

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Eléctrica



Propuesta de Tesis para optar al Título de Ingeniero
civil en Electricidad

**“Diseño e implementación de tarjetas electrónicas
para Sistema de Control en Tiempo Real”**

Profesor Guía: Dr. Matías Díaz Díaz

Alumno: Jose Aravena Carrasco

Fono alumno: 94982018

Mail alumno: jose.aravenac@usach.cl

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	ii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Origen y necesidad	1
1.2 Descripción del problema.....	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivos generales	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Desarrollo y alcances	4
1.5 Aporte personal	4
1.6 Temario tentativo	5
2. ESTADO DEL ARTE	6
2.1 Componentes de un RCS	8
2.1.1 Matriz de puertas programable (FPGA)	8
2.1.2 Procesador Digital de Señales (DSP)	9
2.2 RTS disponibles comercialmente	9
2.2.1 dSPACE	10
2.2.2 RT Box	11
2.2.3 OPAL-RT	12
2.3 RCS de Nottingham	13
2.4 RCS y convertidor de potencia	14
3. BIBLIOGRAFÍA	15

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de bloques típico de un convertidor basado en electrónica de potencia	6
Figura 2.2.: Estructura interna de una FPGA.....	8
Figura 2.3: Diagrama de funcionamiento utilizando dSPACE como sistema de control en tiempo real	10
Figura 2.4: PLECS RT Box con el controlador	11
Figura 2.5: Dispositivo RCS de OPAL-RT	12
Figura 2.6: Tarjeta HPI.....	13
Figura 2.7: Interacción entre un RCS y un convertidor de potencia	14

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Origen y necesidad

Hoy en día, la introducción de nuevas tecnologías a la red eléctrica en aplicaciones de baja, media o alta potencia tales como sistema de energía renovables, generación distribuida, automóviles eléctricos o accionamiento de motores no serían posible sin la progresiva integración de la electrónica de potencia [1].

Se habla de electrónica de potencia como aquella disciplina de la ingeniería eléctrica que involucra el estudio de circuitos eléctricos orientados al control y conversión de flujos de energía eléctrica cuya principal característica es la capacidad de manejar altos niveles de flujos de potencia [2].

Un dispositivo de electrónica de potencia se conforma por dos etapas. La primera es la etapa de potencia constituida por dispositivos de conmutación electrónicos como por ejemplo los llamados Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) o Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) encargados de manejar los flujos eléctricos. La segunda etapa se trata de la etapa de control, la etapa de control toma información desde la fuente de energía, la carga eléctrica o el usuario que manipula el dispositivo, para luego determinar de qué modo operarán los dispositivos de conmutación para conseguir la conversión deseada [2].

Para llevar a cabo la implementación de una etapa de control se emplean controladores, dispositivos que ejecutan algoritmos de control para regular la operación del convertidor de potencia. Este controlador puede tratarse, por ejemplo, de un microcontrolador, una matriz de puertas programables o FPGA (de las siglas en inglés Field-Programmable Gate Array) o un procesador digital de señales o DSP (de las siglas en inglés Digital Signal Processor) [1].

Una característica que tienen estos controladores es que pueden ser implementados en sistemas de control en tiempo real o RCS (de las siglas en inglés Real-time Control System). Esto implica que dicho sistema ante cualquier estímulo en su entrada, su tiempo de respuesta será lo suficientemente pequeño como para generar una temporalidad aceptable produciendo respuestas correctas en el proceso físico que maneja [3].

En consecuencia, estos controladores pueden utilizarse para sensar, controlar y actuar sobre diversas variables en un sistema físico de electrónica de potencia. Existe, además, la posibilidad de comunicar estos dispositivos con una computadora con el propósito de monitoreo y control por medio de una interfaz manteniendo una comunicación on-line con la computadora.

1.2 Descripción del problema

Los RCS pueden tener una comunicación on-line con una computadora mediante una interfaz, de tal forma que el mismo controlador tenga comunicación bidireccional entre la etapa de potencia y la computadora. Para dicho propósito, existen en el mercado varias alternativas, por nombrar algunas está dSPACE, herramienta que proporciona comunicación entre una computadora y una planta por medio del software simulink para realizar control en tiempo real [4]. RT Box es otra alternativa, opera con una computadora a través del software PLECS. RT Box simula la etapa de potencia de un convertidor de electrónica de potencia proporcionando resultados de simulación y herramientas de control en tiempo real [5].

