alamo Cantarero</i>	
Dynamic simulation applied to refinery hydrogen networks .....	555
<i>Anibal Galan Prado, Cesar De Prada, Gloria Gutierrez, Rafael Gonzalez and Daniel Sarabia</i>	

APROXIMACIÓN DE MODELOS ALGEBRAICOS MEDIANTE ALAMO Y ECOSIMPRO .....	563
<i>Carlos Gómez Palacín, José Luis Pitarch, Gloria Gutiérrez and Cesar De Prada</i>	
A Causal Model to Analyze Aircraft Collision Avoidance Deadlock Scenarios .....	569
<i>Miquel Àngel Piera Eroles, Julia de Homdedeu, Maria Del Mar Tous, Thimjo Koca and Marko Radanovic</i>	
ONLINE DECISION SUPPORT FOR AN EVAPORATION NETWORK .....	575
<i>José Luis Pitarch, Marc Kalliski, Carlos Gómez Palacín, Christian Jasch and Cesar De Prada</i>	
Predicción de la irradiancia a partir de datos de satélite mediante deep learning .....	582
<i>Javier Pérez, Jorge Segarra-Tamarit, Hector Beltran, Carlos Ariño, José Carlos Alfonso Gil, Aleks Attanasio and Emilio Pérez</i>	
MODELO DINÁMICO ORIENTADO AL TRATAMIENTO Y SEGUIMIENTO DE LA LEUCEMIA MIELOIDE CRÓNICA .....	589
<i>Gabriel Pérez Rodríguez and Fernando Morilla</i>	
Modelado y optimización de la operación de un sistema de bombeo de múltiples depósitos	596
<i>Roberto Sanchis Llopis and Ignacio Peñarrocha</i>	
DEVELOPMENT OF A GREY MODEL FOR A MEDIUM DENSITY FIBREBOARD DRYER IN ECOSIMPRO .....	604
<i>Pedro Santos, Jose Luis Pitarch and César de Prada</i>	
DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE FALLOS MEDIANTE MONITORIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LAS FECHAS DE LIMPIEZA PARA INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS .....	611
<i>Jorge Segarra-Tamarit, Emilio Pérez, Hector Beltran, Enrique Belenguer and José Luis Gandía</i>	
Modelado de micro-central hidráulica para el diseño de controladores con aplicación en regiones aisladas de Honduras .....	618
<i>Alejandro Tapia Córdoba, Pablo Millán Gata, Fabio Gómez-Estern Aguilar, Carmelina Ierardi and Álvaro Rodríguez Del Nozal</i>	
FRAMEWORK PARA EL MODELADO DE UN LAGO DE DATOS .....	626
<i>J.M Torres, R.M. Aguilar, C.A. Martin and S. Diaz</i>	
SIMULADOR CARDIOVASCULAR PARA ENSAYO DE ROBOTS DE NAVEGACION AUTONOMA .....	633
<i>José Emilio Traver, Juan Francisco Ortega Morán, Ines Tejado, J. Blas Pagador, Fei Sun, Raquel Pérez-Aloe, Blas M. Vinagre and F. Miguel Sánchez Margallo</i>	
PLANIFICACION DE LA PRODUCCION BASADA EN CONTROL PREDICTIVO PARA PLANTAS TERMOSOLARES .....	641
<i>Manuel Jesús Vasallo Vázquez, José Manuel Bravo Caro, Emilian Cojocarú and Manuel Emilio Gegundez Arias</i>	
Evaluación multicriterio para la optimización de redes de energía .....	649
<i>Ascensión Zafra Cabeza, Rafael Espinosa, Miguel Àngel Ridao Carlini and Carlos Bordóns Alba</i>	
Percibiendo el entorno en los robots sociales del RoboticsLab .....	657
<i>Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo Montoya, Àlvaro Castro-Gonzalez, Juan José Gamboa, Marcos Maroto Gómez, Sara Marqués Villaroya, Antonio J. Pérez Vidal and Miguel Àngel Salichs</i>	

DISEÑO DE UNA PRÓTESIS DE MANO ADAPTABLE AL CRECIMIENTO .....	664
<i>Marta Ayats and Raul Suarez</i>	
COOPERATIVISMO BIOINSPIRADO BASADO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS HORMIGAS .....	672
<i>Brayan Bermudez, Kristel Novoa and Miguel Valbuena</i>	
PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE MIEMBRO SUPERIOR PARA SOPORTE DE CARGAS .....	680
<i>Andrea Blanco Ivorra, Jorge Diez Pomares, David Lopez Perez, Francisco Javier Badesa Clemente, Miguel Ignacio Sanchez and Nicolas Garcia Aracil</i>	
Estructura de control en ROS y modos de marcha basados en máquinas de estados de un robot hexápodo .....	686
<i>Raúl Cebolla Arroyo, Jorge De Leon Rivas and Antonio Barrientos</i>	
USING AN UAV TO GUIDE THE TELEOPERATION OF A MOBILE MANIPULATOR .....	694
<i>Josep Arnau Claret and Luis Basañez</i>	
Estudio de los patrones de marcha para un robot hexápodo en tareas de búsqueda y rescate .....	701
<i>Jorge De León Rivas and Antonio Barrientos</i>	
SISTEMA DE INTERACCIÓN VISUAL PARA UN ROBOT SOCIAL .....	709
<i>Mario Domínguez López, Eduardo Zalama Casanova, Jaime Gómez García-Bermejo and Samuel Marcos Pablos</i>	
Mejora del Comportamiento Proxémico de un Robot Autónomo mediante Motores de Inteligencia Artificial Desarrollados para Plataformas de Videojuegos .....	717
<i>David Fernández Chaves, Javier Monroy and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	
Micrófonos de contacto: una alternativa para sensado táctil en robots sociales .....	724
<i>Juan José Gamboa, Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo, Marcos Maroto Gómez and Miguel A. Salichs</i>	
Clasificación de información táctil para la detección de personas .....	732
<i>Juan M. Gandarias, Jesús M. Gómez-De-Gabriel and Alfonso García-Cerezo</i>	
Planificación para interceptación de objetivos: Integración del Método Fast Marching y Risk-RRT .....	738
<i>David Alfredo Garzon Ramos, Mario Andrei Garzon Oviedo and Antonio Barrientos</i>	
ESTABILIZACIÓN DE UNA BOLA SOBRE UN PLANO UTILIZANDO UN ROBOT PARALELO 6-RSS .....	746
<i>Daniel González, Lluís Ros and Federico Thomas</i>	
TELEOPERACIÓN DE INSTRUMENTOS QUIRÚRGICOS ARTICULADOS .....	754
<i>Ana Gómez Delgado, Carlos Perez-Del-Pulgar, Antonio Reina Terol and Victor Muñoz Martinez</i>	
CONTROL OF A ROBOTIC ARM FOR TRANSPORTING OBJECTS BASED ON NEURO-FUZZY LEARNING VISUAL INFORMATION .....	760
<i>Juan Hernández Vicén, Santiago Martínez de La Casa Díaz and Carlos Balaguer</i>	
PLATAFORMA BASADA EN LA INTEGRACIÓN DE MATLAB Y ROS PARA LA DOCENCIA DE ROBÓTICA DE SERVICIO .....	766
<i>Carlos G. Juan, Jose Maria Vicente, Alvaro Garcia and Jose Maria Sabater-Navarro</i>	

