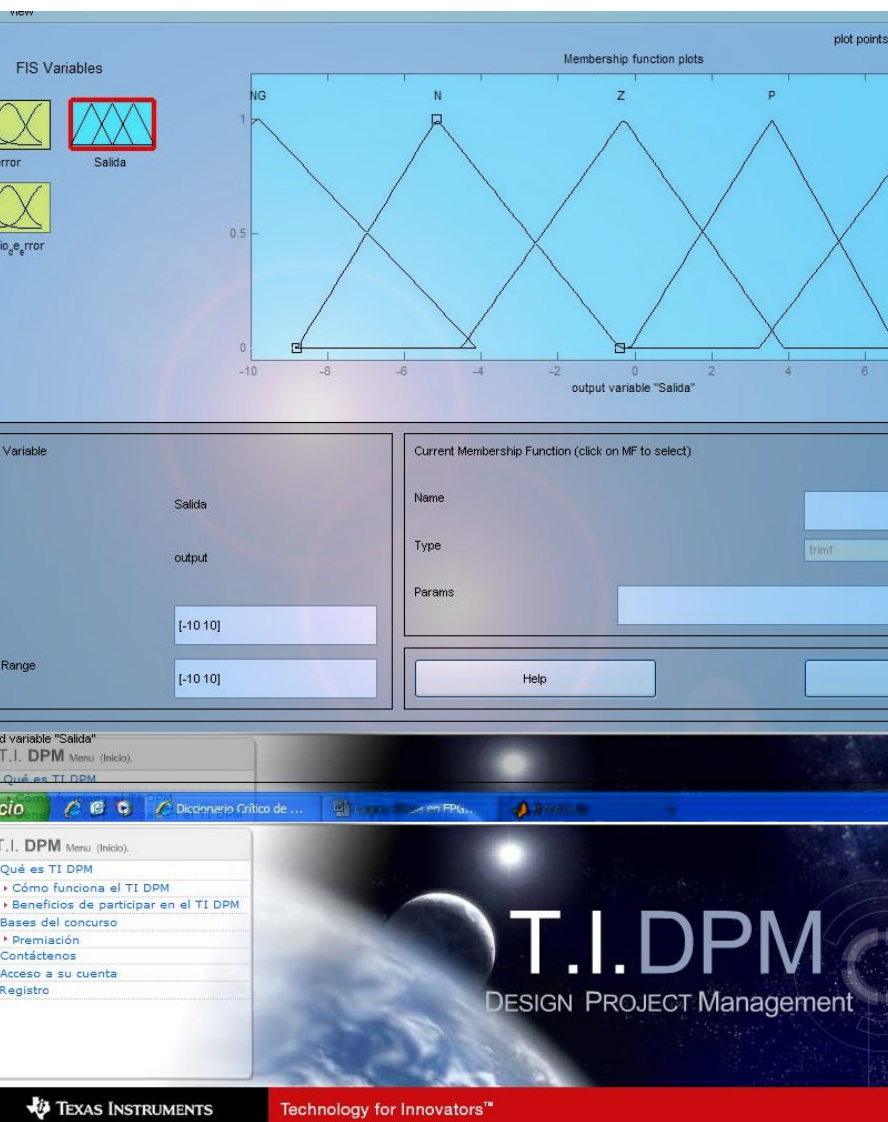


*DIF U<sub>100</sub>ci@*

**Revista de Difusión Científica**

Vol. 1, No. 1, mayo-agosto 2007

ISSN 2007-3585



## Texas Instruments Design Project Management

V. Vázquez

## Plasma, el Cuarto Estado de la Materia

N. Y. Mendoza

## Lógica Difusa en FPGA

J. A. Olivas et al.

## VHDL: Tendencia Tecnológica para Controladores Digitales

I. Millán et al.

ISSN 2007-3585



# Extenso Catálogo de Productos Analógicos

## High-Performance Analog >> Your Way™

### AMPLIFICADORES

- Amps de Audio
- Buffers
- Amps. de diferenciación
- Amps. de Alta velocidad
- Amps. de instrumentación
- Amps. de aislamiento
- Amps. Logarítmicos
- Op-Amps de bajo voltaje
- Op-Amps de potencia
- Op-Amps de precisión
- Amps. de ganancia programable
- Amps. de video

### CONVERTIDORES DE DATOS

- ADCs de Audio
- ADCs Delta-Sigma
- ADCs Pipeline
- ADCs SAR
- DACs de Audio
- DACs Delta-Sigma
- DACs de Precisión
- DACs de propósito general
- SRCs de Audio
- Sistemas de adquisición de datos
- Moduladores/Filtros

### MANEJO DE POTENCIA

- Manejo de baterías
- Controladores de switcheo DC/DC capacitivos
- Convertidores de switcheo DC/DC inductivos
- Potencia digital
- Controladores para displays Hot Swap
- Controladores para LEDs
- Reguladores Lineales
- Controladores MOSFET
- Módulos Plug-In
- Factor de corrección de Potencia

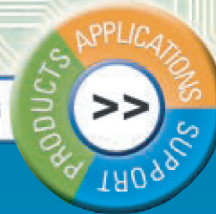
### INTERFASE

- 1394 (FireWire)
- CAN
- Protección de Circuitos
- Aisladores digitales
- Interfase para displays
- LVDS/LMVDS
- PCIe/PCI
- RS-485, 232 & 222
- SCSI
- Serializadores
- Deserializadores
- Transceivers
- UARTs
- USB

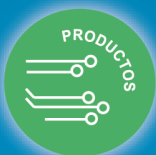
### RF Y COMPONENTES ANALÓGICOS

- Transmisores 4-20mA
- MUXs Analógicos
- Relojes y Timers
- Comparadores
- Monitores de desviación de corriente
- Conv. Digitales de Subida
- Conv. Digitales de Bajada
- Banda ISM
- Referencias
- Switches
- Sensores de Temperatura
- Zigbee™

HIGH-PERFORMANCE ANALOG



YOUR WAY



**Productos** avanzados que cumplen con los requerimientos de funcionamiento de tus diseños>> Desde amplificadores y convertidores, hasta productos de interfase y potencia, TI cuenta con ICs analógicos de alto desempeño para cubrir tus necesidades.



**Conocimiento de aplicaciones** para hacer el proceso de tus diseños más fácil>> Porque TI desarrolla ICs analógicos y digitales a lo largo del mundo y para una amplia gama de aplicaciones, tenemos conocimiento sobre sistemas completos y te podemos apoyar durante todo el proceso de tu diseño



**Sopote técnico analógico local** para tus diseños>> La infraestructura mundial de soporte técnico analógico incluye la red de ingenieros de aplicaciones analógicas más extensa.

[www.ti.com/analog](http://www.ti.com/analog)  
[www.ti.com/espanol](http://www.ti.com/espanol)  
**Soporte Técnico: 01 800 670 75 44**

HIGH-PERFORMANCE ANALOG>>YOUR WAY, Technology for innovators y el banner rojo-negro, son marcas registradas de Texas Instruments

Technology for Innovators™

 **TEXAS INSTRUMENTS**

---

PRODUCCIÓN  
**Universidad Autónoma de Zacatecas**

PRODUCCIÓN Y DISEÑO

**Gerardo Miramontes de León**

**D.R. de la Presente Edición**

**Gerardo Miramontes de León**  
**Universidad Autónoma de Zacatecas**  
**López Velarde 801, Centro**  
**98000 Zacatecas, Zac. México**

**ISSN 2007-3585**

**DIFU100ci@ (léase difucencia) Vol. 1, No. 1, mayo-agosto 2007, es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Autónoma de Zacatecas, "Francisco García Salinas", Jardín Juárez 147, Col Centro Zacatecas, Zac. C.P. 98000. [www.uaz.edu.mx/gmiram/Revista.htm](http://www.uaz.edu.mx/gmiram/Revista.htm). correo-e: [gmiram@ieee.org](mailto:gmiram@ieee.org). Reservas de Derechos al Uso Exclusivo del Título expedido por el INDAUTOR, Reserva: 04-2010-110314331900-102. Responsable de la última actualización Gerardo Miramontes de León, López Velarde 801, Zona Centro, Zacatecas, Zac. C.P. 98000. Fecha de última modificación 30 de mayo de 2012.**

HECHO EN MÉXICO  
MADE IN MEXICO

---

## DIRECTORIO

---

M. en C. Francisco Javier Domínguez Garay Rector  
I. Q. Armando Silva Cháirez Secretario General  
M. en C. Jesús Octavio Enriquez Rivera Secretario Académico  
M. en A Emilio Morales Vera Secretario Administrativo  
Dra. Isabel Terán Elizondo Coord. Investigación y Posgrado  
Dr. Luis Alejandro Aguilera Galaviz Coord. de Investigación  
Dr. Diego Miramontes de León Coord. de Posgrado

---

## CONSEJO EDITORIAL

---

Leonardo Acho Zuppa, U Politècnica de Catalunya, España  
Miguel Andrés, U. de Valencia, España  
Pedro Andrés, U. de Valencia, España  
Luis Tupak Aguilar, CITEDI-IPN, México  
David H. Covarrubias Rosales, CICESE, México  
Ernesto García Domínguez, U. Autónoma de Zacatecas  
Luis García Santander  
U. de Concepción, Chile  
Geminiano D. Martínez Ponce, CIO, México  
Lyle E. McBride, CSU, Chico USA  
Oscar Montiel, CITEDI-IPN, México  
Claudia Sifuentes Gallardo, U. Autónoma de Zacatecas

---

## Contenido

Vol. 1, No. 1, mayo-agosto 2007

### EDITORIAL

#### **Difusión y Desarrollo Tecnológico** 7

En este número se continúa con el esfuerzo de difusión de temas de ciencia y tecnología, y se recibe nuevamente el apoyo de investigadores de prestigiadas instituciones.

### DIFUSIÓN

#### **T. I. Design Project Management** 8

por Verónica Vázquez pp. 8 – 9

En este artículo se hace una breve descripción de una iniciativa, auspiciada por el Programa Universitario de Texas Instruments, que busca vincular proyectos de desarrollo tecnológico que se desarrollen en las universidades con empresas existentes, o bien, la creación de nuevas empresas o negocios. Con este fin se propone una herramineta en línea denominada Texas Instruments Design Project Management, o TLDPM.

#### **Plasma, el Cuarto Estado de la Materia** 10

por N. Y. Mendoza pp. 10 – 15

En este trabajo se presenta un introducción a la física de plasmas. Se presentan algunos conceptos fundamentales así como algunos parámetros básicos que describen este estado de la materia.

#### **VHDL: Tendencia Tecnológica para Controladores Digitales** 15

por Ismael Millán et al. pp. 15 – 22

En este artículo se presenta una perspectiva de las aplicaciones que pueden elaborarse mediante VHDL, resaltando todas las características que pueden contribuir al desarrollo de nuevos avances tecnológicos. Control automático es un área de la ciencia, en la cual VHDL tiene grandes posibilidades de aplicación, por ello en este artículo se dará un panorama de la utilidad que tiene dicho lenguaje y Control.

---

## **Lógica Difusa en FPGA** **23**

por J. A. Olivas et al. pp. 23 – 30

En este artículo se explican algunas características de lógica difusa y de la plataforma FPGA, así como algunos lenguajes de programación para FPGA; se mencionan también algunas aplicaciones de lógica difusa en FPGA y su auge dentro de las investigaciones actuales; se presentan algunas herramientas que facilitan el trabajo para esta tecnología.