Además de las ya mencionadas alternativas comerciales, existe una opción más económica, se trata de un RCS desarrollado por la universidad de Nottingham. Dicho RCS utiliza una tarjeta HPI (del inglés Host Port Interface), interfaz que permite la conexión entre una computadora y una DSP por medio de una conexión serial, paralelo o USB [6].

Actualmente, la tarjeta HPI es utilizada por el Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE) de la Universidad de Santiago de Chile, sin embargo, dicha tarjeta no se encuentra disponible en el mercado dado que actualmente no son fabricadas, en consecuencia, no existe la posibilidad de adquirir una de ellas comercialmente y se hace necesario encontrar una alternativa para una comunicación en tiempo real.

1.3 Objetivos

Se presentan a continuación los objetivos generales y específicos del trabajo de tesis:

1.3.1 Objetivos generales

El objetivo principal del presente trabajo de titulación es el diseño de tarjetas electrónicas que permitan aumentar las capacidades de los RCS destinados al control de convertidores de potencia empleados en el DIE de la Universidad de Santiago de Chile

1.3.2 Objetivos específicos

- Revisión del estado del arte en Sistemas de Control en Tiempo Real
- Diseño electrónico de sistema de medición análogo-digital integrado a la plataforma de control de equipos de electrónica de potencia.
- Diseño electrónico de sistema de comunicación RCS-PC para permitir supervisión de la operación a través de Matlab.
- Construcción de sistema de medición análogo-digital y de comunicación para su integración en RCS de equipos de electrónica de potencia.
- Pruebas del sistema considerando su operación con convertidor de electrónica de potencia integrado.
- Desarrollo de actividades didácticas para su posterior uso en actividades de Laboratorio.

1.4 Desarrollo y alcances

En el presente trabajo de titulación, se pretende diseñar tarjetas electrónicas para sistemas RCS en convertidores de potencia empleados en el DIE de la Universidad de Santiago de Chile. Se tratan específicamente de la tarjeta HPI de Texas Instrument y tarjetas de medición de voltaje y corriente.

En primera instancia, se elaborarán tarjetas de medición por medio de software Altium para luego implementarlas en un sistema RCS y proporcionar monitoreo a través de Matlab.

Posteriormente, se ensamblará una tarjeta HPI teniendo a disposición la tarjeta física y los componentes electrónicos. A continuación, se trabajará con la tarjeta HPI funcional con el fin de efectuar ingeniería inversa y desarrollar el circuito esquemático como así también la reproducción del circuito impreso o PCB (del inglés Printed Circuit Board) en el mismo software.

Finalmente, se ejecutará la puesta en marcha y las pruebas en un convertidor de electrónica de potencia funcional validando el correcto desempeño del sistema RCS.

1.5 Aporte personal

Los principales aportes personales de este trabajo de titulación guardan relación con el desarrollo, reproducción y posterior implementación de un sistema RCS en un convertidor de potencia. Específicamente, los aportes son:

- Realización de ingeniería inversa a tarjeta HPI de Texas Instrument dejando a disposición PCB y circuito esquemático en software Altium
- Desarrollo de tarjetas de medición de voltaje y corriente para sistema RCS
- Validación del RCS realizando pruebas experimentales con convertidor de potencia
- Confección de material didáctico para laboratorio del DIE de la Universidad de Santiago de Chile

1.6 Temario tentativo

Se espera que la estructura del documento de tesis se conforme de los siguientes ítems:

- Capítulo 1: Introducción
 - Motivación
 - Objetivos
 - Objetivos generales
 - Objetivos específicos
 - Desarrollo y alcances
 - Aporte personal
- Capítulo 2: Marco teórico
- Capítulo 3: Diseño y construcción de tarjetas electrónicas
 - Descripción de la metodología
 - Procedimiento de ingeniería inversa para tarjeta HPI
 - Circuito esquemático y tarjeta PCB
 - Tarjetas de mediciones
- Capítulo 4: Sistema experimental
 - Descripción del sistema
 - Sistema RCS
 - Convertidor de potencia
- Capítulo 5: Pruebas experimentales
 - Implementación de tarjeta HPI en conversor de potencia
 - Sistema de medición análogo-digital en RCS
 - Resultados experimentales
- Capítulo 6: Conclusiones y trabajos futuros
 - Conclusiones
 - Trabajos futuros
- Referencias