Estimadores de fuerza y movimiento para el control de un robot de rehabilitación de extremidad superior.....	772
<i>Aitziber Mancisidor, Asier Zubizarreta, Itziar Cabanes, Pablo Bengoa and Asier Brull</i>	
Definiendo los elementos que constituyen un robot social portable de bajo coste .....	780
<i>Marcos Maroto Gómez, José Carlos Castillo, Fernando Alonso-Martín, Juan José Gamboa, Sara Marqués Villarroya and Miguel Ángel Salichs</i>	
Interfaces táctiles para Interacción Humano-Robot .....	787
<i>Sara Marqués Villarroya, Jose Carlos Castillo Montoya, Fernando Alonso Martín, Marcos Maroto Gómez, Juan José Gamboa and Miguel A. Salichs</i>	
<b>HERRAMIENTAS DE ENTRENAMIENTO Y MONITORIZACIÓN PARA EL DESMINADO HUMANITARIO .....</b>	<b>793</b>
<i>Hector Montes, Roemi Fernandez, Pablo Gonzalez de Santos and Manuel Armada</i>	
Control a Baja Velocidad de una Rueda con Motor de Accionamiento Directo mediante Ingeniería Basada en Modelos .....	799
<i>Antonio José Muñoz-Ramírez, Jesús Manuel Luque-Bedmar, Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel, Anthony Mandow, Javier Serón and Alfonso Garcia-Cerezo</i>	
<b>SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS USANDO V-REP BAJO ROS .....</b>	<b>806</b>
<i>Cándido Otero Moreira, Enrique Paz Domonte, Rafael Sanz Dominguez, Joaquín López Fernández, Rafael Barea, Eduardo Romera, Eduardo Molinos, Roberto Arroyo, Luís Miguel Bergasa and Elena López</i>	
Cinemática y prototipado de un manipulador paralelo con centro de rotación remoto para robótica quirúrgica.....	814
<i>Francisco Pastor, Juan M. Gandarias and Jesús M. Gómez-De-Gabriel</i>	
<b>ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE SINGULARIDADES AISLADAS EN ROBOTS PARALELOS MEDIANTE DESARROLLOS DE TAYLOR DE SEGUNDO ORDEN.....</b>	<b>821</b>
<i>Adrián Peidro Vidal, Óscar Reinoso, Arturo Gil, José María Marín and Luis Payá</i>	
<b>INTERFAZ DE CONTROL PARA UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE REALIDAD VIRTUAL .....</b>	<b>829</b>
<i>Elena Peña-Tapia, Juan Jesús Roldán, Mario Garzón, Andrés Martín-Barrio and Antonio Barrientos</i>	
Evolución de la robótica social y nuevas tendencias.....	836
<i>Antonio J. Pérez Vidal, Alvaro Castro-Gonzalez, Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo Montoya and Miguel A. Salichs</i>	
<b>DISEÑO MECÁNICO DE UN ASISTENTE ROBÓTICO CAMARÓGRAFO CON APRENDIZAJE COGNITIVO .....</b>	<b>844</b>
<i>Irene Rivas-Blanco, M Carmen López-Casado, Carlos Pérez-Del-Pulgar, Francisco García-Vacas, Víctor Fernando Muñoz, Enrique Bauzano and Juan Carlos Fraile</i>	
<b>CÁLCULO DE FUERZAS DE CONTACTO PARA PRENSIONES BIMANUALES.....</b>	<b>852</b>
<i>Francisco Abiud Rojas-De-Silva and Raul Suarez</i>	
Modelado del Contexto Geométrico para el Reconocimiento de Objetos.....	860
<i>José Raúl Ruiz Sarmiento, Cipriano Galindo and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	
Estimación Probabilística de Áreas de Emisión de Gases con un Robot Móvil Mediante la Integración Temporal de Observaciones de Gas y Viento .....	868
<i>Carlos Sanchez-Garrido, Javier Monroy and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	

MANIPULADOR AÉREO CON BRAZOS ANTROPOMÓRFICOS DE ARTICULACIONES FLEXIBLES .....	876
<i>Alejandro Suarez, Guillermo Heredia and Anibal Ollero</i>	
EVALUACIÓN DE UN ENTORNO DE TELEOPERACIÓN CON ROS .....	864
<i>David Vargas Frutos, Juan Carlos Ramos Martínez, José Luis Samper Escudero, Miguel Ángel Sánchez-Urán González and Manuel Ferre Pérez</i>	

---

### Sistemas de Tiempo Real

---

GENERACIÓN DE CÓDIGO IEC 61131-3 A PARTIR DE DISEÑOS EN GRAFCET....	892
<i>María Luz Alvarez Gutierrez, Isabel Sarachaga Gonzalez, Arantzazu Burgos Fernandez, Nagore Iriondo Urbistazu and Marga Marcos Muñoz</i>	
CONTROL EN TIEMPO REAL Y SUPERVISIÓN DE PROCESOS MEDIANTE SERVIDORES OPC-UA .....	900
<i>Francisco Blanes Noguera and Andrés Benlloch Faus</i>	
Control de la Ejecución en Sistemas de Criticidad Mixta .....	906
<i>Alfons Crespo, Patricia Balbastre, Jose Simo and Javier Coronel</i>	
GENERACIÓN AUTOMÁTICA DEL PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN TIA PORTAL PARA MÁQUINAS MODULARES .....	913
<i>Darío Orive, Aintzane Armentia, Eneko Fernandez and Marga Marcos</i>	
DDS en el desarrollo de sistemas distribuidos heterogéneos con soporte para criticidad mixta .....	921
<i>Hector Perez and J. Javier Gutiérrez</i>	
ARQUITECTURA DISTRIBUIDA PARA EL CONTROL AUTÓNOMO DE DRONES EN INTERIOR .....	929
<i>Jose-Luis Poza-Luján, Juan-Luis Posadas-Yaguë, Giovanni-Javier Tipantuña-Topanta, Francisco Abad and Ramón Mollá</i>	
Ingeniería Conducida por Modelos en Sistemas de Automatización Flexibles .....	935
<i>Rafael Priego, Elisabet Estévez, Darío Orive, Isabel Sarachaga and Marga Marcos</i>	
Estudio e implementación de Middleware para aplicaciones de control distribuido .....	942
<i>Jose Simo, Jose-Luis Poza-Lujan, Juan-Luis Posadas-Yaguë and Francisco Blanes</i>	