---



## Difusión y Desarrollo Tecnológico

**H**ACE más de un año que iniciamos el proyecto de crear un medio de difusión de la ciencia y la tecnología. Este medio pretende dar a conocer lo que se estudia, se trabaja, y se desarrolla en nuestro entorno. En varias ocasiones ha sido reconocido el hecho de que no conocemos, a ciencia cierta, lo que se hace en nuestras instituciones y muchas veces, sobre todo en este país, se duda que se haga algo. Lo anterior, creemos, se debe en mucho a la falta de difusión y también, por qué no decirlo, a la falta de interés de quienes nos rodean. Para mantener este proyecto se requiere de mucha colaboración. Afortunadamente, el apoyo a los esfuerzos académicos siempre llega. Recibimos el apoyo de prestigiosos colaboradores de esta revista, tanto en el Consejo Editorial como en los artículos de este número. Contamos con investigadores de reconocidas instituciones de educación superior, y la participación de Verónica Vázquez del Programa Universitario de Texas Instruments.

Nos sentimos honrados por el apoyo a este esfuerzo y esperamos sea el esfuerzo de muchos. Cabe destacar que se ha obtenido más respuesta positiva a estos proyectos por académicos de otras instituciones y de Cuerpos Académicos de otras facultades. Confiamos que cada vez, con más convicción, sea reconocida la necesidad de difundir el conocimiento de la ciencia y el desarrollo tecnológico, y de intercambiar, por este medio, iniciativas que apoyen nuestro desarrollo tecnológico.

En este número, se incluye una propuesta que trata precisamente de apoyar el vínculo entre lo que se aprende en la formación universitaria y su aplicación a proyectos de desarrollo tecnológico y de negocios. Texas Instruments, a través del Programa Universitario, lanza todo un proyecto que esperamos tenga el mayor de los éxitos. Por otra parte, se incluyen dos trabajos del Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital-IPN, ampliando nuestro conocimiento sobre algunas herramientas de desarrollo de sistemas digitales. Además, contamos con una participación internacional a cargo de Norma Mendoza de la Universidad de Sherbrooke de Québec en Canadá.

Quisieramos aprovechar para invitar a todos aquellos interesados en difundir el trabajo y el esfuerzo que desde cada centro de investigación y cada laboratorio de una universidad se hace día a día, para que al hacerlo motivemos el esfuerzo compartido de darle futuro a este proyecto de difusión y para que desde aquí se puedan dar más esfuerzos como el de Texas Instruments por incentivar el desarrollo de nuevos proyectos.

© agosto 2007 G. Miramontes

DIFU100ci@ (léase difuciencia) es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Autónoma de Zacatecas, Jardín Juárez 147, Col Centro Zacatecas, Zac. Tiene como objetivo difundir conocimientos científicos y tecnológicos del área de la ingeniería, a través de artículos de divulgación y artículos que muestren temas de investigación.

### EDITOR EN JEFE

Gerardo Miramontes de León  
U. Autónoma de Zacatecas

### CONSEJO EDITORIAL

[Leonardo Acho Zuppa](#)

U. Politècnica de Catalunya  
España

[Miguel Ándres](#)

U. de Valencia, España

[Pedro Ándres](#)

U. de Valencia, España

[Luis Tupak Aguilar](#)

CITEDI-IPN, México

[David H. Covarrubias Rosales](#)

CICESE, México

[Ernesto García Domínguez](#)

U. Autónoma de Zacatecas

[Mireya Sara García Vázquez](#)

CITEDI-IPN, México

[Luis García Santander](#)

U. de Concepción, Chile

[Geminiano D. Martínez Ponce](#)

CIO, México

[Lyle E. McBride](#)

CSU, Chico USA

[Oscar Montiel](#)

CITEDI-IPN, México

[Claudia Sifuentes Gallardo](#)

U. Autónoma de Zacatecas

# T. I. Design Project Management

Verónica Vázquez

## T. I. Design Project Management

Recibido: marzo 12, 2007

Aceptado: julio 17, 2007

Palabras clave: administración de proyectos, diseño de productos, DSPs

### Abstract:

*This article provides a brief description of an initiative sponsored by the Texas Instruments University Program, which seeks to link technology development projects that are developed at universities with existing businesses, or creating new companies or businesses. To this end, Texas Instruments proposes an online tool called the Texas Instruments Design Project Management, or TI\_DPM.*

**Keywords:** project administration, product design, DSPs



TEXAS Instruments es una compañía líder en la producción de DSPs, MCUs y productos analógicos. Desde hace 10 años ha promovido el programa universitario en territorio mexicano, con lo que ha hecho grandes convenios con distintas instituciones educativas para el desarrollo de tecnología, al proveer herramientas que impulsen el diseño en México.

El objetivo del Programa Universitario es el facilitar y promover la adopción de la tecnología líder en semiconductores dentro de los programas de estudio de ingeniería e investigación.

Siguiendo esta línea, Texas Instruments lanza una iniciativa que pretende impactar directamente en la creación de nuevas empresas y en la solución de necesidades actuales que la industria requiere.

Texas Instruments Design Project Management (TI DPM) es una herramienta en línea para la administración de proyectos de diseño electrónico con el objetivo de proveer una experiencia real a los alumnos en lo referente a diseño de productos.



Figura 1. Pantalla de ingreso al TI\_DPM.

El TI DPM es una oportunidad para adquirir conocimientos especializados que difícilmente se podrán adquirir en una carrera universitaria. El ciclo de producción completo de un producto se palpa mediante este proyecto, el cual abarca desde su concepción hasta la entrega de la unidad terminada. Texas Instruments proporcionará a los estudiantes de licenciatura una herramienta completa y profesional para la administración de proyectos de diseño. TI propondrá las aplicaciones en las que los equipos de las universidades trabajarán, todas ellas incluyen DSPs o MCUs de esta compañía. Las aplicaciones están basadas en necesidades reales de la industria, para lo cual TI convocará a empresas locales a participar mediante dos principales formas: aportando necesidades y posteriormente capacitando con conocimientos especializados a los equipos que estén trabajando en su aplicación.

Elegir el producto a desarrollar, el objetivo del mismo y/o la necesidad a satisfacer, pensar en el mercado al que se enfocará, hacer el análisis de dicho mercado y de la compe-



tencia a la que se enfrentan, el diseño del producto, costos y tiempo de producción, propiedad intelectual, registro de marca, estrategias de mercadotecnia a utilizar y trabajo en equipo, son sólo algunas de las fases que implica el desarrollo de un producto y que los alumnos aprenderán, en modo “hands-on”, a realizar.

La herramienta en línea del TI DPM, ayudará a administrar todas estas cuestiones, además de capacitar a los alumnos mediante tutoriales y foros con los que contará la herramienta, en donde los alumnos podrán compartir conocimientos e interactuar con miembros de la industria.

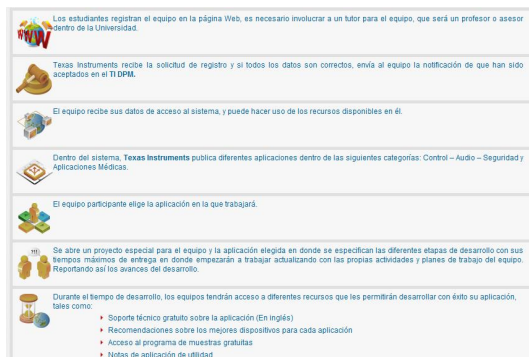


Figura 2. Descripción de las etapas de participación en el TI DPM.

El proyecto está definido en etapas, el ciclo completo pretende ser de un año, en donde el primer trimestre será de planeación, el segundo y tercer trimestre serán para la etapa de desarrollo y el cuarto trimestre se prevé para la entrega de resultados y productos terminados.

Otro de los objetivos del TI DPM, es impulsar la idea de crear empresas con los productos que desarrollen. Además, Texas Instruments pretende profundizar relaciones con las 120 universidades pertenecientes a su Programa Universitario; impulsar el uso de los más de 200 laboratorios de DSPs, MCUs y Analógicos que existen en el país, de los cuales, cabe destacar, Texas Instruments ha donado alrededor del 68% de las herramientas, herramientas que, con este proyecto, pretende monitorear.

Texas Instruments otorgará reconocimientos a la aplicación ganadora, entre las cuales destaca una constancia de la compañía, un viaje a la planta productora de semiconductores de TI en Aguascalientes, kits de desarrollo y capacitación, además de un donativo equivalente a 2 mil dólares a la universidad a la que pertenezca el equipo ganador.

Bases del concurso	
Premios	A quien va dirigido
Certificado de participación y reconocimiento oficial	A cada participante que entregue su proyecto funcional
Viaje a la planta de Texas Instruments en Aguascalientes (incluye viaje a la planta, tour, comida, estancia un day regreso)	A cada integrante del equipo ganador
Herramienta de desarrollo de DSPs (familia según aplicación)	A cada integrante del equipo ganador
Donativo de US\$2,000.00 en herramientas de desarrollo	A la universidad del equipo ganador
Beca para curso de 3 días de DSPs	A cada integrante del equipo ganador y su tutor
CCS versión platinum	A la universidad del equipo ganador
Placa de reconocimiento por parte de Texas Instruments	A la universidad del equipo ganador

Figura 3. Premios que otorga el TI DPM.

Los requisitos para participar son: ser estudiante de licenciatura, que la aplicación que escojan implique tecnología que ya tengan en el laboratorio de su universidad y que cada equipo tenga un maestro tutor.

## Acerca del autor o autores

Verónica Vázquez es encargada de las actividades del Programa Universitario, Marketing y Comunicaciones, y capacitación para México y Centroamérica. Ingeniera Electrónica egresada de la Universidad de Guadalajara en el año 2002.

En el año 2002 co-funda la empresa Marcom Logix, empresa dueña de la revista electrónica en línea [ElectronicosOnline.com](http://ElectronicosOnline.com) y el congreso para desarrolladores en México MexEEdev. Se incorpora en 2005 a Texas Instruments en México para llevar el Programa Universitario a nivel nacional con más de 120 Universidades y el Programa de Capacitación sobre DSPs, Microcontroladores y Componentes Analógicos con más de 30 eventos al año. Actualmente desarrolla también responsabilidades en actividades Marcom y Proyectos Especiales.