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

Los sistemas de electrónica de potencia han experimentado una alta participación en la red eléctrica dada su capacidad de manejar eficientemente flujos de potencia. Hace unos años su principal uso era para alimentar motores en la industria y sistemas de tracción, sin embargo, hoy en día encuentran su aplicación tanto en baja, media y alta potencia incluyendo aplicaciones a nivel residencial, sistemas de energía renovable, sistemas de potencia, generación distribuida, automóviles eléctricos, por nombrar algunos [1]. Dichos convertidores de electrónica de potencia, según se indica en la figura 1, suelen conformarse por 5 etapas:

1. Convertidor análogo-digital el cual acondiciona una señal análoga para habitualmente, sensar variables (voltaje, corriente, frecuencia, posición, etc.)
2. Un dispositivo computacional, necesario para implementar algún algoritmo.
3. Una sección de electrónica de potencia, gobernado por las primeras dos etapas
4. Una sección de comunicación
5. Una Interfaz Humano-Máquina (IHM), necesaria para configurar y monitorear ciertas funciones

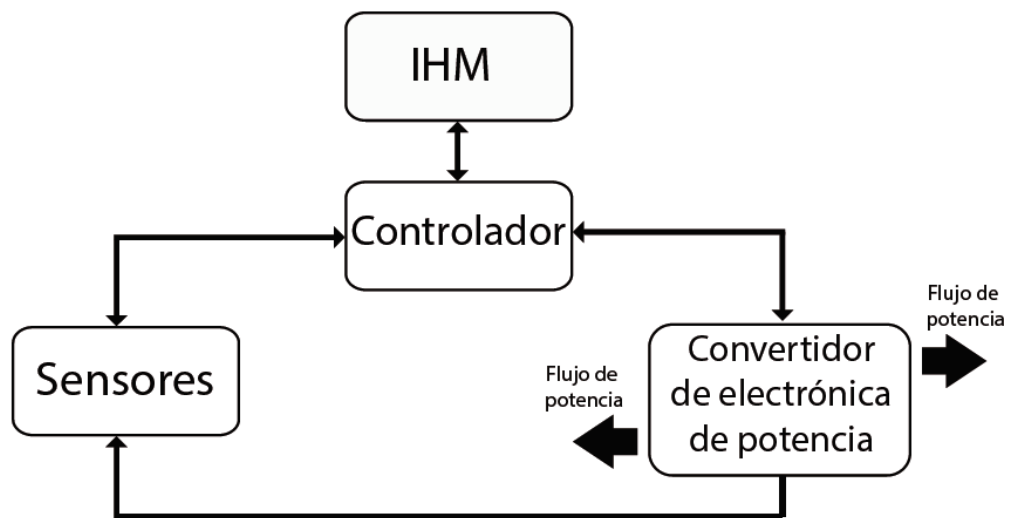


Figura 2.1: Diagrama de bloques típico de un convertidor basado en electrónica de potencia

Gracias a los avances en integración a muy gran escala (VLSI) de los circuitos integrados, se han abierto nuevas oportunidades para la implementación de poderosos circuitos digitales a bajo costo. En consecuencia, es posible construir chips con más de 1 millón de transistores y han permitido la creación de complejos y compactos controladores como por ejemplo los microprocesadores [7].

Con ello, los sistemas de electrónica de potencia han visto la oportunidad de aprovechar dichas tecnologías utilizando como sistema computacional microcontroladores, microprocesadores, DSP o alternativamente, algún circuito integrado de aplicación específica como una FPGA o un dispositivo lógico programable complejo o CPLD (del inglés Complex Programmable Logic Device).

De la mano, las herramientas de simulación utilizadas para diseño y mejora de sistemas eléctricos se han visto favorecidas. En los últimos años, la tecnología computacional ha mejorado drásticamente su desempeño mientras que sus costos se han visto reducidos. En consecuencia, investigadores e ingenieros tienen acceso a herramientas de simulación asequibles tanto para simuladores offline como aquellos en tiempo real.