---

### Visión por Computador

---

Real-Time Image Mosaicking for Mapping and Exploration Purposes .....	948
<i>Abdulla Al-Kaff, Juan Camilo Soto Triviño, Raúl Sosa San Frutos, Arturo de La Escalera and José María Armingol Moreno</i>	
ALGORITMO DE SLAM UTILIZANDO APARIENCIA GLOBAL DE IMÁGENES OMNIDIRECCIONALES .....	956
<i>Yerai Berenguer, Luis Payá, Mónica Ballesta, Luis Miguel Jiménez, Sergio Cebollada and Oscar Reinoso</i>	
Medición de Oximetría de Pulso mediante Imagen fotopletismográfica.....	964
<i>Juan-Carlos Cobos-Torres, Jordan Ortega Rodríguez, Pablo J. Alhama Blanco and Mohamed Abderrahim</i>	
Algoritmo de captura de movimiento basado en visión por computador para la teleoperación de robots humanoides.....	970
<i>Juan Miguel Garcia Haro and Santiago Martinez de La Casa</i>	

COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DETECCIÓN DE ROSTROS EN IMÁGENES DIGITALES .....	976
<i>Natalia García Del Prado, Victor Gonzalez Castro, Enrique Alegre and Eduardo Fidalgo Fernández</i>	
LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE FUGA PARA SISTEMA DE DETECCIÓN DE LÍNEAS DE CARRIL .....	983
<i>Manuel Ibarra-Arenado, Tardi Tjahjadi, Sandra Robla-Gómez and Juan Pérez-Oria</i>	
Oculus-Crawl, a Software Tool for Building Datasets for Computer Vision Tasks .....	991
<i>Iván De Paz Centeno, Eduardo Fidalgo Fernández, Enrique Alegre Gutiérrez and Wesam Al Nabki</i>	
Clasificación automática de obstáculos empleando escáner láser y visión por computador ..	999
<i>Aurelio Ponz, Fernando Garcia, David Martin, Arturo de La Escalera and Jose Maria Armingol</i>	
T-SCAN: OBTENCIÓN DE NUBES DE PUNTOS CON COLOR Y TEMPERATURA EN INTERIOR DE EDIFICIOS .....	1007
<i>Tomás Prado, Blanca Quintana, Samuel A. Prieto and Antonio Adan</i>	
EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA REALIZAR RESÚMENES AUTOMÁTICOS DE VÍDEOS .....	1015
<i>Pablo Rubio, Eduardo Fidalgo, Enrique Alegre and Víctor González</i>	
SIMULADOR PARA LA CREACIÓN DE MUNDOS VIRTUALES PARA LA ASISTENCIA A PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA EN SILLA DE RUEDAS .	1023
<i>Carlos Sánchez Sánchez, María Cidoncha Jiménez, Emiliano Pérez, Ines Tejado and Blas M. Vinagre</i>	
Calibración Extrínseca de un Conjunto de Cámaras RGB-D sobre un Robot Móvil .....	1031
<i>David Zúñiga-Nöel, Rubén Gómez Ojeda, Francisco-Ángel Moreno and Javier González Jiménez</i>	

# GENERACIÓN DE CÓDIGO IEC 61131-3 A PARTIR DE DISEÑOS EN GRAFCET

M.L. Alvarez

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU  
[marialuz.alvarez@ehu.es](mailto:marialuz.alvarez@ehu.es)

I. Sarachaga, A. Burgos, N. Iriondo, M. Marcos

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU  
[isabel.sarachaga@ehu.es](mailto:isabel.sarachaga@ehu.es), [arantzazu.burgos@ehu.es](mailto:arantzazu.burgos@ehu.es), [nagore.iriondo@ehu.es](mailto:nagore.iriondo@ehu.es)  
[marga.marcos@ehu.es](mailto:marga.marcos@ehu.es)

## Resumen

*Actualmente la colaboración entre aplicaciones es crucial en la ingeniería de automatización. En este trabajo se presenta un método de generación de código de control en texto estructurado de acuerdo con la norma IEC 61131-3 a partir de los GRAFCET de diseños obtenidos con la metodología MeiA, y generados con la herramienta que le da soporte. El prototipo desarrollado se ha utilizado en la generación del código correspondiente a un proceso de transferencia de piezas. A la reducción considerable del tiempo y de los errores de implementación de los programas de PLCs que proporciona este trabajo, hay que añadir la simplificación de las futuras tareas de mantenimiento.*

**Palabras Clave:** GRAFCET, IEC 61131-3, ST, PLC.

## 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, la colaboración entre aplicaciones es crucial en la ingeniería de automatización. El diseño de los sistemas de control requiere la participación de un conjunto multidisciplinar de expertos, que precisan un entorno de diseño capaz de gestionar la colaboración interdisciplinar.

En los sistemas de automatización industrial el Controlador Lógico Programable (PLC) es la tecnología de control establecida. La asociación independiente de fabricante PLCopen se fundó en 1992 con la misión de resolver aspectos relacionados con la programación del control así como promover y dar soporte al uso de estándares en el área. IEC (International Electrotechnical Commission) promueve el uso de sistemas abiertos en el campo del control industrial. El estándar IEC 61131-3 [8] propone un modelo de software y lenguajes de programación textuales (ST - Structured Text, IL - Instruction List) y gráficos (LD - Ladder Diagram, FBD - Function

Block Diagram, SFC - Sequential Function Chart). De entre estos lenguajes de programación, el texto estructurado (ST) es el que mejor aborda la creciente complejidad de la programación de sistemas de control y ofrece mayor garantía de interoperabilidad entre herramientas de programación de PLCs [18].

En el diseño de sistemas de automatización, los lenguajes de modelado más utilizados son las Redes de Petri (RdP) [14],[13] y GRAFCET [9]. Numerosos trabajos y publicaciones han demostrado la utilidad práctica de las RdP en muchas áreas de aplicación [13], pese a que el estudio realizado en [7] concluye que las RdP son un lenguaje de modelado complejo. De hecho, el lenguaje de modelado GRAFCET se define sobre la base de las RdP acotándolas para representar eventos discretos secuenciales, además de proporcionar claridad y normalización a la representación gráfica. En este sentido, [4] realiza un estudio comparativo entre las RdP y SFC (Sequential Function Chart) concluyendo que GRAFCET y SFC se pueden ver como una Red de Petri de tipo binaria acotada, donde las transiciones se disparan de forma determinista.

La mayor aceptación de GRAFCET en el campo de la automatización es debida fundamentalmente a su intuitiva representación gráfica, sencillez y claridad para la representación de características como el paralelismo estructural [1].

