



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ingeniería

Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos

Desarrollo de Firmware y Software para programar la CIAA en lenguaje JAVA con aplicación en entornos Industriales

Alumno: Ing. Eric Nicolás Pernia.

Director: MSc. Ing. Félix Gustavo E. Safar.

Buenos Aires, Argentina.

Presentación:
Noviembre de 2015

Desarrollo de Firmware y Software para programar la CIAA en lenguaje JAVA con aplicación en entornos Industriales por Ing. Eric Nicolás Pernia se distribuye bajo una **Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional**. Para ver una copia de esta licencia, visita <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



RESUMEN

El propósito de este Trabajo Final es la incorporación de nuevas tecnologías en ambientes industriales mediante el desarrollo de arquitecturas de sistemas embebidos novedosas. En particular, permitir crear aplicaciones *Real-Time* para entornos industriales, utilizando un lenguaje de programación orientado a objetos (en adelante POO), sobre la Computadora Industrial Abierta Argentina (CIAA). Además, se espera acercar a programadores informáticos a la disciplina de programación de sistemas embebidos, permitiéndoles aplicar técnicas avanzadas de programación.

Para llevarlo a cabo se ha escogido Java como lenguaje POO, y HVM¹, que es un entorno de ejecución de *Safety Critical Java*² (SCJ)[2], de código abierto, diseñado para plataformas embebidas de bajos recursos. Este trabajo consiste entonces, en la implementación y validación de un ambiente de Firmware y Software, basado en HVM, para programar las plataformas CIAA-NXP y EDU-CIAA-NXP en lenguaje Java SCJ.

En particular, la implementación consiste en:

- La realización del *port* de la máquina virtual de HVM para que corra sobre el microcontrolador NXP LPC4337, que contienen las plataformas CIAA-NXP y EDU-CIAA-NXP, permitiendo la programación de aplicaciones Java.
- Un diseño e implementación de una API³ sencilla para permitir controlar el Hardware desde una aplicación Java, que funciona además, como HAL⁴.
- El *port* de la capa SCJ de la máquina virtual de HVM, para permitir desarrollar aplicaciones Java SCJ.
- La integración del *port* para la CIAA al IDE de HVM, para completar un IDE de Java SCJ sobre la CIAA.

Para validar el IDE desarrollado se presentan:

- Ejemplos de aplicaciones Java utilizando periféricos de la CIAA-NXP y EDU-CIAA-NXP mediante la API desarrollada.
- Un ejemplo de aplicación Java SCJ utilizando el concepto de Proceso SCJ para demostrar el funcionamiento del cambio de contexto.
- Otro ejemplo de aplicación Java SCJ utilizando el concepto de Planificador SCJ.
- Una aplicación SCJ completa.

¹HVM desarrollado por Stephan Erbs Korsholm.

²La especificación *Safety Critical Java* es una extensión a la especificación RTSJ, una especificación de java para aplicaciones en tiempo real.

³*Application Programming Interface*, es decir, una interfaz de programación de aplicaciones.

⁴*Hardware Abstraction Layer*, significa: capa de abstracción de hardware.

Finalmente, se obtiene de este Trabajo Final un entorno de desarrollo para aplicaciones Java SCJ sobre las plataformas CIAA-NXP y EDU-CIAA-NXP, que además de ser software libre, cubre las necesidades planteadas, tanto al ofrecer programación orientada a objetos, así como funcionalidades de tiempo real para entornos industriales, sobre sistemas embebidos.