Es finalmente que, gracias a estos últimos avances, dispositivos de electrónica de potencia han tenido un alto impacto en aplicaciones para la industria y la investigación. Una de estas aplicaciones en el área de la investigación es la utilización del Hardware-in-the-Loop (HIL), de tal modo que, dentro de una simulación, participan uno o varios dispositivos físicos en el lazo de simulación [1]. Estos simuladores se tratan de un RTS cuya característica es que las variables internas y las salidas de la simulación producen una respuesta de igual duración de tiempo a como lo haría un sistema físico real. En un simulador offline, el tiempo es irrelevante, y, típicamente, se espera que los resultados se obtengan lo más rápido posible [8].

Mencionado esto, se realizará una breve descripción de algunos componentes utilizados como controladores en un RCS para luego dar una breve reseña sobre sistemas de control en tiempo real disponibles en el mercado y, finalmente, una descripción del RCS de Nottingham:

2.1 Componentes de un RCS

Un RCS puede implementarse utilizando distintas tecnologías. Se nombrarán a continuación dos tecnologías que se pueden encontrar típicamente en el interior de un RCS, se trata de la FPGA y la DSP:

2.1.1 Matriz de puertas programable (FPGA)

Una FPGA es un dispositivo que contiene una matriz configurable de arreglos con lógica circuital de tal modo que cuando esta es configurada, la circuitería interna es interconectada pudiendo ser parte de un hardware para su implementación [7].

A diferencia de los procesadores, las FPGA usan hardware dedicado para el procesamiento lógico y no poseen un sistema operativo. Una de sus características es la capacidad de procesar distintas operaciones de manera paralela, vale decir, no sigue una estructura de ejecución secuencial como es el caso de los procesadores si no que la ejecución es paralela y simultánea, en consecuencia, su rendimiento no se ve afectado cuando se agregan nuevo procesamiento de información [9].

La arquitectura de una FPGA está compuesta por una matriz de bloques lógicos configurables (CLBs). En grandes dispositivos pueden existir 192 columnas y 116 filas de estos bloques. Esta matriz, está rodeada por un anillo de bloques configurables de entrada/salida (I/O). Finalmente, todos estos bloques se conectan entre sí formando una red interconectable programada por el usuario tal como indica la figura 2 [10].

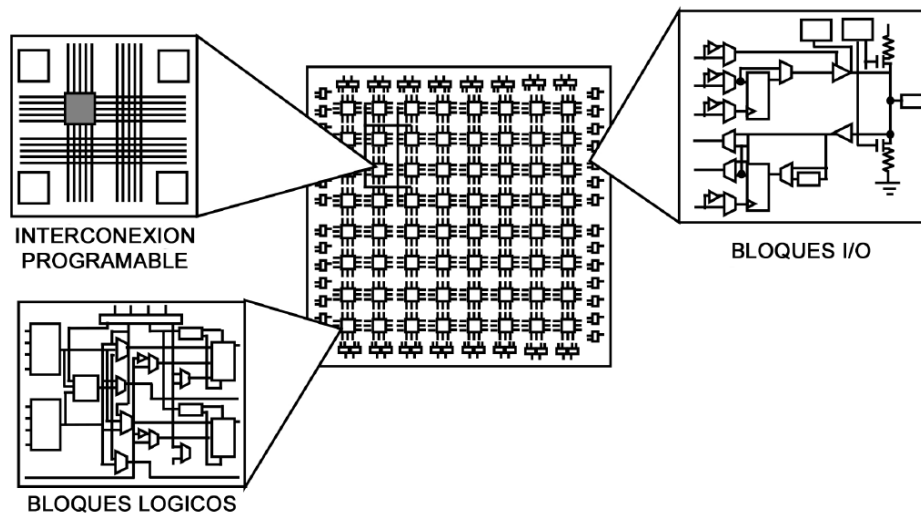


Figura 2.2.: Estructura interna de una FPGA [9]

2.1.2 Procesador Digital de Señales (DSP)

Un procesador digital de señales (DSP) es un microprocesador especializado que incluye la arquitectura de una computadora y está optimizado para realizar operaciones a alta velocidad [11]. Una DSP se caracteriza por poseer los siguientes atributos:

- Capacidad de procesamiento digital de señales en tiempo real
- Alta tasa de transferencia efectiva (throughput) permitiendo transferir un gran volumen de información
- Operación determinística, es decir, el tiempo de ejecución de los programas en una DSP se realiza en forma precisa garantizando su repetitividad
- Puede ser re-programado por algún software.