# Plasma, el Cuarto Estado de la Materia

Norma Yadira Mendoza González

## *Plasma, the fourth state of matter*

Recibido: abril 05, 2007

Aceptado: junio 27, 2007

Palabras clave: plasma, materia, física del plasma

### **Abstract:**

*This paper presents an introduction to the physics of plasmas. We present some fundamental concepts and some basic parameters that describe this state of matter.*

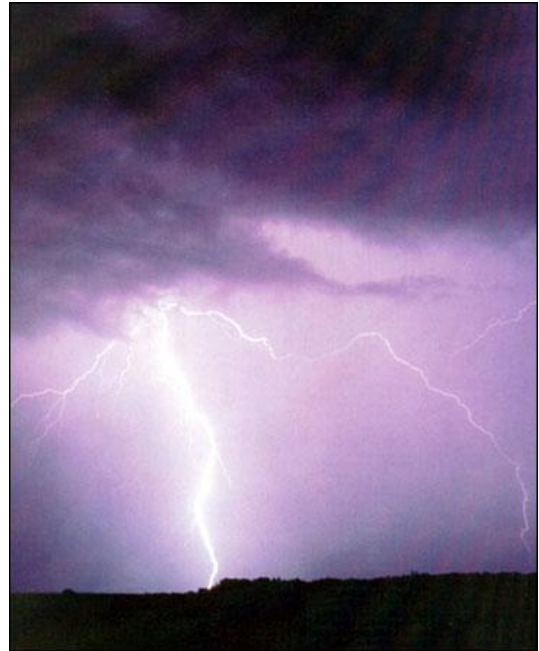
**Keywords:** plasma, matter, physics of plasma

**C**UANDO hablamos de los estados de la materia, pensamos inmediatamente en sólido, líquido y gas, pero no estamos muy familiarizados con el cuarto estado de la materia: el PLASMA. Los rayos y las auroras son algunos de los ejemplos naturales más comunes de plasmas. Así mismo, este estado de la materia ha sido reproducido artificialmente por el hombre desde hace algunas décadas. El interior de los bulbos fluorescentes es uno de los ejemplos más conocidos de plasma artificial. Actualmente, diversas universidades y centros de investigación de todo el mundo estudian y desarrollan la Tecnología de Plasmas. Este espacio presenta algunos de los conceptos más fundamentales de la ciencia del plasma, el vasto rango de aplicaciones y su profunda implicación en la ciencia y tecnología del siglo 21 así como en nuestra vida diaria.

-----

El interior de los bulbos fluorescentes es uno de los ejemplos más conocidos de plasma artificial.

-----



*Figura 1. El rayo es uno de los ejemplos más comunes de Plasma.*

## QUÉ ES EL PLASMA?

El plasma se presenta a altas densidades de energía y se puede definir como un gas ionizado que contiene moléculas, átomos, iones, electrones y fotones. El plasma es eléctricamente conductor debido a la existencia de iones y electrones libres, de igual manera, tiene una neutralidad eléctrica local, debido a que hay igual número de iones y electrones libres. El plasma se forma mediante la ionización de los átomos, que al romperse pierden su cubierta de electrones, los cuales se desplazan libremente. Esta materia, aparentemente artificial, existe de manera natural en la magnetosfera terrestre y en el sol, que incluso la lanza en violentas explosiones conocidas como viento solar.

El plasma se puede definir como un gas ionizado que contiene moléculas, átomos, iones, electrones y fotones.

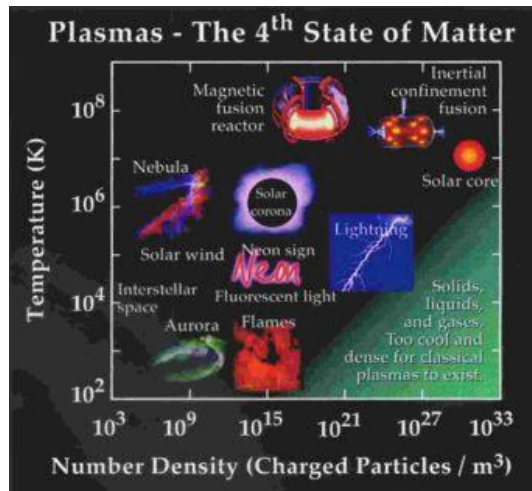


Figura 2. Esquema ilustrativo de la Física del Plasma.

La física del plasma es la base de nuestro conocimiento del Sol y las estrellas, de los espacios interestelares, las galaxias, los anuncios publicitarios de neón, los relámpagos y las auroras boreales, así como de las reacciones de fusión termonuclear controlada. Las interacciones eléctricas de largo alcance entre iones y electrones y los campos magnéticos externos o creados por corrientes eléctricas internas son los que dominan el plasma. La dinámica de estos sistemas es compleja ya que todo elemento en estado plasma presenta características concretas y definidas.

El concepto de plasma fue usado por primera vez por Irwing Langmuir (1881-1957), quien observó que los gases ionizados presentes en una descarga respondían colectivamente a las perturbaciones externas. Esta cualidad, análoga a la de los plasmas sanguíneos, le llevó a adoptar el término plasma para referirse a estos sistemas.

## CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Puesto que existen plasmas en contextos muy diferentes y con características muy diversas, la física del plasma de-

fine apropiadamente los parámetros que deciden el comportamiento de un plasma. El conocimiento de estos parámetros permite al investigador escoger la descripción más apropiada para su sistema. Los principales parámetros son los siguientes:

### Neutralidad y especies presentes

Generalmente, un plasma está formado por igual número de cargas positivas y negativas, lo que anula la carga total del sistema. En tal caso se habla de un plasma neutro o casi-neutro. También existen plasmas no neutros, como el flujo de electrones dentro de un acelerador de partículas, pero requieren algún tipo de confinamiento externo para vencer las fuerzas de repulsión electrostática.

Los plasmas más comunes son los formados por electrones e iones. En general pueden haber varias especies de iones dentro del plasma, como moléculas ionizadas (cationes) y otras que han capturado un electrón y portan una carga negativa (aniones).

### Longitudes

La longitud de Debye o de apantallamiento electromagnético ( $\lambda_D$ ) determina el rango típico de las interacciones electrostáticas de una determinada especie. Supongamos una cierta carga positiva presente en un plasma de electrones e iones. Los electrones serán atraídos y formarán una capa de carga negativa alrededor de ella. A partir de cierta distancia la carga habrá quedado neutralizada y no tendrá efectos apreciables. La longitud de Debye es una estimación de esta distancia. En un gas de electrones de densidad  $n_e$  y temperatura  $T$  tenemos

$$\lambda_D = \left( \frac{kT}{4\pi n_e^2} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

donde  $k$  simboliza la constante de Boltzmann.

Otra longitud importante en un plasma es el camino libre medio o la distancia media entre colisiones. Este parámetro y su comparación con la longitud de Debye determinan la importancia que hemos de dar a las colisiones en el modelo de nuestro sistema.

### La frecuencia de plasma

Así como la longitud de Debye proporciona una medida de las longitudes típicas en un plasma, la frecuencia de plasma

( $\omega_p$ ) describe sus tiempos característicos. Supóngase que en un plasma en equilibrio y sin densidades de carga se introduce un pequeño desplazamiento de todos los electrones en una dirección. Éstos sentirán la atracción de los iones en la dirección opuesta, se moverán hacia ella y comenzarán a oscilar en torno a la posición original de equilibrio. La frecuencia de tal oscilación es lo que se denomina frecuencia de plasma. La frecuencia de plasma de los electrones es:

$$\omega_{pe} = \left( \frac{4\pi n_e e^2}{m_e} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

donde  $m_e$  es la masa del electrón y  $e$  su carga.

### Temperatura: velocidad térmica

Por lo general las partículas de una determinada especie localizadas en un punto dado no tienen igual velocidad: presentan por el contrario una distribución que en el equilibrio térmico es descrita por la distribución de Maxwell-Boltzmann. A mayor temperatura, mayor será la dispersión de velocidades (más ancha será la curva que la representa). Una medida de tal dispersión es la velocidad cuadrática media que, en el equilibrio, se denomina también velocidad térmica. Es frecuente, aunque formalmente incorrecto, hablar también de velocidad térmica y de temperatura en plasmas lejos del equilibrio termodinámico. En tal caso, se menciona la temperatura que correspondería a una velocidad cuadrática media determinada. La velocidad térmica de los electrones es:

$$v_{T_e} = (kT_e/m_e)^{1/2}. \quad (3)$$

### El parámetro de plasma

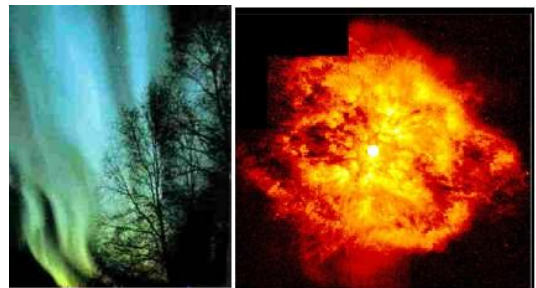
El parámetro de plasma ( $\Sigma$ ) indica el número medio de partículas contenidas en una esfera cuyo radio es la longitud de Debye (esfera de Debye). La definición de plasma, según la cual la interacción electromagnética de una partícula con la multitud de partículas distantes domina sobre la interacción con los pocos vecinos próximos, puede escribirse en términos del parámetro de plasma como  $\Sigma \gg 1$ . Esto es: hay un gran número de partículas contenidas en una esfera de Debye. Es común referirse a esta desigualdad como “condición de plasma”. Algunos autores adoptan una definición inversa del parámetro de plasma ( $g = 1/\Sigma$ ), con lo que la condición de plasma resulta ser  $g \ll 1$ . El parámetro

de plasma de los electrones es:

$$\Sigma = \frac{4\pi}{3} n_e \lambda_D^3. \quad (4)$$

## EJEMPLOS Y APLICACIONES DEL PLASMA

Con frecuencia se habla del plasma como un estado de agregación de la materia con características propias. Por plasma, sin embargo, algunos autores también entienden algunas partes de la ionosfera, especialmente la capa F, la cual refleja las ondas de radio y permite la comunicación por radio a través de la reflexión en la ionosfera. El plasma se encuentra en los cinturones radiantes de van Allen. El viento solar, una corriente ininterrumpida de partículas desde nuestro Sol, dentro de la cual también se encuentra nuestra Tierra, es también un plasma. En estado plasmático se encuentran los núcleos y atmósferas de las estrellas, el núcleo de nuestra galaxia, las nebulosas y la mayoría de los objetos en el Universo. En la Tierra nos encontramos con el plasma en los canales de los rayos, en diferentes descargas eléctricas y el plasma es también creado artificialmente e investigado en los laboratorios.

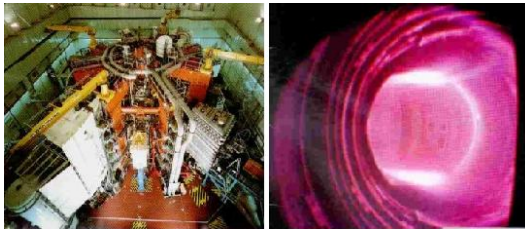


*Figura 3. Ejemplos de plasma espacial. Izquierda: Aurora Boreal Universidad de Alaska. Derecha: Nebular M1-67, viento de masa estelar - NASA.*



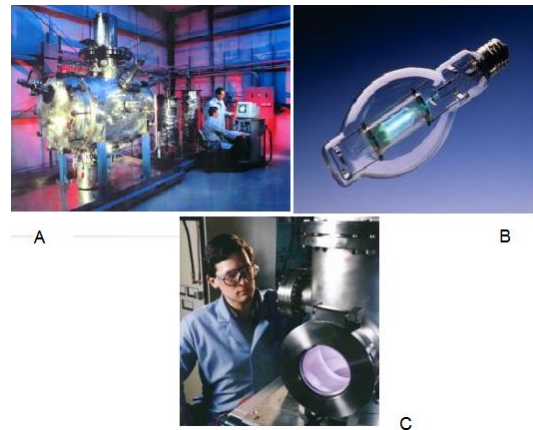
## Ejemplos de plasmas

- Plasmas producidos artificialmente
  - En el interior de los tubos fluorescentes
  - La región que rodea al escudo térmico de una nave espacial durante su entrada en la atmósfera
  - Reactores de confinamiento de plasma (fusión, RF, DC)
- Plasmas terrestres
  - Los rayos durante una tormenta
  - La ionosfera
  - La aurora boreal
- Plasmas espaciales y astrofísicos
  - Las estrellas (por ejemplo, el Sol)
  - Los vientos solares
  - El medio interplanetario
  - Las nebulosas intergalácticas



*Figura 4. Ejemplos de plasmas de fusión. Instalación del equipo de un reactor de fusión Tokamak. B. Interior de un reactor Tokamak en actividad.*

El alto contenido de energía en los plasmas comparado al de otros gases ordinarios (aun a las flamas de combustión de la más alta temperatura) ofrece un potencial ilimitado para su uso en un extenso número de aplicaciones industriales. Tras la Segunda Guerra Mundial el creciente interés en desarrollar reactores de fusión que proporcionaran una energía limpia, segura y barata alimentó un rápido avance de la física del plasma, esencial para entender el comportamiento de un gas a las altas temperaturas necesarias en el interior de tales dispositivos.