Agradecimientos

Índice general

1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Marco temático: Programación Orientada a Objetos en Sistemas embebidos para aplicaciones industriales	1
1.1.1. Proyecto CIAA	1
1.1.2. Lenguajes de POO para sistemas embebidos	5
1.1.3. Especificaciones RTSJ y SCJ	7
1.1.4. Máquinas Virtuales Java para aplicaciones de tiempo real	9
1.2. Justificación	10
1.3. Objetivo	10
2. DISEÑO - (8 pag)	11
2.1. IDE Icecaptools	11
2.2. Port de HVM a una nueva arquitectura	11
2.3. Diseño de API para manejo de periféricos	13
2.4. Diseño del IDE	13
3. IMPLEMENTACIÓN - (14 pag)	15
3.1. Paradigmas y lenguajes de programación utilizados	15
3.2. Entorno Eclipse	15
3.3. Port de HVM (Java básico) para CIAA-NXP	15
3.4. Implementación de una API para manejo de periféricos	15
3.5. Port de HVM SCJ para CIAA-NXP	16
3.6. Implementación del IDE	16
3.6.1. Plugins desarrollados	16
4. RESULTADOS - (8 pag)	17
4.1. Acerca del IDE obtenido	17
4.2. Comparaciones entre Java y C	17
4.3. Aplicación de referencia SCJ	17
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	19
5.1. Conclusiones	19
5.2. Trabajo a futuro	20

Índice de figuras

1.1. Plataforma CIAA-NXP.	3
1.2. Plataforma EDU-CIAA-NXP.	5
1.3. Ccomportamiento de una aplicación SCJ.	9
2.1. Esquema de funcionamiento de Icecaptools.	12

Índice de tablas

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Marco temático: Programación Orientada a Objetos en Sistemas embebidos para aplicaciones industriales

Con la creciente complejidad de las aplicaciones a realizar sobre sistemas embebidos en entornos industriales, y el aumento de las capacidades de memoria y procesamiento de los mismos, se desea poder aplicar técnicas avanzadas de programación para realizar programas fácilmente mantenibles, extensibles y reconfigurables. El paradigma de Programación Orientada a Objetos (POO) cumple con estos requisitos. La aplicación de este paradigma abre las puertas a que programadores informáticos se acerquen a la disciplina de programación de sistemas embebidos, permitiéndoles aplicar técnicas avanzadas de programación. Un ejemplo donde es muy eficiente su utilización, es en la programación de un sistema donde existan recetas cambiantes para realizar un proceso.

Para aplicaciones industriales es requerimiento fundamental cumplir con especificaciones temporales. En consecuencia, se necesita un lenguaje POO que soporte de manejo de *threads real-time*. El ejemplo más ilustrativo de este requerimiento es el de una aplicación de control a lazo cerrado. En este dominio es necesario garantizar una tasa de muestreo periódica uniforme para poder aplicar la teoría de control automático, suficientemente rápida para que permita seguir la dinámica del sistema (f_{min} ¹) y suficientemente lenta para que permita calcular el algoritmo de control y actualizar la salida entre dos muestras (f_{max} ²). A lazo cerrado, finalmente, es el controlador quien impone la frecuencia del sistema, que corresponde a un parámetro de diseño a elegir en el rango entre f_{min} y f_{max} .

En la sección [1.1.1] se introduce el proyecto CIAA y sus distintas plataformas. Seguidamente, en la sección [1.1.2] se exponen las ventajas y desventajas de distintos lenguajes POO estudiados para la programación de sistemas embebidos, de los cuales se selecciona Java. Luego, en la sección [1.1.3] se introducen dos especificaciones de Java para aplicaciones de tiempo real. Finalmente, en la sección [1.1.4] se exponen distintas máquinas virtuales de Java para aplicaciones *real-time*, concluyendo en la elección de HVM.

1.1.1. Proyecto CIAA

El proyecto de la Computadora Industrial Abierta Argentina (CIAA) nació en 2013 como una iniciativa conjunta entre el sector académico y el industrial, representados por la ACSE³ y CADIEEL⁴, respectivamente.

¹Frecuencia mínima para asegurar la reconstrucción de la señal según el Teorema de muestreo de Nyquist.

²Frecuencia máxima impuesta por la duración del algoritmo de control.