En este trabajo se presenta un método de generación de código de control en texto estructurado de acuerdo con la norma IEC 61131-3 a partir de los GRAFCET de diseños obtenidos con la metodología MeiA [1] y generados con la herramienta que le da soporte [2]. La metodología MeiA (MEthodology for Industrial Automation systems) ofrece guías de diseño y plantillas que capturan la experiencia de analistas y diseñadores, incluyendo no sólo aspectos estructurales claves, sino también aspectos relacionados con la flexibilidad, modularidad y extensibilidad de los diseños que pueden ser

reutilizados en otros sistemas. Siguiendo las fases y pasos de la metodología se obtienen los diseños en GRAFCET. La generación de código de control a partir del diseño obtenido con la herramienta reduce esfuerzo y tiempo de implementación.

La estructura del artículo es la siguiente: en el apartado 2 se realiza una revisión de trabajos relacionados con la generación de código de control. El apartado 3 presenta el método para la generación del proyecto de automatización, que se implementa en el prototipo descrito en el apartado 4. El apartado 5 ilustra la generación de código correspondiente al proceso “Transferencia de Piezas” utilizando el prototipo. Finalmente, las conclusiones se exponen en el apartado 6.

## 2 TRABAJOS RELACIONADOS

La colaboración entre aplicaciones, y más en concreto, la colaboración entre herramientas de diseño y programación que permitan la generación de software de control de manera automática reduce de forma considerable el tiempo de implementación de los programas de PLCs y produce una significativa reducción de los errores de implementación.

En la bibliografía se encuentran numerosas propuestas con este objetivo. Algunos enfoques utilizan Desarrollo Basado en Modelos (MDD) para la generación automática de código de control [20], [11]. Éstos presentan métodos y herramientas que son poco aceptadas en la programación práctica de PLCs en la industria.

Utilizando métodos y estándares más próximos al entorno industrial se presentan numerosos trabajos donde se utilizan las RdP para el diseño de sistemas de control, y diferentes algoritmos y métodos para la traducción a código fuente de PLC. En [6] los autores proponen un conjunto de técnicas de transformación de los diseños creados con RdP, denominadas IOPT, al lenguaje LD (Ladder Diagram). En [12] una herramienta implementa un método de transformación semiautomática de FIPN (Fuzzy Interpreted Petri Net) a texto estructurado (ST).

En los trabajos [17] y [10] se presenta la generación de código de PLCs partiendo de los diseños realizados en GRAFCET. En [17] seleccionan SFC como lenguaje de programación, pero requiere una normalización previa de los GRAFCETs antes de realizar las transformaciones debido a que SFC no permite representar las estructuras jerárquicas. En [10], los autores presentan una aproximación de transformación a lenguaje estructurado ST manteniendo las estructuras jerárquicas (macro-etapas y enclosed-grafcets) especificadas en

GRAFCET. Los autores seleccionan ST como lenguaje más adecuado para la transformación de los diseños en base a criterios de equivalencia semántica, legibilidad, portabilidad y facilidad de mantenimiento. La razón reside en que aún siendo SFC el lenguaje más cercano semánticamente a GRAFCET, GRAFCET sencillos pueden dar lugar a SFCs complejos al incluir jerarquía.

La generación del código de control que proporcionan estos trabajos reduce considerablemente el tiempo y los errores de implementación. El presente trabajo pretende, además, que el código generado tenga una estructura familiar para los programadores de PLCs, lo cual facilitará el mantenimiento del código.

## 3 GENERACIÓN DEL PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN

En los procesos de Diseño, la metodología *MeiA*, incorpora el lenguaje de modelado GRAFCET para generar las unidades de organización de diseño (DOUs - Design Organization Units). Se distinguen tres tipos de DOUs:

- DOUs de decisión que organizan el arranque y la parada de los distintos modos de funcionamiento, y coordinan todos los posibles estados del sistema.
- DOUs de producción que realizan las operaciones de producción, coordinación de operaciones, selección de parámetros de producción, etc.
- DOUs auxiliares que realizan procedimientos de inicialización, preparación, paros, avisos, etc.

La jerarquía, sincronización y coordinación de los GRAFCETs se realiza en base a señales de control generadas por los diferentes DOUs. No se utiliza la estructuración mediante macroetapas ni encapsulación. Además, dichos diseños cumplen las siguientes reglas:

- Toda etapa tiene un precedesor y un sucesor. Una etapa puede tener como precedesores: una transición o una divergencia en Y o una convergencia en O. Una etapa puede tener como sucesores: una transición o una convergencia en Y o una divergencia en O.
- Toda transición tiene un precedesor y un sucesor. Una transición puede tener como precedesores: una etapa o una convergencia en Y o una divergencia en O. Una transición puede tener como sucesores: una etapa o una divergencia en Y o una convergencia en O.
- Una divergencia en Y tiene como predecesor una transición y como sucesor tantas etapas como ramas en la divergencia.

- Una convergencia en Y tiene como predecesor tantas etapas como ramas confluyan y como sucesor una transición.
- Una divergencia en O tiene como predecesor una etapa y como sucesor tantas transiciones como ramas en la divergencia.
- Una convergencia en O tiene como predecesor tantas transiciones como ramas confluyan y como sucesor una etapa.

Partiendo de los diseños realizados en GRAFCET y desarrollados a nivel tecnológico, se generará la programación en la norma IEC 61131-3, distinguiendo: la **Parte Secuencial** que proporciona la secuencia de activación y desactivación de las distintas etapas y la **Parte Combinacional** que implementa las acciones del sistema en función de las etapas activas en cada momento. También se debe tener en cuenta la definición de todas las **Variables**.

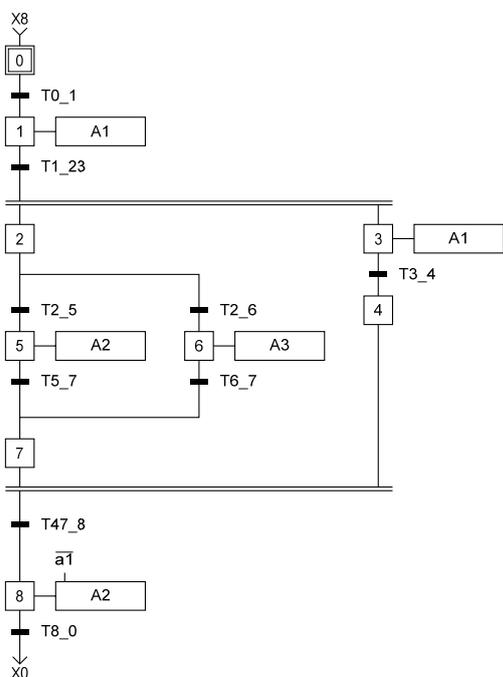


Figura 1: Ejemplo de GRAFCET (GEjemplo)

La Parte Secuencial se implementa con POU's de tipo bloque funcional; por cada DOU se genera un POU. Para ello, en primer lugar, se precisa construir la "Tabla de Set-Reset de las etapas" donde se presentan las condiciones que se deben cumplir para la activación y desactivación de cada etapa del GRAFCET. Una etapa se activa cuando está activada la etapa o etapas anteriores y se cumplen las condiciones de transición entre ambas. Cualquier etapa se desactiva cuando se cumplen las condiciones de transición a la-s siguiente-s etapa-s y dicha transición se haya efectuado (activadas etapas sucesoras).