*Figura 5. Ejemplos de Tecnología Plasma. A. Equipo de reactor plasma para la destrucción de residuos peligrosos. B. Lámpara plasma de arco C. Procesamiento de materiales por plasma térmico.*

Actualmente la física del plasma es una disciplina madura y extensa. Sus herramientas son imprescindibles en la investigación astrofísica y geofísica; sus aplicaciones tienen una gran importancia económica y van desde la mencionada fusión nuclear hasta el tratamiento de materiales mediante descargas eléctricas, como es el caso de los Reactores de Radio Frecuencia (RF) y Corriente Directa (DC), estos dos últimos empleados también para la síntesis de nanopartículas. Otros usos industriales son el grabado de circuitos electrónicos y la purificación de emisiones contaminantes.

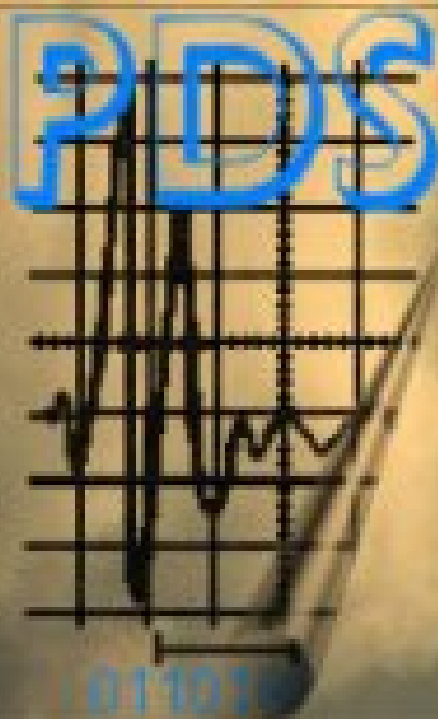
## Bibliografía

- [1] Maher I. Boulos, Pierre Fauchais, and Emil Pfender. Thermal plasmas: fundamentals and applications. Vol. I. New York Plenum Press, 1994.
- [2] Solonenko and M.F. Zhukov. Thermal plasma and new materials technology. Vol II. Cambridge Interscience Pub. 1995: fundamentals and applications. Vol. I. New York Plenum Press, 1994.
- [3] <http://www.plasmas.org/basics.htm>
- [4] <http://www.tekna.com/index.htm>
- [5] <http://www.plasmaquebec.ca>



## Acerca del autor o autores

Norma Yadira Mendoza González: Estudiante de Doctorado en el Centro de Investigación en Tecnologías de Plasma (CREPE) de la Universidad de Sherbrooke. Département de Génie Chimique Université de Sherbrooke, 2500 Boulevard Université Sherbrooke J1K 2R1, Québec- Canada.



# VHDL: Tendencia Tecnológica para Controladores Digitales

Ismael Millán Páez, Oscar Montiel, Roberto Sepúlveda

## *VHDL: technology trend for digital controllers*

Recibido: abril 05, 2007

Aceptado: junio 20, 2007

Palabras clave: VHDL, control automático

### **Abstract:**

*This article presents an overview of the applications can be developed using VHDL, highlighting all the features that can contribute to the development of new technological developments. Automatic control is an area of science, where VHDL has great potential for application, so in this article will give an overview of the usefulness of this language and Control.*

**Keywords:** VHDL, automatic control



LECTRONIC Design Automation (EDA), es el nombre que se le da a todas las herramientas de hardware y software en el diseño de sistemas electrónicos. Porque no sólo el software es importante, también lo es el hecho de que las computadoras cada día son más veloces y de mayor capacidad de procesamiento, lo cual influye en el proceso de diseño de circuitos electrónicos [1].

El diseño de hardware tiene un problema fundamental, que no existe en desarrollo de software. Este problema es el alto costo del ciclo diseño – desarrollo del prototipo – pruebas – reinicio del ciclo, ya que el costo del prototipo generalmente suele ser bastante elevado. Se impone la necesidad de reducir este ciclo de diseño para no incluir la fase de desarrollo del prototipo más que al final del proceso, evitando la repetición de varios prototipos que es lo que encarece el ciclo. Para ello se introduce la fase de simulación y verificación de circuitos utilizando herramientas EDA, de tal forma que no sea necesario implementar físicamente un

prototipo para comprobar el funcionamiento del circuito. En el ciclo de diseño de circuitos, las herramientas EDA están presentes en todas las fases. Primero en la fase de generación del sistema que puede representarse mediante un diagrama esquemático, a bloques o de flujo.

Se encuentran también en la fase de simulación y comprobación de circuitos, donde diferentes herramientas permiten verificar el funcionamiento del sistema. Estas simulaciones pueden ser de eventos, funcionales, digitales o eléctricas, de acuerdo al nivel de simulación requerido. Después están las herramientas EDA utilizadas en la síntesis y programación de circuitos digitales en dispositivos lógicos programables. Existen, además, las herramientas EDA orientadas a la fabricación de circuitos. En el caso del diseño de hardware estas herramientas sirven para la realización de PCBs (Printed Circuit Boards o placas de circuito impreso), o para desarrollar circuitos integrados de aplicación específica conocidos como ASICs (Application Specific Integrated Circuits). Este ciclo de diseño de hardware se muestra en la Figura 1 [1].

Los lenguajes de descripción de circuitos son aquellos mediante los cuales es posible describir el funcionamiento y estructura de un circuito eléctrico o digital. La descripción puede ser mediante bloques donde se muestra la arquitectura del diseño, o de comportamiento, es decir, se describe el funcionamiento del circuito en vez de especificar los elementos de los que está compuesto.

Hoy en día las aplicaciones electrónicas requieren de lenguajes de programación que sean sencillos y eficientes para la solución de problemas que en la actualidad están impactando al mundo electrónico. Una de las áreas en las cuales hay mucho desarrollo es Control, en la cual la utilización de este lenguaje resulta muy conveniente a la hora de tener requerimientos de programación fácil y velocidad en tiempo de ejecución de la aplicación ya programada. Son objetivos de este artículo mostrar aplicaciones de control que se pueden realizar mediante VHDL, así como motivar el uso de este lenguaje como una opción interesante para el desarrollo tecnológico.

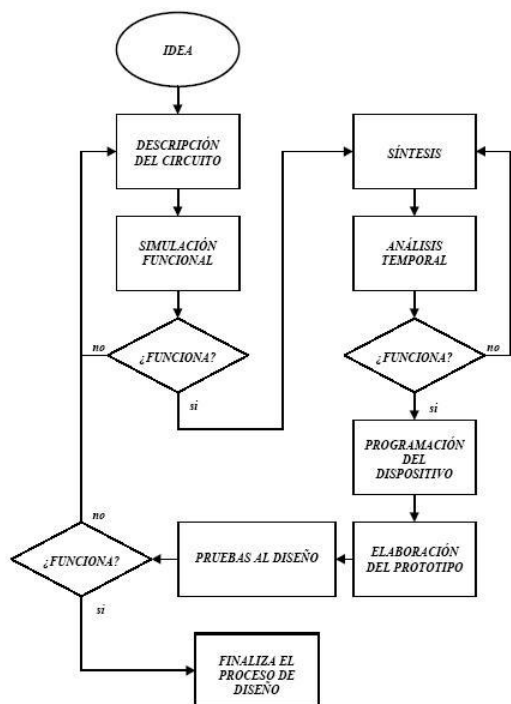


Figura 1. Diagrama de flujo para el desarrollo de sistemas electrónicos.

El lenguaje VHDL está creado específicamente para el diseño de hardware, es decir, podremos implementar con él multitud de circuitos lógicos, tanto combinacionales como secuenciales.

La actividad que se ha generado entorno a VHDL es muy intensa. En muchos países, entre ellos en España, se han creado grupos de trabajo en torno a VHDL. Se realizan reuniones periódicas con presentación de trabajos tanto en Estados Unidos (VIUF, VHDL International User's Forum) como en Europa (VHDL Forum for CAD in Europe), así como el congreso EuroVHDL que se celebra una vez al año. Todas las empresas que se dedican a la microelectrónica han ido paulatinamente adaptándose a VHDL. En Japón tiene una creciente aceptación, a pesar de que tienen su propio lenguaje estándar UDL/I. Siemens ha creado un 'VHDL

Center'. En resumen, el lenguaje está teniendo un impacto muy importante.

## QUÉ ES EL VHDL

VHDL es el acrónimo que representa la combinación de VHSIC y HDL, donde VHSIC es el acrónimo de Very High Speed Integrated Circuit y HDL es a su vez el acrónimo de Hardware Description Language [3]. Los estudios para la creación del lenguaje VHDL (VHSIC HDL) comenzaron en el año 1981, bajo la cobertura de un programa para el desarrollo de Circuitos Integrados de Muy Alta Velocidad (VHSIC), del Departamento de Defensa de los Estados Unidos. En 1983 las compañías Intermetrics, IBM y Texas Instruments obtuvieron la concesión de un proyecto para la realización del lenguaje y de un conjunto de herramientas auxiliares para su aplicación. Finalmente, en el año 1987, el lenguaje VHDL se convierte en la norma IEEE-1076 –como todas las normas IEEE, se somete a revisión periódica, por lo que en 1993 sufrió algunas leves modificaciones.

VHDL se ha diseñado para soportar diferentes metodologías de diseño ('top-down' frente a diseño basado en módulos) así como diferentes tecnologías de diseño (circuitos comerciales, microprocesadores, PLDs, FPGAs, ASICs, etc) con distinta funcionalidad (circuitos combinacionales, síncronos y asíncronos). De este modo, el lenguaje puede usarse por organizaciones con puntos de vista diferentes y satisface las necesidades de diseño distintas que puede tener el diseñador, el centro de diseño de ASICs, la fundición o el vendedor de herramientas CAD. VHDL es un lenguaje usado por ingenieros definido por el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) (ANSI/IEEE 1076-1993) que se usa para diseñar circuitos digitales. Existen métodos para diseñar circuitos son la captura de esquemas (con herramientas CAD) y los diagramas de bloques, pero éstos no son prácticos en diseños complejos. Otros lenguajes para el mismo propósito son Verilog y ABEL [2].

## Cómo se puede describir un circuito en VHDL

La forma de diseñar circuitos en VHDL se divide en tres categorías de acuerdo a su complejidad: funcional, flujo de datos y estructural [1]. Estos tres estilos de diseño se detallan a continuación.

### Funcional

El diseño es un poco más complicado ya que requiere de varias decisiones antes de definir los datos de salida correctos. Por lo que se requiere de una descripción algorítmica del funcionamiento del circuito para facilitar el diseño del sistema. En VHDL esto se obtiene expresando el funcionamiento del diseño mediante una estructura PROCESS la cual se compone de instrucciones secuenciales.