³Asociación Civil para la investigación, promoción y desarrollo de los Sistemas electrónicos Embebidos. Sitio web: <http://www.sase.com.ar/asociacion-civil-sistemas-embebidos>

⁴Cámara Argentina de Industrias Electrónicas, Electromecánicas y Luminotécnicas. Sitio web: <http://www.cadieel.org.ar/>

Los objetivos del proyecto CIAA son:

- Impulsar el desarrollo tecnológico nacional, a partir de sumar valor agregado al trabajo y a los productos y servicios, mediante el uso de sistemas electrónicos, en el marco de la vinculación de las instituciones educativas y el sistema científico-tecnológico con la industria.
- Darle visibilidad positiva a la electrónica argentina.
- Generar cambios estructurales en la forma en la que se desarrollan y utilizan en nuestro país los conocimientos en el ámbito de la electrónica y de las instituciones y empresas que hacen uso de ella.

Todo esto en el marco de un trabajo libre, colaborativo y articulado entre industria y academia.

Con esta iniciativa, se han desarrollado en la actualidad varias plataformas de hardware y entornos de programación para utilizarlas.

Al momento de la presentación de este trabajo, existen dos versiones de la plataforma CIAA cuyo desarrollo ha sido completado:

- CIAA-NXP, basada en el microcontrolador NXP LPC4337, que ya se comercializa.
- CIAA-FSL, que utiliza, en cambio, el microcontrolador Freescale MK60FX512VLQ15, y de la cual existen únicamente prototipos.

Además, existe una versión educativa de bajo costo de la CIAA-NXP, nombrada EDU-CIAA-NXP, que ya se distribuyeron alrededor de 1000 unidades y existen otras 1000 reservadas.

Debido a estas razones, el trabajo se enfoca en el desarrollo de herramientas para programar las dos plataformas basadas en el microcontrolador NXP LPC4337. Se introducen a continuación las características de las mismas.

Plataforma CIAA-NXP

La CIAA-NXP es la primera y única computadora del mundo que reúne dos cualidades:

- Ser **Industrial**, ya que su diseño está preparado para las exigencias de confiabilidad, temperatura, vibraciones, ruido electromagnético, tensiones, cortocircuitos, etc., que demandan los productos y procesos industriales.
- Ser **Abierta**, ya que toda la información sobre su diseño de hardware, firmware, software, etc. está libremente disponible en Internet bajo la Licencia BSD, para que cualquiera la utilice como quiera.

Esta plataforma se compone de:

- CPU: Microcontrolador NXP LPC 4337 JDB 144 (Dual-core Cortex-M4 + Cortex-M0 @ 204MHz).
- Debugger: USB-to-JTAG FT2232H. Soportado por OpenOCD.
- Memorias:
 - IS42S16400F - SDRAM. 64Mbit @ 143MHz.
 - S25FL032P0XMFI011 - Flash SPI. 32 Mbit, Quad I/O Fast read: 80 MHz.
 - 24AA1025 - EEPROM I2C. 1 Mbit, 400 kHz. Almacenamiento de propósito general, datos de calibración del usuario, etc.

- 24AA025E48 - EEPROM I2C. 2 kbit, 400 kHz. Para implementación de MAC-Address o almacenamiento de propósito general.
- Entradas y salidas:
 - 8 entradas digitales opto-aisladas 24VDC.
 - 4 Entradas analógicas 0-10V/4-20mA.
 - 4 salidas Open-Drain 24VDC.
 - 4 Salidas con Relay DPDT.
 - 1 Salida analógica 0-10V/4-20mA.
- LV-GPIO:
 - 14 GPIOs.
 - I2C.
 - SPI.
 - 4 canales analógicos.
 - Aux. USB.
- Interfaces de comunicación:
 - Ethernet.
 - USB On-The-Go.
 - RS232.
 - RS485.
 - CAN.
- Múltiples fuentes de alimentación.

En la figura [1.1] se muestra una fotografía de la plataforma.