Tabla 1: Tabla Set-Reset de las etapas

	Set (Activación de Etapas)	Reset (Desactivación de Etapas)
X0	$SX0 = X8 \cdot T8\_0 + \text{Init}$	$RX0 = X1 + \text{Reset}$
X1	$SX1 = X0 \cdot T1\_23$	$RX1 = X2 \cdot X3 + \text{Init} + \text{Reset}$
X2	$SX2 = X1 \cdot T1\_23$	$RX2 = X5 + X6 + \text{Init} + \text{Reset}$
X3	$SX3 = X1 \cdot T1\_23$	$RX3 = X4 + \text{Init} + \text{Reset}$
X4	$SX4 = X3 \cdot T3\_4$	$RX4 = X8 + \text{Init} + \text{Reset}$
X5	$SX5 = X2 \cdot T2\_5$	$RX5 = X7 + \text{Init} + \text{Reset}$
X6	$SX6 = X2 \cdot T2\_6$	$RX6 = X7 + \text{Init} + \text{Reset}$
X7	$SX7 = X5 \cdot T5\_7 + X6 \cdot T6\_7$	$RX7 = X8 + \text{Init} + \text{Reset}$
X8	$SX8 = X4 \cdot X7 \cdot T47\_8$	$RX8 = X0 + \text{Init} + \text{Reset}$

La Tabla 1 presenta la "Tabla Set-Reset de las etapas" para el GRAFCET (GEjemplo) de la Figura 1. Por ejemplo, la etapa 2 (X2) se activará cuando estando activa la etapa 1 (X1) se cumpla la condición asociada a la transición T1\_23 y se desactivará cuando se active la etapa 5 (X5) o cuando se active la etapa 6 (X6) dependiendo de la evolución del GRAFCET. La variable **Init** se incluye con el fin de poder activar las etapas iniciales de los GRAFCETs y la variable **Reset** para desactivar todas las etapas. Dichas funcionalidades son requeridas para la implementación del paro de emergencia.

Para la programación, a cada etapa se le asocia una variable de estado **Xi** (donde i representa el número de etapa) de tipo booleana. Para cada etapa se programan dos estructuras de tipo IF-THEN: una para evaluar las condiciones que activan la etapa y otra para evaluar su desactivación.

```

(*---GEjemplo---*)
X0 : BOOL;
X1 : BOOL;
X2 : BOOL;
...

(* Set -Reset _____ X2*)
IF ( X1 AND T1_23 ) THEN
    X2:=1;
END_IF;
IF ( X5 OR X6 OR Init OR Reset ) THEN
    X2:=0;
END_IF;
    
```

Figura 2: Programación de la etapa 2 (X2) del ejemplo, resaltada en la tabla 1

Cada transición lleva una condición asociada denominada receptividad, siendo el resultado de la evaluación de la fórmula lógica de tipo booleano. Las receptividades en los DOUs tecnológicos se enuncian como expresiones lógicas que pueden ser traducidas directamente al lenguaje ST.

La **Parte Combinacional** se implementa en el POU principal de tipo Programa, en el cual se instanciará

cada uno de los POU's que implementan la parte secuencial.

Para la programación de las acciones se distinguen distintos tipos. Para la programación de cada una de las señales relacionadas con los actuadores del proceso (salidas) se realiza una búsqueda en las acciones de todos los GRAFCET con el fin de identificar todas las etapas en las que aparece, considerando si es una acción continua, si la acción es condicional o se trata de una asignación (set, reset o valor). Por ejemplo, la salida A2 del GEjemplo, se activará cuando esté activa la etapa 5 (X5) o cuando se active la etapa 8 (X8) si la señal a1 no está activada (1).

$$A2 := X5 \text{ OR } (X8 \text{ AND NOT } a1); \quad (1)$$

Las señales de control que coordinan y sincronizan los DOUs son programadas de la misma forma que las salidas.

Los contadores, temporizadores, pulsos, etc., se implementan instanciando los bloques funcionales que proporciona la norma IEC 61131-3. Las operaciones relacionadas con la inicialización y actualización de los mismos se programan de manera similar a las salidas.

#### 4 PROTOTIPO

Uno de los editores de GRAFCET más extendido es SFCEdit © [19]. SFCEdit proporciona un interfaz gráfico para desarrollar diagramas GRAFCET 100% conforme a la norma IEC 60848 [9]. Por lo tanto, los diseñadores sólo necesitan centrarse en el contenido

y no en el léxico y la sintaxis de GRAFCET porque SFCEdit ofrece las directrices necesarias.

SFCEdit permite exportar GRAFCETs a los formatos XML, WMF y EMF. En el presente trabajo el archivo XML exportado es el punto de partida para la generación del código de control correspondiente en el lenguaje de programación ST de acuerdo a la norma IEC 61131-3.

Como marco de desarrollo, ha sido seleccionado el IDE de Eclipse [5]. Este entorno de desarrollo de código abierto y multiplataforma, proporciona un potente editor visual, un excelente motor de depuración y una interfaz gráfica de usuario flexible. Pero también es un sistema de plug-in extensible.

Aunque Eclipse soporta múltiples lenguajes, Java y XML se han utilizado para el desarrollo del prototipo, ya que Java proporciona código portable, mientras que XML proporciona datos portables. Como parser para documentos XML en Java se ha utilizado SAX(Simple API for XML) [16].

En los siguientes subapartados se presenta el esquema XML de SFCEdit y la generación del proyecto de automatización.

#### 4.1 ESQUEMA XML DE SFCEDIT

El léxico y sintaxis de dicho fichero se presenta en la Figura 3. El elemento raíz es el proyecto (*project*). Cada proyecto está compuesto al menos por un GRAFCET (*grafcet*) caracterizado por un identificador, tipo (normal, macro o enclosure) y opcionalmente un comentario.