### Flujo de datos

En este estilo el diseño del circuito no es complicado por lo que basta con describir como fluyen los datos a través de la entidad, de las entradas hacia las salidas. La operación del sistema está definida en términos de un conjunto de transformaciones de datos expresadas como instrucciones concurrentes.

### Estructural

Una descripción estructural se utiliza en circuitos de más de una función, hablando en términos de hardware, para realizar la finalidad del sistema. Para ello segmentamos el sistema en subcircuitos o componentes para facilitar el diseño. Cada componente es caracterizado en particular ya sea utilizando una descripción de flujo de datos o de comportamiento. Y a la entidad donde se describen las interconexiones de estos componentes recibe el nombre de descripción estructural.

## Características del lenguaje

El lenguaje VHDL fue creado con el propósito de especificar y documentar circuitos y sistemas digitales utilizando un lenguaje formal. En la práctica se ha convertido, en un gran número de entornos de CAD, en el HDL de referencia para realizar modelos sintetizables automáticamente. Las principales características del lenguaje VHDL se explican en los siguientes puntos:

### Descripción textual normalizada

El lenguaje VHDL es un lenguaje de descripción que especifica los circuitos electrónicos en un formato adecuado para ser interpretado tanto por máquinas como por personas.

### Amplio rango de capacidad descriptiva

El lenguaje VHDL posibilita la descripción del hardware con distintos niveles de abstracción, pudiendo adaptarse a distintos propósitos y utilizarse en las sucesivas fases que se dan en el desarrollo de los diseños.

### Otras ventajas

Además de las ventajas ya reseñadas también es destacable la capacidad del lenguaje para el manejo de proyectos de grandes dimensiones, las garantías que comporta su uso cuando, durante el ciclo de mantenimiento del proyecto, hay que sustituir componentes o realizar modificaciones en los circuitos, y el hecho de que, para muchas organizaciones contratantes, sea parte indispensable de la documentación de los sistemas.

## Componentes principales de un programa en VHDL

En un diseño en VHDL tenemos dos partes principales: la entidad mostrada en la Figura 2; es como una caja negra en la que se definen entradas y salidas pero no se tiene acceso al interior, y es lo que usa cuando se reutiliza un diseño dentro de otro; la arquitectura, que es donde se describe el diseño de la forma que se ha visto antes. Otros elementos del lenguaje son las librerías, paquetes, funciones, etc. La forma de definir una entidad se muestra a continuación [3]:

```
entity suma is
port (A,B : in bit;
SUM, CARRY : out bit);
end suma;
```

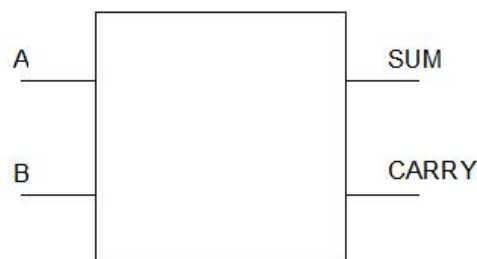


Figura 2. Representación en bloque de la entidad en VHDL.

Enseguida se muestra un programa simple escrito mediante VHDL para ejemplificar el uso de la entidad y la arquitectura.

```

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity pwm is
    port ( clock      : in  std_logic;
          reset      : in  std_logic;
          state      : in  std_logic;
          pwm_signal : out std_logic
        );
end pwm;

architecture RTL of pwm is

begin

    gen : process

    begin

        -- Sincronización del flanco de
        -- subida del reloj (comentario)

        wait until rising_edge( clock );

        -- Reset síncrono
        --
        if reset = '1' then

            pwm_signal <= '0';

        else

            if state = '1' then

                pwm_signal <= '1';

            else

                pwm_signal <= '0';

            end if;

        end if;

    end if;

    end process gen;

end RTL;

```

El programa anterior realiza la tarea de un PWM, donde se encuentra definida la entidad y la arquitectura de dicho diseño. En la entidad podemos ver que están declaradas las entradas y salidas de nuestro PWM:

**Clock:** que es el reloj del sistema. **Reset:** Si el Reset se encuentra en 1, la salida del PWM se vuelve 0, si el reset esta en nivel bajo el programa se ejecuta.

**State:** Determina si a la salida del PWM se le mandará un 0 ó 1. **Pwm\_signal:** La salida del sistema.

En la arquitectura del diseño podemos ver el funcionamiento del programa: se declara el proceso gen, el programa espera hasta que haya un flanco de subida en el reloj, revisa si reset está en 1 manda a la salida del PWM un 0 y termina el proceso, se vuelve a iniciar el programa esperando de nuevo otro flanco de subida.

Si el reset fue 0 entonces se pregunta si la entrada state es 1, si es así manda un 1 a la salida del pwm, si state fue 0 a la salida del PWM le manda un 0, termina el proceso y el programa vuelve a iniciarse.

## CONCEPTOS SOBRE CONTROL AUTOMÁTICO

El control automático ha jugado un papel vital en el avance de la ingeniería y de la ciencia. Además de su extrema importancia en vehículos espaciales, en la guía de proyectiles y sistemas de pilotaje de aviones, etc., el control automático se ha convertido en parte importante e integral de los procesos de manufactura e industriales modernos. Por ejemplo, el control automático resulta esencial en operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de procesos; maquinado, manejo y armado de piezas mecánicas en las industrias de fabricación entre muchos otros [4].

Dentro de los sistemas de control destacan dos ramas los sistemas de lazo cerrado y de lazo abierto, los cuales se explicarán a continuación para entender un poco más acerca de lo que se puede desarrollar en VHDL.

### Sistemas de control de lazo cerrado

En la Figura 3 se muestra un sistema de control de lazo cerrado donde la señal de salida tiene efecto directo sobre la acción de control.

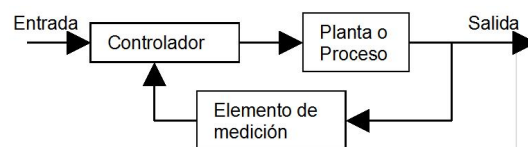


Figura 3. Sistema de control de lazo cerrado.



Un sistema de lazo cerrado es un sistema retroalimentado en donde la señal de error actuante, es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas), entra al detector o control para reducir el error y llevar la salida del sistema al valor deseado.

## Sistemas de control de lazo abierto

Los sistemas de control de lazo abierto son sistemas de control en los que la salida no tiene efecto sobre la acción de control. En un sistema de lazo abierto la salida no es realimentada para comparación con la entrada. Un esquema de este tipo de control se ilustra en la Figura 4.



Figura 4. Sistema de control de lazo abierto.

## Controladores

Sabiendo lo que es el control automático podemos describir algunos tipos de control que se pueden desarrollar mediante VHDL para ello se explicará el funcionamiento de cada uno primero y después se relacionarán con el lenguaje de programación.

### Acción de control proporcional

La parte proporcional consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional. Esta componente toma un papel importante cuando la señal de error es grande, pero su acción se ve mermada con la disminución de dicha señal. Este efecto tiene como consecuencia la aparición de un error permanente, que hace que la parte proporcional nunca llegue a solucionar por completo el error del sistema. Para un control de acción proporcional, la relación entre la salida del controlador  $m(t)$  y la señal de error actuante  $e(t)$  es :

$$m(t) = K_p e(t) \quad (1)$$

Un esquema de un control proporcional se muestra en la Figura 5.

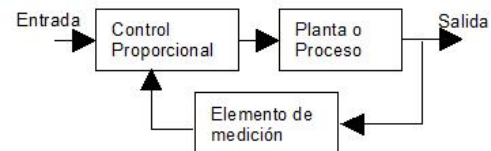


Figura 5. Sistema de un control proporcional de lazo cerrado.

### Acción de control integral

El modo de control Integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional. El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un periodo de tiempo determinado; luego es multiplicado por una constante I. I representa la constante de integración. Posteriormente, la respuesta integral es adicionada al modo Proporcional para formar el control P + I que se muestra en la Figura 6; con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario.

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_i}{T_i} \int_0^t e(t), \quad (2)$$

donde:

$K_p$ = constante proporcional

$K_i$ = constante integral

$T_i$ = tiempo integral

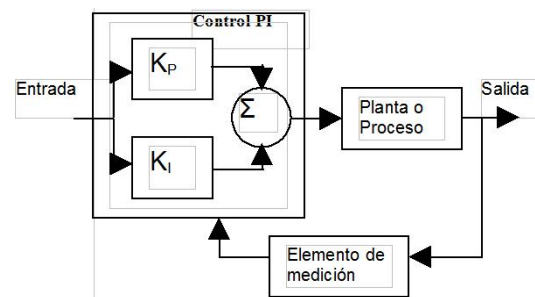


Figura 6. Sistema de un control proporcional-integral de lazo cerrado.

### Acción de control derivativa

El propósito de la acción derivativa es mejorar la estabilidad de lazo cerrado. El mecanismo de inestabilidad puede ser

descrito intuitivamente como sigue: debido a la dinámica del proceso, pasa algún tiempo antes de que la variable de control se note en la salida del proceso. De esta manera, el sistema de control tarda en corregir el error. La acción de un controlador con acción proporcional y derivativa puede ser interpretada como si el control proporcional fuese hecho para predecir la salida del proceso.

#### Acción de control PID

Con estos 3 controles podemos formar un Control PID, en la Figura 7 se muestra un esquema de dicho control, el cual es muy utilizado en la industria por las prestaciones que este tiene, así como la composición del controlador PID la podemos observar en la Figura 8.

$$m(t) = K_p e(t) + K_d T_e \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_i}{T_i} \int_0^t e(t), \quad (3)$$

donde:  $K_p, K_i, K_d =$  constantes proporcional, integral, derivativa

$T_i =$  tiempo integral.

$T_d =$  tiempo derivativo.

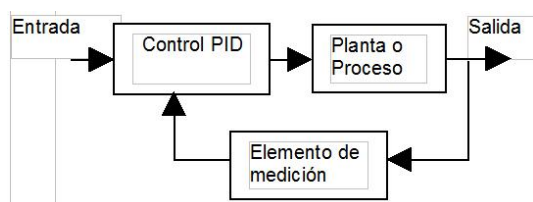


Figura 7. Sistema de un control proporcional-integral-derivativo de lazo cerrado.

Los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de muchas aplicaciones en la industria, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite (en general procesos que pueden ser descritos por dinámicas de primer y segundo orden), y los requerimientos de desempeño son modestos (generalmente limitados a especificaciones del comportamiento del error en estado estacionario y una rápida respuesta a cambios en la señal de referencia).

Los fabricantes proporcionan los controladores PID de variadas formas. Existen sistemas del tipo “stand alone” con capacidad para controlar uno o varios lazos de control. Estos dispositivos son fabricados en el orden de cientos de miles al año. El controlador PID es también un ingrediente

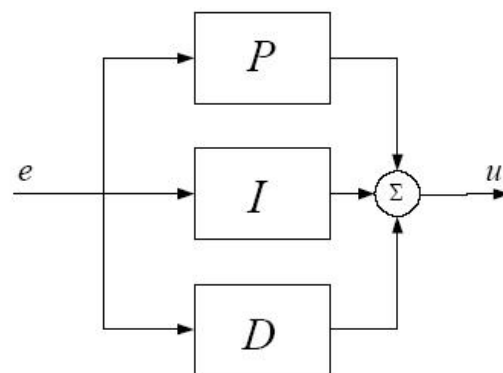


Figura 8. Componentes internos de un control PID.

importante en los sistemas de control distribuido, ya que proporciona regulación a nivel local de manera eficaz. Por otro lado, pueden también venir empotrados, como parte del equipamiento, en sistemas de control de propósito especial, formando así parte integrante de la aplicación.