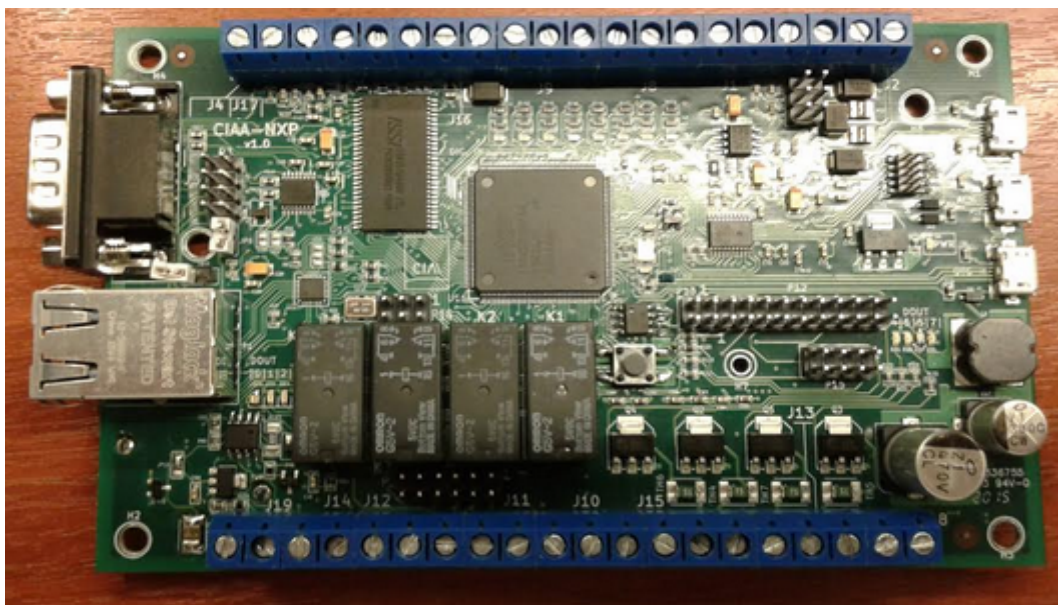


Figura 1.1: Plataforma CIAA-NXP.

Plataforma EDU-CIAA-NXP

La plataforma EDU-CIAA-NXP es un desarrollo colaborativo, realizado por miembros de la Red Universitaria de Sistemas Embebidos (RUSE), en el marco del Proyecto CIAA. RUSE se compone de docentes pertenecientes a más de 60 Universidades a lo largo y a lo ancho del país.

Los propósitos de la plataforma son:

- Proveer una plataforma de desarrollo moderna, económica y de fabricación nacional basada en la CIAA-NXP, que sirva a docentes y a estudiantes en los cursos de sistemas embebidos.
- Lograr una amplia inserción en el sistema educativo argentino.
- Realizar un aporte eficaz al desarrollo de vocaciones tempranas en electrónica, computación e informática.
- Demostrar que las universidades argentinas son capaces de realizar un desarrollo colaborativo exitoso en el área de los sistemas embebidos, cumpliendo con requerimientos de tiempo y forma.

Características de la EDU-CIAA-NXP:

- CPU: Microcontrolador NXP LPC 4337 JDB 144 (Dual-core Cortex-M4 + Cortex-M0 @ 204MHz).
- Debugger: USB-to-JTAG FT2232H. Soportado por OpenOCD.
- 2 puertos micro-USB (uno para aplicaciones y debug, otro OTG).
- 6 salidas digitales implementadas con leds (3 normales y uno RGB).
- 4 entradas digitales con pulsadores.
- 1 puerto de comunicaciones RS-485 con bornera.
- 2 conectores de expansión:
 - P0:
 - 3 entradas analógicas (ADC0 a ADC2).
 - 1 salida analógica (DAC0).
 - 1 conexión para un teclado de 3 x 4.
 - 12 pines genéricos de I/O.
 - P1:
 - 1 puerto Ethernet.
 - 1 puerto CAN.
 - 1 puerto SPI.
 - 1 puerto I2C.
 - 12 pines genéricos de I/O.

En la figura [1.2] se muestra una fotografía de esta plataforma.