Las DSPs aparecieron en el mercado alrededor de los 1980s. Han encontrado su aplicación en diversos productos electrónicos tales como comunicación de sistemas, automóviles, instrumentación, uso industrial y militar [12]. En consecuencia, ganaron una gran popularidad en aplicaciones de electrónica de potencia por su capacidad de sobrepasar las limitaciones computacionales de los microprocesadores y permitir el uso de más procesadores en paralelo para realizar distintas operaciones [1].

2.2 RTS disponibles comercialmente

Conocidos algunos componentes internos de un RCS, se mencionarán algunos RCS disponibles en el mercado. Estos se caracterizan por permitir simulación en tiempo real con HIL manteniendo comunicación on-line con una computadora.

2.2.1 dSPACE

dSPACE es una interfaz en tiempo real que permite implementar un Prototipo Rápido de Control (PRC) y simulación con HIL. Provee una forma de desarrollo y testeo de algún sistema bajo estudio. dSPACE se caracteriza por usar poderoso hardware como procesadores en tiempo real, FPGA programables e interfaces de entrada/salida (I/O). Soporta modelamiento en Simulink y la posibilidad de realizar pruebas en tiempo real [4].

La figura 3 ilustra el funcionamiento de dSPACE: Se utiliza una computadora con el software de MATLAB/Simulink para configurar todos los parámetros de la planta bajo estudio para luego introducir dichos parámetros a una interfaz en tiempo real, software instalado directamente en la computadora el cual hará de interfaz entre dSPACE como sistema PRC y la planta.

Gracias a la interfaz de tiempo real, se pueden sensar y controlar diversas variables resultando en un poderoso sistema de control.

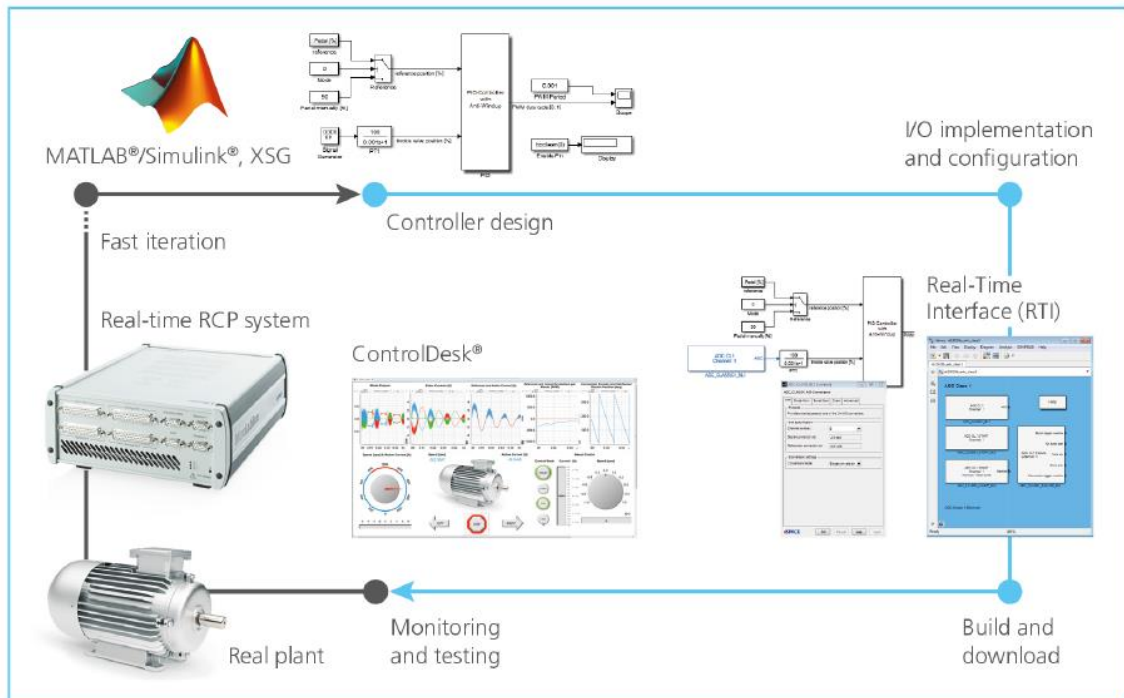


Figura 2.3: Diagrama de funcionamiento utilizando dSPACE como sistema de control en tiempo real [4]