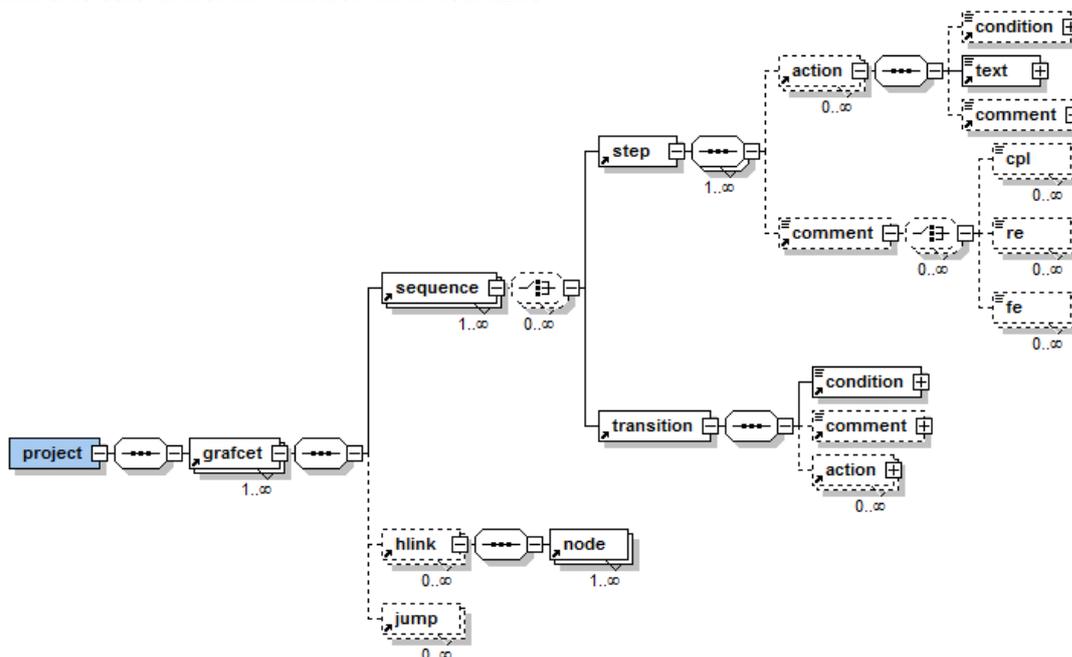


Figura 3: Léxico y sintaxis del editor SFCEdit

Un grafcet está formado por un conjunto de secuencias (*sequences*) y puede incluir enlaces horizontales (*hlink*) y saltos (*jump*) entre secuencias.

Normalmente las secuencias están formadas por un conjunto ordenado de pasos (*step*) y transiciones (*transition*). Un paso se caracteriza por su identificador, tipo (inicial, final, macro, task, enclosing o inicial enclosing), y opcionalmente un comentario (*comment*) y una lista de acciones (*action*). Las acciones incluyen el tipo (normal, a la activación, a la desactivación, condicional, forzado, por evento) dependiendo del modo y el instante en el que se deben ejecutar, la descripción textual (*text*), y opcionalmente comentarios (*comment*) y la condición (*condition*) en caso de tratarse de una acción condicional. Las transiciones deben tener obligatoriamente una condición (*condition*), y opcionalmente un comentario (*comment*) y una lista de acciones (*action*).

Los enlaces horizontales identifican la secuencia que enlazan mediante el atributo "seqid" y la lista de nodos (*node*) que al menos debe contener la identificación de dos secuencias "seqid". Se pueden identificar cuatro tipos de enlaces horizontales: divergencia en Y (*div and*), divergencia en O (*div or*), convergencia en Y (*conv and*) y convergencia en O (*conv or*).

Los saltos deben identificar la secuencia origen "seqid\_from" y la secuencia destino "seqid\_to".

```
<grafcet type="normal" owner="" name="GExample" comment="">
  <sequence id="1">
  </sequence>
  <sequence id="2">
    <step type="normal" name="X2" />
  </sequence>
  <sequence id="3">
  </sequence>
  <sequence id="4">
  </sequence>
  <sequence id="5">
  </sequence>
  <sequence id="6">
    <step type="normal" name="X7" />
  </sequence>
  <sequence id="7">
  </sequence>
  <hlink type="div and" seqid="1">
  </hlink>
  <hlink type="div or" seqid="2">
  </hlink>
  <hlink type="conv or" seqid="6">
  </hlink>
  <hlink type="conv and" seqid="7">
  </hlink>
  <jump seqid_from="7" seqid_to="1" />
</grafcet>
<grafcet type="normal" owner="" name="Grafcet" comment="">
</grafcet>
```

Figura 4: XML del GRAFCET GEjemplo

En la Figura 4 se presenta el fichero XML generado con SFCedit para el GRAFCET GEjemplo y en la Figura 5 se identifican gráficamente las distintas secuencias (en elipses), los tipos de enlaces

horizontales (DY, CY, DO y CO) con sus conexiones y el código XML correspondiente a una secuencia, un enlace horizontal (convergencia en Y) y un salto.

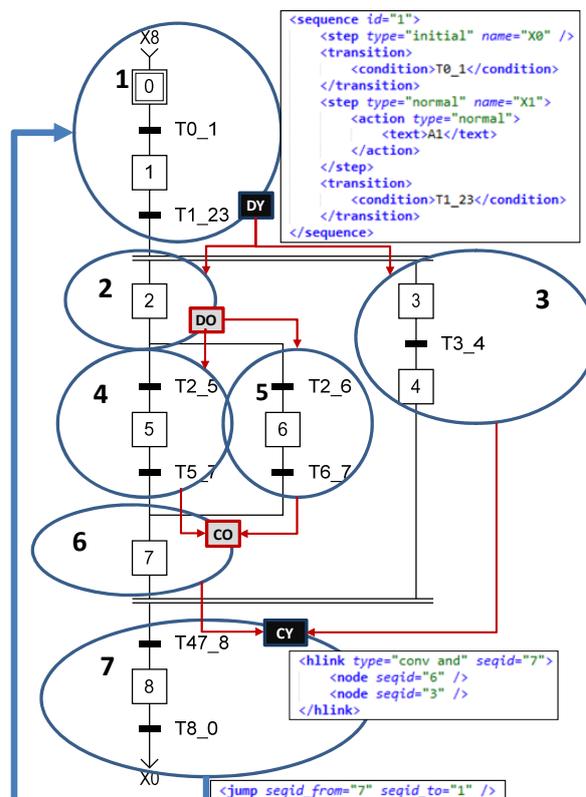


Figura 5: Relación entre el GRAFCET GEjemplo y los elementos definidos en el fichero XML

## 4.2 GENERACIÓN DE CÓDIGO

La generación del código de control comienza con la validación del fichero XML con el esquema ValidarGrafcet.xsd que presenta dos restricciones al esquema propuesto por SFCedit: (1) siempre va a existir al menos un salto, y (2) las transiciones no disponen de lista de acciones.

Partiendo del fichero validado se genera el proyecto de automatización, que consta de un conjunto de POU's (bloques funcionales) correspondientes a la parte secuencial, un POU principal (programa) de la parte combinacional y la definición del conjunto de variables del proyecto.

En lo que respecta a la parte secuencial, en primer lugar hay que construir la "Tabla de Set-Reset de las etapas".

La parte correspondiente al Set se realiza identificando los predecesores de cada etapa. Si la etapa es el primer elemento de una secuencia, el predecesor puede ser un enlace horizontal (divergencia en Y o convergencia en O) o un salto,

teniendo que buscar la-s transición-es y etapa-s en secuencia-s predecesora-s. Pero, si la etapa no es el primer elemento de la secuencia, la transición predecesora se encuentra en la propia secuencia y la-s etapa-s predecesora-s de esta transición se pueden encontrar en la propia secuencia o en secuencia-s predecesora-s.