Siendo el autor participante de este proyecto desde mediados de 2014, ocupando el rol de Responsable de Software-PLC mediante el aporte al proyecto CIAA de un IDE⁵ que permite programar esta plataforma con lenguajes de PLC industriales (IEC-661131-3), se desea agregar en esta oportunidad la posibilidad de programar a esta plataforma con un lenguaje de programación orientado a objetos mediante el desarrollo de un IDE para tal fin.

⁵IDE4PLC. Sitio web: <http://proyecto-ciaa.com.ar/devwiki/doku.php?id=desarrollo:software-plc>

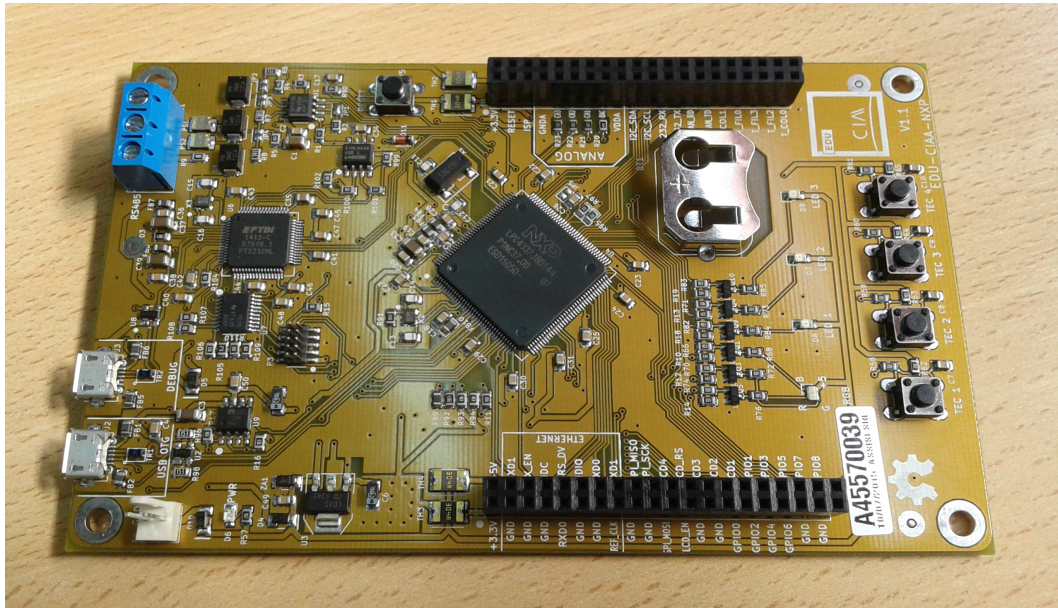


Figura 1.2: Plataforma EDU-CIAA-NXP.

1.1.2. Lenguajes de POO para sistemas embebidos

En la actualidad existen muchos desarrollos de lenguajes de programación orientado a objetos de propósito general para sistemas embebidos. Puntualmente se han evaluado las siguientes alternativas:

- C++.
- Java.
- Python.

C++

El lenguaje de programación C++ se encuentra disponible para la mayoría de los sistemas embebidos del mercado. Básicamente, todo embebido que dispone de un compilador de C, trae además, un compilador de C++. En este lenguaje se pueden manejar las interrupciones de un microcontrolador a través de funciones en C embebidas en el código C++.

No tiene soporte de manejo de *threads* en el lenguaje, sino que debe programarse desde cero una aplicación que resuelva.

Si bien aplica todos los conceptos importantes que debe tener un lenguaje orientado a objetos, el mismo es considerado obsoleto por ingenieros informáticos debido a que arrastra muchos conceptos de C que lo vuelven inseguro, como por ejemplo, permite manejar la memoria sin ninguna protección a través de punteros, una fuente habitual de errores. El manejo de memoria manual se extiende a la eliminación explícita de objetos, cuya responsabilidad recae sobre el programador. El tiempo de creación y destrucción de un objeto es variable, esto es una desventaja para aplicaciones de tiempo real.