2.2.2 RT Box

RT Box es un simulador en tiempo real desarrollado por Plexim. Consta de 32 puertos analógicos y 64 puertos digitales de entrada/salida (I/O) junto con un procesador de doble núcleo a 1 Ghz con el cual se puede realizar simulación con HIL y PRC.

RT Box es usado para emular la etapa de potencia de un sistema de electrónica de potencia. La etapa de potencia podría tratarse por ejemplo de un convertor DC/DC o de un drive para un motor eléctrico. El dispositivo bajo prueba se trataría por tanto del hardware de control el cual se encuentra conectado al simulador.



Figura 2.4: PLECS RT Box con el controlador [5]

2.2.3 OPAL-RT

OPAL-RT se trata de un simulador en tiempo real para testeo con HIL y PRC para diseñar y optimizar sistemas de control y protección utilizados en redes eléctricas, sistemas de electrónica de potencia, drivers para motores, automóviles, trenes, aviación, y muchas otras aplicaciones en la industria.

OPAL-RT ofrece distintas soluciones dependiendo de las necesidades y el sistema que se requiera simular, por lo tanto, el hardware puede variar según la aplicación. Para la simulación en tiempo real, OPAL-RT está basado en una FPGA logrando rápido nivel computacional.

En electrónica de potencia, OPAL-RT se utiliza para validar controladores para diversas aplicaciones desde energías renovables hasta complejos convertidores multinivel [13].



Figura 2.5: Dispositivo RCS de OPAL-RT [13]

2.3 RCS de Nottingham

El RCS de Nottingham se trata de un dispositivo basado en una DSP para propósitos de simulación y control en tiempo real. Es capaz de comunicarse con una computadora utilizando un kit desarrollado por Texas Instrument (TI) bajo el nombre de TMS320C6713 DSK orientado tanto para universitarios como ingenieros de la industria. Lo hace por medio de una interfaz HPI para proveer al PC, por medio de una aplicación, la posibilidad de transferir datos entre el RTS y el PC. Para la comunicación con el PC, esta tarjeta utiliza puerto paralelo, USB y RS-232 [14].

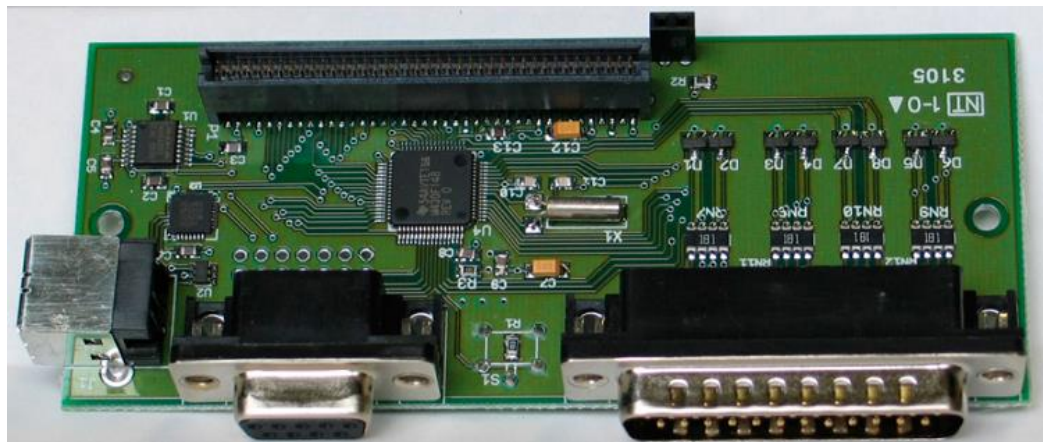


Figura 2.6: Tarjeta HPI [14]

2.4 RCS y convertidor de potencia

En electrónica de potencia, en general los RCS actúan sobre una interfaz de potencia. Esta realiza funciones de conversión de energía eléctrica en base al accionamiento de dispositivos semiconductores, tales como diodos, tiristores, IGBTs, etc. [2]. En la Fig. 7, se muestra un ejemplo de la conexión entre un RCS y un convertidor de electrónica de potencia. El RCS recibe mediciones de tensión y corriente y las convierte a variables digitales para poder ejecutar algoritmos de control programados en el procesador-microcontrolador respectivo.