Su uso extensivo en la industria es tal que el 95% de los lazos de control que existen en las aplicaciones industriales son del tipo PID, de los cuales la mayoría son controladores PI, lo que muestra la preferencia del usuario en el uso de leyes de control muy simples. En general, el usuario no explota todas las características de estos controladores, quizás por falta de una mejor comprensión desde el punto de vista de la teoría de control.

Los controladores PID han sobrevivido a muchos cambios en la tecnología a lo largo de su historia. Desde los antiguos reguladores de Watt, de la época de la revolución industrial, pasando por los controladores neumáticos, los controladores analógicos eléctricos y electrónicos (primero implementados con válvulas y luego con circuitos integrados) hasta los modernos controladores basados en microprocesadores, que proporcionan una mayor flexibilidad debido a su programabilidad. El microprocesador ha tenido una influencia dramática sobre el desarrollo del controlador PID; ha permitido brindar nuevas oportunidades para implementar funciones adicionales como el ajuste automático de parámetros y los cambios de modos de control.

El desarrollo de los sistemas de control PID está también influenciado por el desarrollo en el campo de la comunicación de datos de campo, lo que ha permitido su inserción como módulos importantes en los esquemas de control distribuido. En este sentido, la capacidad de comunicación de

estos dispositivos con otros dispositivos de campo como PLCs y otros sistemas de control de niveles superiores, como es el caso de FPGA en donde se utiliza la programación en VHDL, es una función necesaria en los modernos controladores PID.

Si bien a nivel industrial existen grupos de ingenieros de procesos e instrumentación que están familiarizados con los controladores PID, en el sentido de que llevan una práctica continua de instalación, puesta en marcha y operación de sistemas de control con lazos PID, también es cierto que existe mucho desconocimiento acerca de los detalles involucrados en la construcción de los algoritmos. Por esto la continua búsqueda de lenguajes de programación en los cuales se pueda desarrollar este tipo de aplicaciones es esencial en los avances tecnológicos de esta y cualquier área. Debido a esta constante necesidad de tener controles más eficientes es inevitable el desarrollo de aplicaciones de este tipo en VHDL, ya que es una herramienta de programación muy versátil y fácil de implementar, así como su rápido procesamiento en dispositivos como FPGA's la hacen una excelente opción para la innovación de nuevos controladores.

## APLICACIONES REALIZADAS MEDIANTE VHDL

VHDL se ha aplicado principalmente en el desarrollo de aplicaciones en FPGA, ya que estos dispositivos proporcionan importantes características que los hace una alternativa interesante para realizar nuevas tecnologías o mejorar las ya existentes. Entre las características más importantes de los FPGA se encuentra: la rapidez con la que trabaja la ejecución de los procesos, el costo, la versatilidad de aplicaciones en las cuales se pueden utilizar, su funcionamiento no tan complicado, la integración de circuitos que se pueden hacer dentro de el y la reconfiguración de los programas diseñados en VHDL cada vez que el diseño lo requiera para su funcionamiento óptimo. En VHDL pueden realizarse distintas aplicaciones entre las cuales están:

- Sistemas de control en tiempo real.
- Procesamiento de imágenes.
- Sistemas sensoriales.
- Modulación digital.
- Demodulación digital.

- Filtrado mediante correlaciones.
- Implementación de dispositivos electrónicos.
- En aplicaciones comerciales como:
  - Detección de objetos en vías de ferrocarril.
  - Procesamiento simultaneo de señales sensoriales.
  - Sistemas de posicionamiento en robots móviles.
  - Diseño de videojuegos en 2D.

Un mundo de aplicaciones interesantes se pueden realizar mediante este lenguaje y un área del conocimiento científico que tiene numerosos avances y desarrollo es “Control Automático”, para ello daremos una breve explicación acerca de esta área que es predominante en la tecnología actual.

## Controlador PID con VHDL

Los controladores PID será muy difícil que desaparezcan, porque hoy en día se siguen utilizando en la mayoría de las industrias y la tecnología actual todavía emplea este tipo de controladores, por ello a pesar de que ya se han realizado en muchos lenguajes de programación, sería una opción interesante realizarlo en VHDL, por todas las prestaciones que este lenguaje tiene y también un motivo muy importante sería la implementación en FPGA's que lo hace aún más atractivo. Un desarrollo de este tipo utiliza una estructura parecida a la siguiente:

Primero, hay que determinar el problema a resolver o sistema a controlar, es decir, por ejemplo pudiera ser un motor de CD, al cual se le quiera controlar la velocidad mediante un controlador PID diseñado en VHDL.

Ya teniendo el problema a resolver debemos tomar en cuenta las características del motor, puesto que es muy importante saber las revoluciones por minuto y el funcionamiento del encoder de dicho motor, el cual nos servirá para contar los pulsos y así mediante programación determinar la velocidad real a la que el motor está girando.

Hay que desarrollar un programa en VHDL que consista en los 3 controles (proporcional, integral y derivativo), así como el PWM (modulación por ancho de pulsos), el cual sirve para ampliar o disminuir la frecuencia con la que el motor estará trabajando y así incrementar o decrementar su velocidad.

Un experimento interesante sería utilizar los bloques que se pueden realizar en VHDL y encapsular los controles por separado y así poder usar ya sea un proporcional, un proporcional-integral, un proporcional-derivativo o un PID para observar las distintas reacciones que puede ocasionar la combinación de dichos controladores, este es un ejemplo de muchos que se pueden hacer con este lenguaje.

VHDL cuenta con una gama amplia de herramientas que pueden ayudar a mejorar el funcionamiento de programas o sistemas que con otros lenguajes no se les puede obtener su mayor rendimiento. Por lo tanto es una alternativa vanguardista que contribuye muy sustancialmente en el avance tecnológico de hoy en día, así como los futuros trabajos que se puedan realizar a través de esta herramienta. VHDL siendo relativamente joven tiene un futuro prometedor y un gran potencial en el desarrollo de hardware simulado.

## CONCLUSIONES

El uso de VHDL tiene la siguientes ventajas:

- Disponibilidad pública.
- Independencia de dispositivos y fabricantes.
- Reutilización.
- Diseño jerárquico

VHDL implementado en FPGA's es la excelente combinación de programación de hardware mediante software y velocidad de procesamiento. En la actualidad, VHDL constituye el lenguaje estándar de referencia a nivel internacional. Impulsado originalmente por el DoD de los EEUU, cualquier programa lanzado por alguna de sus agencias oficiales obliga al uso de VHDL en el modelado de los sistemas y en la documentación del proceso de diseño. Este hecho ha motivado que la gran mayoría de empresas y universidades norteamericanas hayan adoptado el lenguaje. Control automático aplicado en VHDL es una opción importante para el desarrollo de controladores más eficientes con mayor velocidad de respuesta y facilidad de diseño. Los controladores PID son muy utilizados actualmente, por ello el desarrollo de estos en VHDL los hacen más atractivos por todas las ventajas que este lenguaje ofrece.

## Bibliografía

- [1] Apuntes “Síntesis y descripción de circuitos digitales utilizando VHDL”, Francisco Javier Torres Valle, Universidad Autónoma de Guadalajara, 2002. Disponible en: [http://www.uag.mx/214/I\\_LENGUAJES\\_DE\\_DESCRIPCION\\_DE\\_HARDWARE.pdf](http://www.uag.mx/214/I_LENGUAJES_DE_DESCRIPCION_DE_HARDWARE.pdf)
- [2] Apuntes de VHDL, 2007 <http://es.wikipedia.org/wiki/VHDL>
- [3] Apuntes “Introducción al diseño con VHDL” Ricardo José Colom Palero, Departamento de ingeniería electrónica, Universidad Politécnica de Valencia, 2001.
- [4] Katsuhiko Ogata, Ingeniería de control moderna, Editorial Prentice Hall, séptima edición 1980.
- [5] Meter J. Ashenden, The VHDL cookbook, Dept. Computer Science University of Adelaide South Australia, 1990
- [6] IEEE, “IEEE Standard VHDL language reference manual”, 1994.
- [7] Apuntes “VHDL Lenguaje para descripción y modelado de circuitos”, Fernando Pardo Carpio, Ingeniería informática, Universidad de Valencia, 1997.

### Acerca del autor o autores

Oscar Montiel y Roberto Sepúlveda son Investigadores del Instituto Politécnico Nacional Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital, Ave. Del Parque No. 1310, Mesa de Otay, Tijuana B.C 22510 TEL: +(664)6231344. Ismael Millán Páez es Alumno de la Maestría en Sistemas Digitales del CITEDI. Correos-e: [millan@citedi.mx](mailto:millan@citedi.mx), [o.montiel@ieee.org](mailto:o.montiel@ieee.org), [r.sepulveda@ieee.org](mailto:r.sepulveda@ieee.org)

# Lógica Difusa en FPGA

José A. Olivas, Yazmin Maldonado, Oscar Montiel, Roberto Sepúlveda

## Fuzzy logic in an FPGA

Recibido: abril 10, 2007  
Aceptado: junio 01, 2007

Palabras clave: FPGA, lógica difusa, lenguaje de programación

### Abstract:

*Este va a ser el abstract el cual debe ser en ingles.*

**Keywords:** FPGA, Fuzzy logic, programming language

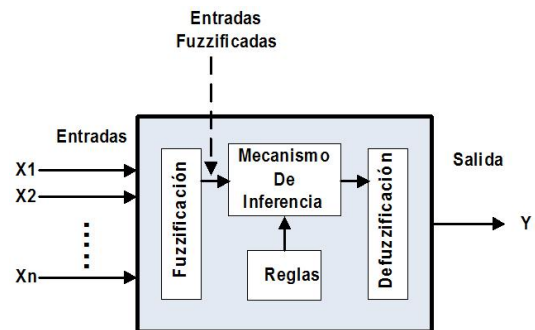
**L**OS sistemas difusos han generado un impacto apreciable dentro del contexto académico e industrial. Con el desarrollo de los dispositivos lógicos programables y las metodologías de diseño asociadas, como es el caso de los lenguajes de descripción de hardware, es posible construir sistemas computacionales complejos que integran en un solo circuito integrado (CI) una gran cantidad de funciones; destacando dentro de éstos, los CPLD (Complex Programmable Logic Device), ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) y FPGA (Field Programmable Gate Array). Los principales inconvenientes asociados con la realización microelectrónica de sistemas difusos provienen del elevado costo en términos económicos y en tiempo de desarrollo que conlleva el diseño y fabricación de un CI. En particular, el uso de arquitecturas específicas de procesamiento implementadas sobre FPGA's proporciona una excelente relación "costo-rendimiento" y un ciclo de desarrollo extremadamente corto [5].

En la actualidad algunas universidades se encuentran investigando sobre lógica difusa en FPGA como son: Universidad de Alberta, Canadá, Universidad de Colombia, Colombia; y en la República Mexicana tenemos al Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital del IPN (CITEDI), Instituto Tecnológico de Tijuana (ITT), Universidad Autónoma de Baja California (UABC), México, etc.