Es un lenguaje estáticamente tipado, es decir, cada variable debe ser declarada con un tipo, esto implica una ventaja para el programador ya que pueden detectarse en tiempo de compilación muchos errores por incompatibilidad de tipos de datos.

Este lenguaje POO está disponible para utilizarse actualmente en las plataformas CIAA.

Python

Este lenguaje posee características modernas, entre ellas Garbage Collecton, que es un proceso que se encarga de detectar que objetos en memoria no se utilizan y los borra automáticamente, liberando al programador de esta tarea. Sin embargo, al igual que el caso anterior es una desventaja para aplicaciones de tiempo real pues su tiempo de ejecución no es determinista. No utiliza punteros, posee solamente referencias.

Es un lenguaje dinámicamente tipado, es decir una variable puede cambiar su tipo de datos según lo que contenga en cada momento, constituyendo una ventaja aparente para el programador al escribir el programa, pero los errores de incompatibilidad de datos solo se darán en tiempo de ejecución, dando más responsabilidad al programador para la detección de errores. Si bien en desarrollos unipersonales esto no es determinante, no se recomienda para grandes proyectos donde existan muchos programadores distribuidos.

El lenguaje Python posee soporte para el manejo de procesos, pero no se han encontrado especificaciones de soporte de procesos *real-time*.

A diferencia de C++, Python es un lenguaje interpretado en lugar de compilado.

MicroPython es una implementación de un intérprete de lenguaje Python para sistemas embebidos. Durante el tiempo de realización de este trabajo, un grupo perteneciente al proyecto CIAA se portó este intérprete para poder ser utilizado sobre la plataforma EDU-CIAA-NXP. Sin embargo, el mismo no se recomienda para aplicaciones industriales.

Java

El lenguaje Java, uno de los lenguaje de programación más utilizados en la actualidad. Realiza un balance entre las mejores características de los dos anteriores y agrega otras faltantes. Sus características son:

- Independiente de la máquina.
- Seguro para trabajar en red.
- Potente para sustituir código nativo.
- Con comprobación estricta de tipos.
- Manejo de memoria automático mediante Recolector de Basura.
- Sin punteros, utiliza referencias.
- Permite programación concurrente de forma estándar.

Para lograr la independencia de la máquina, Java posee la característica de ser un lenguaje compilado e interpretado. Todo programa en Java, se compila primero a un lenguaje similar a un *assembler* genérico basando en pila (*bytecodes*), que luego es interpretado por una máquina virtual de Java (JVM) dependiente de la plataforma.

La JVM es habitualmente un programa que corre sobre un sistema operativo, sin embargo, existen implementaciones de la JVM que corren directamente sobre el hardware (*bare-metal*) y procesadores capaces de ejecutar *bytecodes* de Java directamente (por ejemplo, el microcontrolador ARM926EJ-S). Si bien es interpretado al igual que Python, existen disponibles muchas implementaciones de la JVM para distintas plataformas, no siendo este el caso de los intérpretes de Python.

Java posee varias especificaciones de tiempo real. En consecuencia, por todas las razones expuestas, se elige Java como lenguaje POO para el presente trabajo. Se introducen a continuación las especificaciones de Java RTSJ y SCJ.

1.1.3. Especificaciones RTSJ y SCJ

En Java existen varias descripciones del lenguaje pensadas para la implementación *threads real-time*, mitigando los puntos de desventaja del lenguaje Java para la programación de aplicaciones industriales. Una de ellas es la especificación RTSJ que contempla aplicaciones *Real-Time*, otra es *Predictable Java* (PJ), un subconjunto de RTSJ que agrega algunos conceptos. Esta última se ha utilizado como inspiración para SCJ, la cual agrega conceptos de sistemas críticos y seguridad funcional. Se describen a continuación las especificaciones RTSJ y SCJ.

Especificación RTSJ

La Especificación de Tiempo Real para Java (RTSJ), o JSR 1, indica cómo un sistema Java debería comportarse en un contexto de tiempo real. Fue desarrollada durante varios años por expertos de Java y de aplicaciones en tiempo real.