La parte correspondiente al Reset se realiza identificando los sucesores de cada etapa. Si la etapa es el último elemento de una secuencia, el sucesor puede ser un enlace horizontal (convergencia en Y o divergencia en O) o un salto, teniendo que buscar la-s etapa-s en secuencia-s sucesora-s. Pero, si la etapa no es el último elemento de la secuencia, la-s etapa-s sucesora-s se encuentran en la propia secuencia o en secuencia-s sucesora-s.

Con la información recopilada se programa un bloque funcional por cada GRAFCET, que consta de la declaración de variables y un conjunto de sentencias IF-THEN que evalúan la activación y desactivación de cada una de las etapas.

En cuanto a la parte combinacional, el programa consta de un conjunto de variables, las instancias a cada uno de los POU's que implementan la parte secuencial y la programación de las acciones.

Para cada acción relacionada con las salidas se programa una única sentencia de asignación, en la cual figuran todas las etapas en las que aparece dicha acción (condicionada si es el caso) enlazadas por el operador OR.

Para las acciones relacionadas con contadores se programan la carga de los contadores y su actualización (incremento, decremento) identificando las etapas que suscitan dichas acciones. De la misma forma se tratan las acciones relacionadas con la carga y activación de los temporizadores.

En cuanto a las variables del proyecto, en primer lugar se realiza su identificación en el fichero XML: las variables de etapa (booleanas) son los identificadores de las mismas; las salidas, entradas y señales de control se identifican en las condiciones de las transiciones y en las acciones; las variables asociadas a los temporizadores, contadores, etc. se identifican teniendo en cuenta los prefijos específicos que se utilizan en su denominación.

Una vez identificadas, hay que definir las indicando el tipo de variable (entrada, salida, memoria, constante y sistema) y tipo de dato (bool, Word, doubleword, etc.). Del mismo modo es necesario indicar el tipo de contador (CTD, CTU o CTDU) y de temporizador (TON, TOF o TP). La Figura 6 muestra el interfaz para realizar la definición de variables.

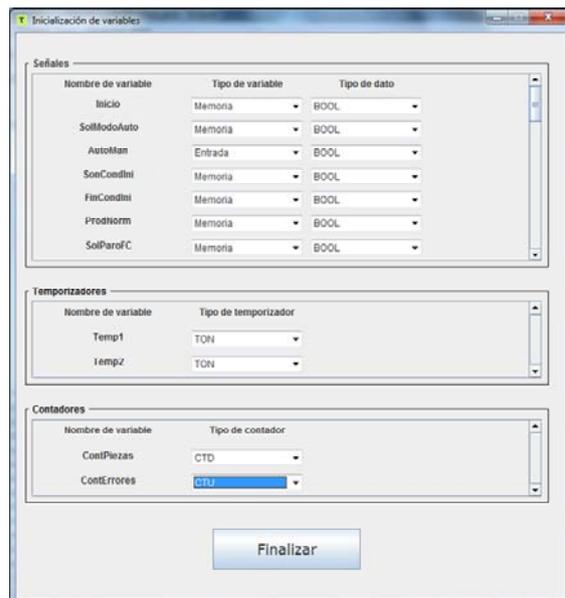


Figura 6: Interfaz de usuario para la definición de variables.

## 5 CASO DE ESTUDIO

El prototipo de la herramienta [15] se ha aplicado en la generación del código de todos los ejemplos que están disponibles en el curso abierto “MeiA. Metodología para ingeniería de Automatización. Nivel de Diseño” [3]. A modo de ejemplo se presenta la generación de código correspondiente al proceso “Transferencia de Piezas”.

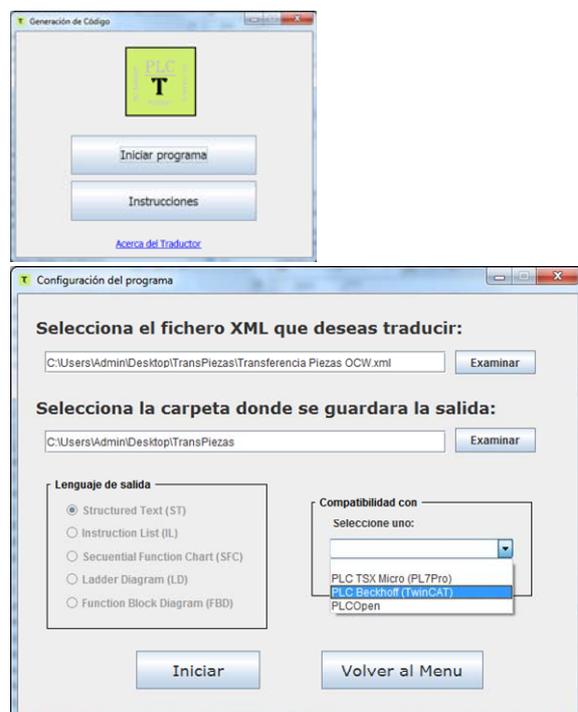


Figura 7: Interfaz inicial del prototipo.

Tal y como se muestra en la Figura 7, la generación de código comienza con la selección del fichero XML, del directorio destino de los ficheros resultantes y el PLC destinatario. A continuación se realiza la definición de variables tal y como se muestra en la Figura 6.

A modo resumen, la Figura 8 presenta el DOU correspondiente a la Secuencia Principal, el fichero XML generado por SFCEdit y la generación de código correspondiente que incluye el bloque funcional, el programa y la definición de variables para dicho DOU.

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un método de generación del proyecto de automatización a partir de los GRAFCET de diseños desarrollados a nivel tecnológico, que se han obtenido con la metodología MeiA, y generado con la herramienta que le da soporte. Para validar el método se ha desarrollado un prototipo que genera un conjunto de POU's (bloques

funcionales) correspondientes a la parte secuencial, un POU principal (programa) de la parte combinacional y la definición del conjunto de variables del proyecto. El código de control se ha generado en texto estructurado de acuerdo con la norma IEC 61131-3.

La generación del código de control permite reducir de forma considerable el tiempo de implementación de los programas de PLCs y proporciona una significativa reducción de los errores de implementación. Además, los POU's generados presentan una estructura sencilla de entender por los programadores de PLCs, lo cual facilita las futuras tareas de mantenimiento.

El trabajo futuro contempla la ampliación del prototipo para poder generar código de control en los restantes lenguajes de programación de la norma IEC 61131-3. También se pretende utilizar el enfoque de la ingeniería basada en modelos para realizar un prototipo que pueda ser integrado en el entorno MeiA.