En este artículo se explican algunas características de lógica difusa y de la plataforma FPGA, así como algunos lenguajes de programación para FPGA; se mencionan también algunas aplicaciones de lógica difusa en FPGA y su auge dentro de las investigaciones actuales; se presentan algunas herramientas que facilitan el trabajo para esta tecnología.

## SISTEMA DIFUSO

Un Sistema difuso consta de tres etapas: Fuzzificación, Reglas difusas y Defuzzificación, como se puede observar en la Figura 1 [2].



*Figura 1. Estructura básica de un sistema de control difuso.*

## Fuzzificación

Es la interpretación de los datos de entrada por el sistema de control difuso y tiene dos componentes; la variable lingüística y la función de membresía. La variable lingüística es aquella cuyos valores son palabras en lugar de números, por ejemplo:

La estatura es una variable lingüística, si sus valores en lugar de ser numéricos son lingüísticos: alto, bajo, muy alto, muy bajo, no muy alto, no muy bajo.

La función de membresía (FM) mapea cada punto del espacio de entrada a un valor de membresía (o grado de mem-



bresía) entre 0 y 1. Generalmente, el experto define cada FM en cuanto a tipo y parámetros siguiendo ciertas reglas; algunas tipos comunes son: triangular como en la Figura 2, gaussiana, trapezoidal, etc., [2].

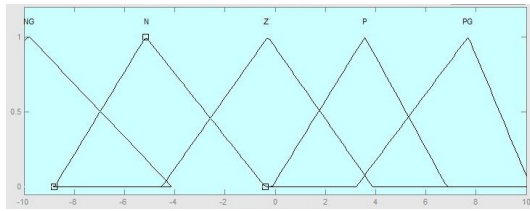


Figura 2. Funciones de membresía triangulares.

Las funciones de membresía están relacionadas con las variables lingüísticas, es decir si se tiene el ejemplo de la estatura, el número de funciones de membresía serán el número de términos lingüísticos.

## Inferencia o Reglas difusas

Una vez que se han definido las variables lingüísticas, sus términos y las funciones de membresía que se van a utilizar, la serie de pasos que describen la solución del problema se traducen a reglas de la forma IF-THEN [1], es decir

IF  $x$  is A THEN  $y$  is B

Donde A y B son los valores lingüísticos de las variables de entrada y salida respectivamente.

## Defuzzificación

Después de computar las reglas difusas y evaluar las variables difusas, se espera que en lugar de tener un conjunto difuso, la respuesta sea un valor real. Existen varios métodos que se pueden aplicar, sin embargo el más común es el centro de gravedad, el cual obtiene el centro de masa de las funciones de membresías, y a la salida proporciona un dato. Es uno de los más utilizados porque su salida es muy representativa.

## Aplicaciones de Sistemas Difusos

Hoy en día la lógica difusa se ha hecho acreedora de la confianza en las investigaciones y aplicaciones, ya que ha dado muy buenos resultados, tales como:

- Productos al consumidor
- Lavadoras
- Hornos de Microondas
- Cámaras de video
- Televisiones
- Traductores
- Sistemas
- Automóviles
- Trenes
- Elevadores
- Controles de tráfico

Existen también algunas aplicaciones para remplazar a un operador humano por medio de reglas difusas, por ejemplo:

- Péndulo invertido de Yamakawua
- Reactor nuclear (Hitachi),
- Carro de Sugeno
- Robot de Hirota
- Producción de etanol (Filev)

Hoy en día la lógica difusa se ha hecho acreedora de la confianza en las investigaciones y aplicaciones, ya que ha dado muy buenos resultados.

A continuación se muestra una tabla donde se indican las principales compañías Japonesas que emplean lógica difusa.

## FPGA

Es un dispositivo semiconductor que contiene componentes lógicos programables e interconexiones programables entre ellos, ver Figura 3. La raíz histórica de los FPGA's son los dispositivos de lógica programable compleja (CPLD) de mediados de los ochenta. Su creador es Ross Freeman, cofundador de Xilinx [3]. Muchos FPGA's modernos soportan la reconfiguración parcial del sistema, permitiendo que una parte del diseño sea reprogramada, mientras las demás partes siguen funcionando. Este es el principio de la idea de la "computación reconfigurable", o los "sistemas reconfigurables". Los FPGA's son generalmente más lentos que sus contrapartes, los circuitos integrados de aplicaciones específicas (ASIC por sus siglas en inglés), no pueden soportar diseños muy complejos, y consumen más energía. Sin embargo, los FPGA tienen ciertas ventajas tales como la reducción del tiempo de introducción al mercado de productos, la habilidad de ser reprogramados después de haber salido al mercado a fin de corregir posibles errores, y reducir los costos de investigación, diseño y pruebas de un nuevo producto.

En la Figura 4 se puede apreciar un chip FPGA, su fabricante es ALTERA [4].

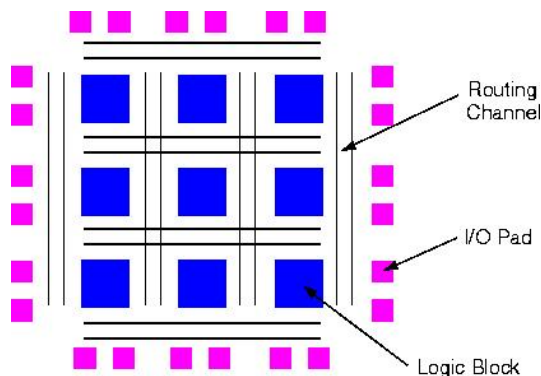


Figura 3. Estructura interna de un FPGA.

Tabla 1. Compañías de Japón que emplean lógica difusa.

Compañías	Aplicaciones
Canon	Cámaras fotográficas
Casio	Control de Humedad Temperatura
Daldan	Plantas Gas Refrescante
Fuji electronic	Mezclador Químico
Hitachi	Control en Elevadores Control del subterráneo de Sendai
Idec Izumi	Crecimiento Cristalino de GaAs
IshidaInstruments	Medidores Automáticos
Mitsubishi Electric	Control en Elevadores
Nissan Motor Company	Transmisión Automática sistemas de frenado ABS
Nuclear Power Corp	Control de Potencia en Plantas Nucleares, Controladores Roboticos
Ricoh	Reconocimiento de Voz
Sanyo	Control del Diafragma en Cámaras Fotográficas
Seiko	Sistemas Expertos
Toshiba	Control de Elevadores

## Lenguaje de Descripción de Hardware

El diseñador cuenta con la ayuda de entornos de desarrollo especializados en el diseño de sistemas a implementarse en un FPGA. Un diseño puede ser capturado ya sea como esquemático, o haciendo uso de un lenguaje de programación especial [6]. Estos lenguajes de programación especiales

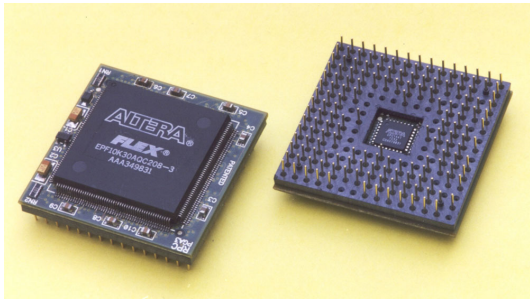


Figura 4. Chip de un FPGA, fabricante ALTERA.

son conocidos como HDL o Hardware Description Language (lenguajes de descripción de hardware). Los HDLs más utilizados son:

- VHDL
- VERILOG
- ABEL

#### VHDL

Del idioma Inglés Very High Description Language, esto significa que mediante él se puede describir la forma de comportarse de un circuito electrónico. El comportamiento puede ser llevado a algún dispositivo que dispondrá de sus propios componentes con los que lograr ese comportamiento deseado. VHDL es un estándar llamado IEEE 1076-1993. Un proyecto de VHDL puede contener muchos archivos. El código VHDL usualmente se encuentra en los archivos con extensión \*.vhd.

#### VERILOG

Verilog HDL es un lenguaje descriptivo del hardware usado para diseñar y para documentar sistemas electrónicos; permite que los usuarios diseñen en los varios niveles de la abstracción. Apoya el diseño, la verificación, y la puesta en práctica de los circuitos análogos digitales.

#### ABEL

Por sus siglas Advanced Boolean Expression Language, permite implementar diseños lógicos en dispositivos lógicos programables. Es un lenguaje independiente del dispositivo. Es decir que se programa en la computadora y se ejecuta en el dispositivo. Este lenguaje es común utilizarlo en PLD Dispositivo Lógico Programable.

## APLICACIONES DE LOGICA DIFUSA EN FPGA

A continuación se muestran algunas aplicaciones e investigaciones de lógica difusa en FPGA:

### Controladores difusos

Uno de los campos de mayor desarrollo teórico y de aplicaciones de lógica difusa es el de control de procesos. En los últimos años se ha producido un incremento considerable del número de aplicaciones de control que emplean técnicas de inferencia basadas en lógica difusa, debido a que estas técnicas permiten el desarrollo de sistemas de control complejos a partir de la descripción lingüística del conocimiento de un operador experto, sin necesidad de emplear modelos matemáticos y con buenas características de robustez frente a cambios de las condiciones de operación. Los controladores difusos se emplean en los FPGA's, debido a que se aprovechan sus características, es decir, ofrece ventajas de bajo costo, espacio pequeño, incorporación de interfaces, etc.

Algunos ejemplos de control:

- Controlador difuso para frenos ABS Mediante FPGA.
- Control Difuso de Navegación de un Robot Móvil Mediante FPGA.
- Implementación de Controladores Difusos para Tráfico de Internet Basados en FPGA.
- Desarrollo de Módulos IP de Controladores Difusos para el Diseño de Sistemas Empotrados Sobre FPGA.
- Controladores Difusos PD, PI, PID Implementados en FPGA.

En la Figura 5 se muestra un diagrama a bloques de un controlador difuso implementado en un FPGA; se puede apreciar que las únicas variables que no se incluyen dentro del software del FPGA son la planta, el sensor, el actuador y las variables de entrada.

### Co-Procesador Difuso

La ventaja principal de los procesadores difusos en hardware sobre las aplicaciones de software es su alto rendimiento. Esta ventaja es muy apreciada en aplicaciones

en tiempo real y empotradas. El diseño de la tarjeta estructural esta predefinida por la aceleración de los cálculos difusos. Una RAM ordinaria externa tiene que conectarse al coprocesador difuso y al anfitrión (host) como una regla de inferencia difusa dedicada y un medio de la base de datos difusa. La arquitectura total del sistema es bastante simple y de bajo costo. Esta arquitectura ha sido puesta en práctica sobre una plataforma de diseño de FPGA XC4005. Esto hace confiable la utilización del coprocesador difuso en usos en tiempo real y/o empotrado.

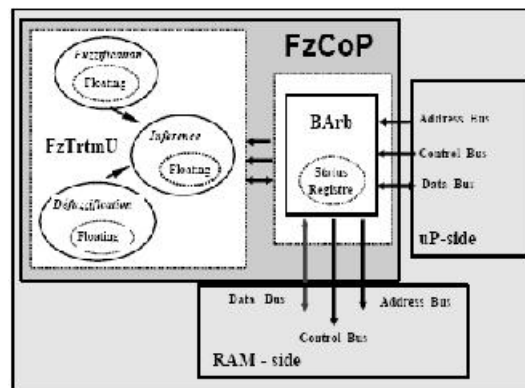


Figura 6. Arquitectura de un Fzcop.