Está diseñada para extender naturalmente cualquiera de las plataformas de la familia Java (Java, Java SE, Java EE, Java Micro Edition, etc.), y tiene el requerimiento de que cualquier implementación debe pasar el *Test* de Compatibilidad JSR 1 (TCK) y el TCK propio de la plataforma en la cual está basada.

RTSJ introduce varias características nuevas para soportar operaciones en tiempo real. Estas características incluyen nuevos tipos de *thread*, nuevos modelos de gestión de memoria, y nuevos *frameworks*.

Modela una aplicación de tiempo real como un conjunto de tareas, cada una de las cuales tiene una meta de tiempo opcional. Esta meta especifica cuando debe ser completada la tarea. Las tareas de tiempo real se pueden agrupar en varias categorías, basadas en cómo el desarrollador puede predecir su frecuencia y ejecución:

- **Periódicas:** tareas que se ejecutan repetitivamente a una frecuencia fija.
- **Esporádicas:** tareas que no se ejecutan en una frecuencia fija, pero que tienen una frecuencia máxima.
- **Aperiódicas:** tareas cuya frecuencia y ejecución no pueden predecirse.

RTSJ utiliza información de los tipos de tarea para asegurar que las tareas críticas no incumplan sus metas. Permite asociarle a cada tarea un *Handler* de Meta Incumplida, de manera que una tarea no se completa antes de su meta de tiempo, se invoca al *handler* asociado para poder tomar medidas al respecto.

Define la gestión de prioridades de los *threads* con al menos 28 niveles de prioridad. Para evitar la inversión de prioridades utiliza herencia de prioridades para su gestión.

Brinda diversas formas de reservar memoria para objetos. Los objetos pueden asignarse a un área de memoria específica. Estas áreas tienen diferentes características de *garbage collector* y límites de reserva. Se clasifican en:

- **Heap estándar.** Como cualquier máquina virtual, RTSJ mantiene un *heap* con *garbage collector* para que sea utilizado por cualquier tipo de tarea (*real-time* o no).
- **Memoria inmortal.** Un área de memoria que no tiene un *garbage collector*, cuyo uso lo debe gestionar el programador.

- **Memoria acotada.** Sólo disponible para *threads* de tiempo real (RTT⁶ y NHRT⁷). Estas áreas de memoria están pensadas para objetos con un tiempo de vida conocido. Al igual que la anterior no posee *garbage collector*.

Especificación SCJ

La especificación *Safety-Critical Java*, (JSR-302), es un subconjunto de la especificación RTSJ, que además, define un conjunto de servicios diseñados para ser utilizados en aplicaciones que requieran un nivel de certificación de seguridad funcional. La especificación está dirigida a una amplia variedad de paradigmas de certificación muy exigentes, tales como los requisitos de seguridad crítica DO-178B, Nivel A.

Esta especificación presenta un conjunto de clases Java que implementan soluciones *Safety-Critical* para el inicio de la aplicación, concurrencia, planificación, sincronización, entrada/salida, gestión de memoria, gestión de temporización, procesamiento de interrupciones, interfaces nativas y excepciones. Presenta un conjunto de *annotations* que pueden ser utilizadas para garantizar que la aplicación exhibe ciertas propiedades de seguridad funcional, mediante comprobación estática, para mejorar la certificación de aplicaciones construidas para ajustarse a esta especificación.

Para aumentar la portabilidad de las aplicaciones *Safety-Critical* entre distintas implementaciones de esta especificación, se enumera un conjunto mínimo de bibliotecas Java que deben ser proporcionados en una implementación conforme a la especificación.

A continuación se describen algunas características de SCJ.

- En esta especificación solo se permiten *Threads Real-Time*.
- Un programa SCJ se organiza en *Missions*.
- Cada Misión se compone de *Schedulable objects* (por ejemplo *handlers*).
- Modelo de memoria sin *heap* ni *Garbage Collector*, se divide la memoria en **ámbitos de memoria** que se manejan mediante áreas de memoria, en este caso:
 - *Inmortal Memory*.
 - *Mission Memory*.
 - *Private Memory*.
- Tipos de *Scheduling*:
 - *Cyclic executive* (SCJ Level 0).
 - *Fixed priority preemptive* (SCJ Level 1).