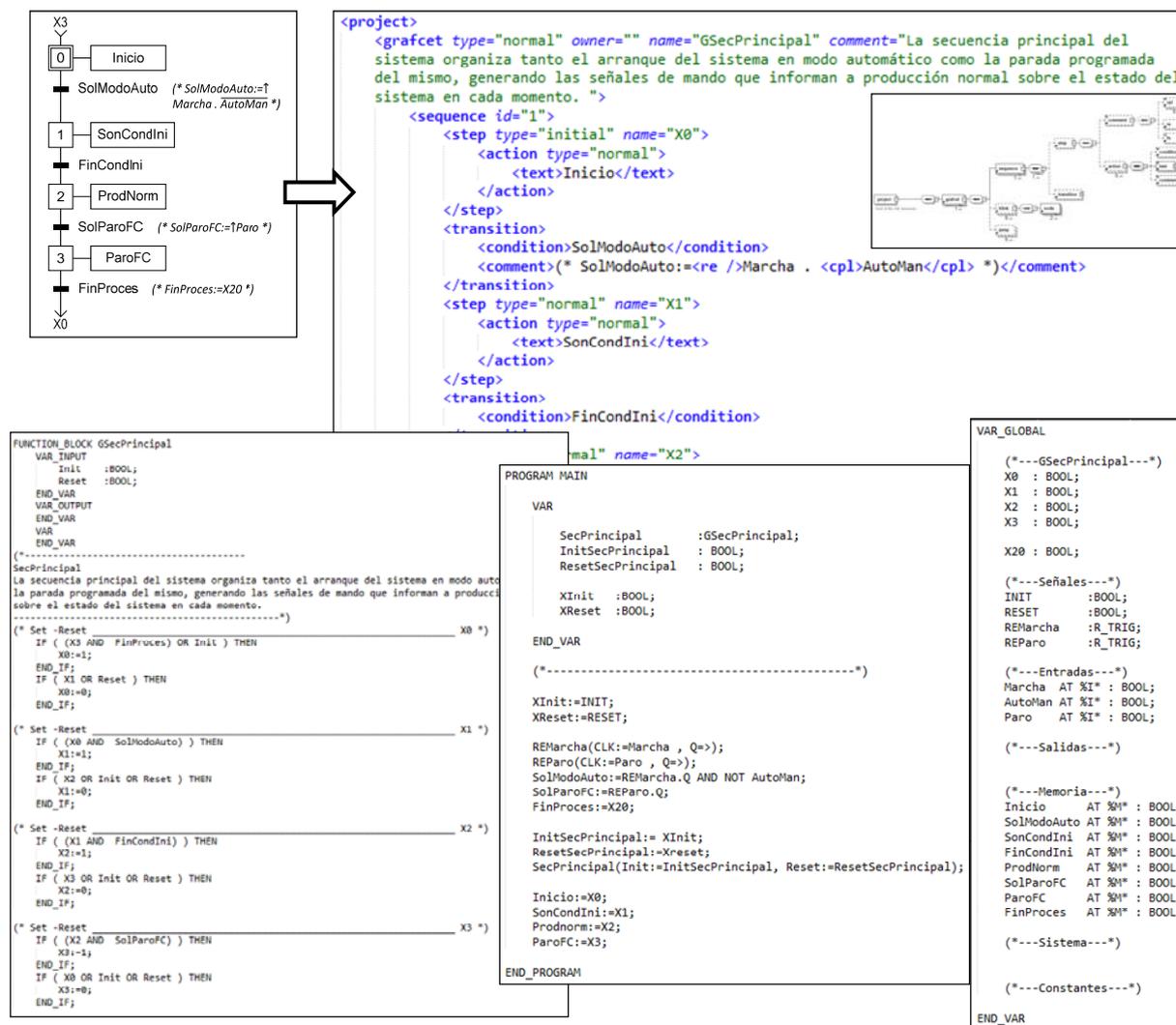


Figura 8: Generación de código del DOU Secuencia Principal del ejemplo Transferencia de Piezas

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto DPI2015-68602-R (MINECO/FEDER, UE), por la UPV/EHU en el marco del proyecto PPG17/56 y GV/EJ en el marco de grupos de investigación reconocidos IT914-16.

## Referencias

- [1] Álvarez, M. L., Estévez, E., Sarachaga, M. I., Burgos, A., Marcos, M., (2013) A novel approach for supporting the development cycle of automation systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, pp 711-725.
- [2] Álvarez, M. L., Sarachaga, I., Burgos, A., Estévez, E., Marcos, M., (2016) A Methodological approach to model-driven design and development of Automation Systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, pp. 1-13.
- [3] Álvarez, M.L., Burgos, A., Sainz de Murieta, J.A., Sarachaga, M.I. (2017) Curso OCW: **MeiA**. Metodología para ingeniería de Automatización. Nivel de Diseño. <https://ocw.ehu.es/course/view.php?id=415>
- [4] David, R., (1995) Grafcet: A powerful tool for specification of logic controllers. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 3 (3), pp. 253-2.
- [5] Eclipse. (2003) Eclipse IDE. Retrieved from <http://www.eclipse.org/>
- [6] Feio, R., (2017) Translating IOPT Petri net models into PLC ladder diagrams.. *Industrial Technology (ICIT), IEEE International Conference*
- [7] González, V. M., Mateos, F., & Ng, A. (2004). MLAV: the Object-oriented Methodology of the Virtual Automation Lab. in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5153-5158.
- [8] IEC, (2003) IEC 61131-3 Programmable Controllers — Part 3: Programming languages, *International Standard Edition 3.0*.
- [9] IEC 60848, (2013) International Electrotechnical Commission - GRAFCET specification language for sequential function charts.
- [10] Julius, R., Schürenberg, M., Schumacher, F., Fay, A., (2017) Transformation of GRAFCET to PLC code including hierarchical structures. *Control Engineering Practice*.vol 64, pp. 173-194.
- [11] Lukman, T., Godena, G., Gray, J., Hericko, M., Strmcnik, S., (2013) Model-driven engineering of process control software – beyond device-centric abstractions *Control Engineering Practice*, 21 (8), pp. 1078–1096.
- [12] Markiewicz, M., Surdej, L., Gniewek, L., (2016) Transformation of a fuzzy interpreted Petri net diagram into structured text code. *21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*,
- [13] Murillo, L., (2008) Redes de Petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables. *Tecnología en Marcha*, 21 (4), pp. 102-125.
- [14] Panjaitan, S., (2010) A Formal Design of Automation Systems based on Operation Modes using High-level Petri Net. *Second International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies* , pp. 129-131.
- [15] Paz, H., (2016) Prototipo de la Herramienta de generación de código. <https://github.com/HPaz001/translator>
- [16] SAX (Simple API for XML). <http://www.saxproject.org/>.
- [17] Schumacher, F., Fay, A., (2014) Formal representation of GRAFCET to automatically generate control code *Control Engineering Practice*, 33, pp.84–93.
- [19] SFCEdit, (2010) Ingénierie en automatisme et informatique industrielle
- [20] Thramboulidis, K., Frey, G., (2011) Towards a model-driven IEC 61131-based development process in industrial automation *Journal of Software Engineering and Applications*, 4 (4), pp. 217–226.