La ventaja principal de los procesadores difusos en hardware sobre las aplicaciones de software es su alto rendimiento.

## Herramientas

Algunas herramientas de las más usadas para la lógica difusa en FPGA son LABVIEW, SIMULINK de MATLAB, y XFUZZY una herramienta de CAD, a continuación se explica su funcionamiento:

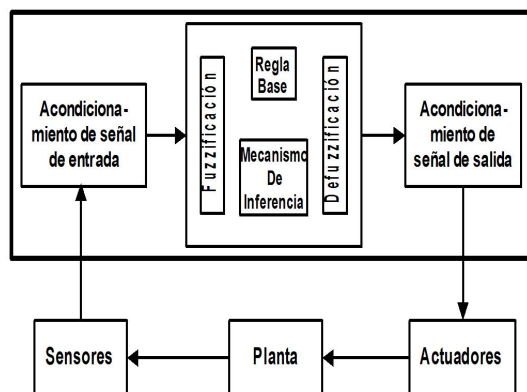


Figura 5. Diagrama a Bloques de un controlador difuso en FPGA.

El coprocesador difuso (Fzcop), Figura 6, implementado en hardware es una opción preferida en los sistemas de control embebidos.

El diseño del Fzcop es eficiente y puede ser empleado en chips FPGA baratos disponibles en el mercado. Además, no es problemático ajustar la capacidad de RAM en función de las reglas difusas y de la complejidad de la base de datos [7].

## LABVIEW

Labview cuenta con una herramienta para lógica difusa de la cual se describe su funcionamiento a continuación [9]. Lo primero que se debe hacer es posicionarse en el toolbox de herramientas de la lógica difusa de LabView (ver Figura 7) que se encuentra en el menú de las herramientas del ambiente de programación de LabView. Una vez que se encuentre en el toolbox, abrir un controlador y definir las variables.

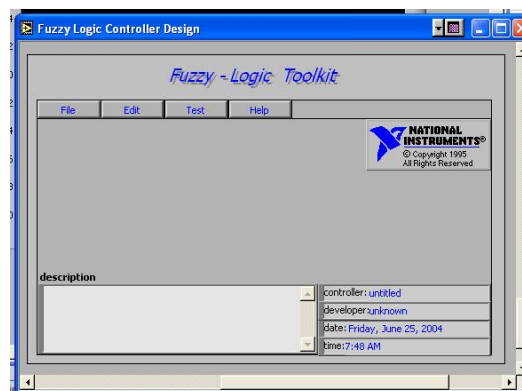


Figura 7. Ventana del toolbox de lógica difusa en LABVIEW.

En seguida se tiene que definir el modelo del sistema difuso, sus reglas difusas, y el tipo de defuzzificación, esto se hace de acuerdo a lo que necesite el usuario; ahora se necesita pasar el modelo difuso a código VHDL.

LabVIEW de National Instruments y el módulo LabVIEW FPGA proporcionan un ambiente de desarrollo gráfico para arreglos de FPGA's, en objetivos de hardware de E/S reconfigurables. Con el módulo LabVIEW FPGA, se pueden desarrollar instrumentos virtuales FPGA en un servidor ejecutando Windows y LabVIEW compila e implementa el código de hardware. Puede crear instrumentos virtuales de FPGA embebidos que combinan acceso directo a E/S con la lógica de LabVIEW definidas por el usuario para definir hardware personalizado para aplicaciones como protocolos de comunicación digital, simulación de control en hardware y generación rápida de prototipos de control.

El sistema de desarrollo de software de E/S reconfigurable de LabVIEW incluye todas las herramientas que se necesitan para crear un sistema embebido CompactRIO-LabVIEW FPGA para sintetizar hardware personalizado en el FPGA de E/S reconfigurable, configurado por el usuario y LabVIEW Real Time para crear aplicaciones determinísticas en tiempo real.

### SIMULINK DE MATLAB

Matlab es una herramienta que muchos diseñadores la utilizan para construir y probar su sistema, esta herramienta junto con sus toolboxes proporcionan los medios eficaces para las etapas de modelado y simulación. Estas herramientas proporcionan los medios de extraer esa información y llevarla a otro formato. Tal es el caso de la conversión de un modelo en simulink que nos da un formato .mdl y lo lleva a un formato de VHDL (.vhd) [8]. Esto permite al usuario desarrollar y simular un algoritmo del control numérico usando Matlab y una vez que sea completo, convierte esto al código de VHDL. Esto entonces será sintetizado en el hardware digital de la lógica difusa para ser puesta en práctica en los dispositivos tales como FPGA's y ASIC's.

Lo primero que se debe hacer es abrir el toolbox llamado FUZZY, ahí es donde se creara el controlador difuso, en seguida exportar el .fis al workspace y crear el modelo en simulink, por ultimo convertirlo a .vhd. La conversión del modelo de simulink a VHDL se muestra en la Figura 8 [11]. Los tres pasos principales para la conversión son: Modelado y simulación, Conversión de datos y síntesis, Puesta en práctica de hardware.

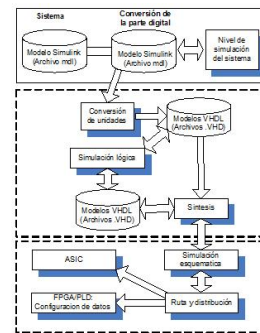


Figura 8. Rutina de la conversión de simulink a código VHDL.

En la Figura 9 se muestra un ejemplo de un retardo para convertirlo de un bloque de simulink a VHDL.

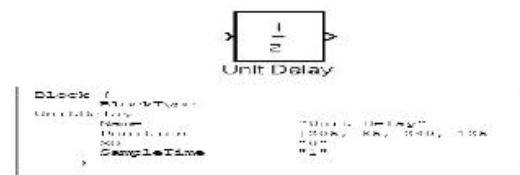


Figura 9. Unit delay model ejemplo

Figura 9. Bloque de simulink a código .vhd.

### XFUZZY DE CAD

El entorno de desarrollo de sistemas difusos Xfuzzy, combina un conjunto de herramientas que facilitan las distintas etapas del proceso de diseño de sistemas de inferencia basados en lógica difusa, desde su descripción inicial hasta la implementación final. Sus principales características son la capacidad para desarrollar sistemas complejos y la flexibilidad para permitir al usuario extender el conjunto de funciones disponibles [10]. La Figura 10 muestra la ventana principal del entorno Xfuzzy.

La síntesis hardware de sistemas difusos usando el entorno Xfuzzy puede ser llevada a cabo siguiendo dos estrategias, las cuales se explicaran enseguida.

### XFTL (Síntesis mediante Tabla de búsqueda)

XFTL recibe como entrada una descripción XFL y la convierte en una tabla entrada-salida con el formato PLA de la Universidad de Berkeley. Utilizando cualquier herramienta



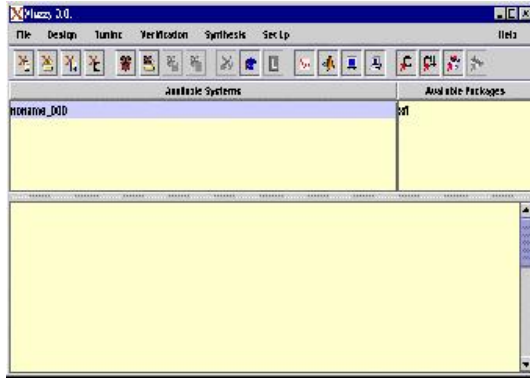


Figura 10. Ventana del entorno Xfuzzy.

de síntesis lógica compatible con dicho formato es posible minimizar la tabla y extraer las ecuaciones lógicas correspondientes. Si el usuario dispone además de las herramientas de síntesis de Synopsys y Xilinx (y el recurso xfuzzyHasSynopsys) XFTL puede automatizar los procesos de minimización de la tabla y su implementación en un FPGA.

#### XFVHDL (Síntesis Mediante Hardware Dedicado)

XFVHDL lee una especificación XFL y genera una descripción VHDL sintetizable basada en una arquitectura específica para sistemas difusos. Las diferentes opciones arquitecturales y el número de bits de precisión son definidos por el usuario al ejecutar XFVHDL. Utiliza una librería de celdas parametrizadas que contiene las descripciones de los bloques básicos que constituyen el sistema difuso. El código empleado en esta librería es compatible con las implementaciones de VHDL de las herramientas de Synopsys y Mentor Graphics. De acuerdo con condicionantes económicos o temporales el usuario puede elegir entre construir el sistema como un ASIC o mediante un FPGA. En este último caso XFVHDL también genera archivos script para dirigir los procesos de síntesis de Synopsys y Xilinx.

## CONCLUSIONES

Una ventaja de la implementación de sistemas difusos en FPGA's es que se aprovechan sus características, es decir, ofrece ventajas de bajo costo, espacio pequeño, incorporación de interfaces, etc. El número de aplicaciones de lógica difusa en FPGA es cada vez mayor. Con la ayuda de

algunas herramientas de diseño permiten en un corto tiempo pasar de la especificación de un sistema difuso a la implementación en un FPGA lo que hace más fácil la aplicación de estos sistemas.

## Bibliografía

- [1] Cirstea M.N, Khor J.G, McCormick M., *Neural and fuzzy logic control of drives and power system*, Newnes, 2002.
- [2] Montiel Oscar, Sepúlveda Roberto, Melin Patricia, Castillo Oscar, *Fundamentos de lógica difusa*, ILCSA, 2002.
- [3] Fabricante de FPGA's, consultar en [www.xilinx.com](http://www.xilinx.com), 2007.
- [4] Fabricante de FPGA's, consultar en [www.atmel.com](http://www.atmel.com), 2007.
- [5] González Vázquez José Luís, Tesis *Análisis de controladores difusos implementados en procesadores digitales FPGA's*, Instituto Tecnológico de Tijuana, Marzo 2006.
- [6] D. Galán, C. J. Jiménez, A. Barriga, S. Sánchez Solano, "VHDL Package for Description of Fuzzy Logic Controllers", 1995.
- [7] Radoslav Raychev, Abdellatif Mtibaa, Mohamed Abid, "VHDL Modelling of a Fuzzy Co – processor Architecture", *International Conference on Computer Systems and Technologies CompSysTech*, 2005.
- [8] Distribuidor de MATLAB, disponible en [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com), 2007.
- [9] National Instruments, distribuidor de LABVIEW disponible en [www.ni.com](http://www.ni.com), 2007.
- [10] XFUZZY: Herramientas de CAD para Lógica Difusa, disponible en [www.imse.cnm.es/XFUZZY](http://www.imse.cnm.es/XFUZZY), 2007.
- [11] Ian A. GROUT , Modeling, simulation and synthesis: From Simulink to VHDL generated hardware, *Department of Electronic and Computer Engineering, University of Limerick, Ireland*.

## Acerca del autor o autores

Oscar Montiel y Roberto Sepúlveda son Investigadores del Instituto Politécnico Nacional Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital, Av. del Parque No. 1310, Mesa de Otay, Tijuana, B.C., México. José A. Olivas y Yazmin Maldonado son Alumnos de la Maestría en Sistemas Digitales del CITEDI. Correos-e: [jym\\_cypress2@hotmail.com](mailto:jym_cypress2@hotmail.com), [shak\\_88@hotmail.com](mailto:shak_88@hotmail.com), [o.montiel@ieee.org](mailto:o.montiel@ieee.org), [r.sepulveda@ieee.org](mailto:r.sepulveda@ieee.org)