El RCS procesa los datos recibidos por el sistema de mediciones, ejecuta el algoritmo de control y posteriormente envía señales de disparo para regular la operación del convertidor de electrónica de potencia. Además, una interfaz HPI puede servir de nexo entre el RCS y un PC mediante el cual se pueden monitorear variables y realizar acciones para que este actúe sobre el convertidor.

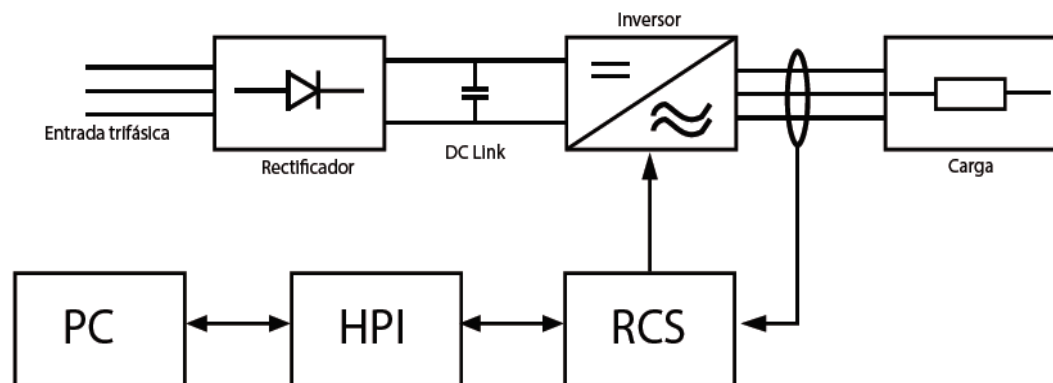


Figura 2.7: Interacción entre un RCS y un convertidor de potencia

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Buccella, C. Cecati, and H. Latafat, "Digital Control of Power Converters—A Survey," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 8, no. 3, pp. 437–447, 2012.
- [2] M. H. Rashid, *Power electronics handbook*. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [3] Sistemas Informáticos de Tiempo Real, "Conceptos básicos en los sistemas de tiempo real," p. 10, 2014.
- [4] V. Ravello, "Power Electronics and Electric Drives," 2008. [Online]. Available: www.dspace.com.
- [5] "RT Box User Manual," 2014. [Online]. Available: <https://www.plexim.com/>.
- [6] D. S. P. Educational, "Dsk6xxxhpi daughtercard," 2007.
- [7] S. D. Brown, R. J. Francis, J. Rose, and Z. G. Vranesic, *Field-programmable gate arrays*, vol. 180. Springer Science & Business Media, 2012.
- [8] J. Belanger, P. Venne, and J.-N. Paquin, "The What, Where and Why of Real-Time Simulation," *Planet RT*, vol. 1, no. 0, pp. 37–49, 2010.
- [9] Kharagpur, "Module 4 Design of Embedded Processors," *Process. F. Program. Gate Arrays Appl.*, vol. 2, 2007.
- [10] E. Monmasson and M. N. Cirstea, "FPGA Design Methodology for Industrial Control Systems - A Review," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 1824–1842, 2007.
- [11] B. G. Liptak, *Instrument Engineers' Handbook, Volume One: Process Measurement and Analysis*. CRC press, 2003.
- [12] M. E. Angoletta, "Digital signal processor fundamentals and system design," *Accel. Storage Ring*, no. CERN, Geneva, Switzerland Abstract, pp. 167–229, 2007.
- [13] Opal-rt, "Power Electronics HIL Teaching Laboratory." [Online]. Available: www.opal-rt.com.
- [14] M. G. Morrow, T. B. Welch, and C. H. G. Wright, "A Host Port Interface Board to Enhance the TMS320C6713 DSK," *2006 IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. Proc.*, vol. 2, pp. II–II, 2006.