Existen 3 niveles conformidad con la especificación SCJ:

- **Nivel 0.** Proporciona una ejecución cíclica (un único *thread*), sin *wait/notify*.
- **Nivel 1.** Provee una única **Misión** con múltiples **Objetos planificables**.
- **Nivel 2.** Ofrece **Misiones** anidadas con (limitados) proporciona misiones anidadas con (limitados) **ámbitos de memoria** anidados.

En la figura [1.3] ilustra el comportamiento de una aplicación SCJ.

⁶RTT son las siglas de *Real-Time Thread*. Es la clase Java que implementa las tareas de tiempo real

⁷NHRT significa *No Heap Real-time Thread*. Es una subclase de RTT donde el *garbage collector* no actúa durante su ejecución. Destinada a tareas *hard real-time*

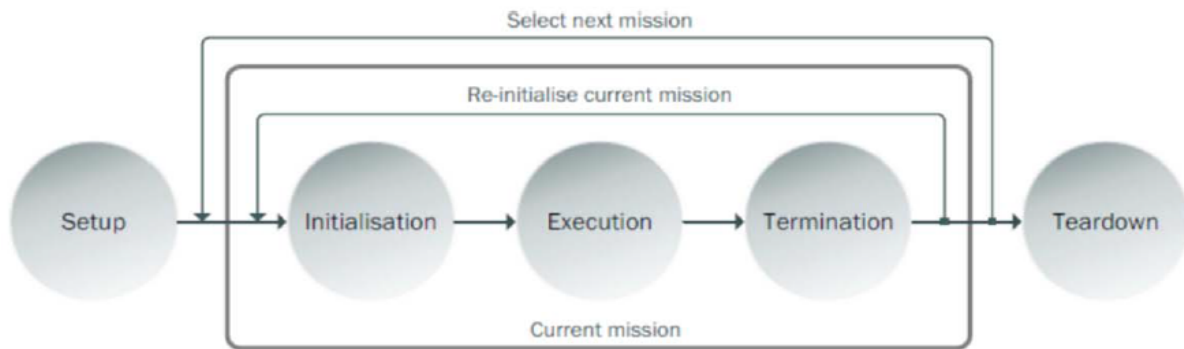


Figura 1.3: Ccomportamiento de una aplicación SCJ.

1.1.4. Máquinas Virtuales Java para aplicaciones de tiempo real

Para poder utilizar Java sobre una plataforma de hardware en particular, se debe contar con una implementación de la JVM conforme a alguna de las especificaciones anteriores. Se exponen las distintas máquinas virtuales de Java que se consideraron y sus características:

- **JamaicaVM**. Sitio Web: <http://www.aicas.com/jamaica.html>.
- **FijiVM**. Sitio Web: <http://fiji-systems.com/>.
- **oSCJ**. Sitio Web: <https://www.cs.purdue.edu/ssss/projects/oscj/>.
- **KESO VM**. Sitio Web: <https://www4.cs.fau.de/Research/KESO/>.
- **HVM**. Sitio Web: <http://icelab.dk/>.

JamaicaVM soporta la especificación RTSJ. Es un desarrollo de la empresa Aicas, planeada para aplicaciones *Hard Real-Time*, que posee un *garbage collector* determinístico (*fully preemptable*). Se encuentra en estado de certificación para su utilización en automóviles y aviones. Si bien es la JVM más prometedora, la misma es de código privado y por eso se descarta su utilización en este trabajo.

FijiVM soporta la especificación SCJ con muy buenas prestaciones, sin embargo al igual que JamaicaVM es un desarrollo de código privado.

Open Safety-Critical Java Implementation (oSCJ) es un desarrollo de la universidad de Purdue, de código abierto, que implementa un conjunto restringido de la especificación SCJ, con foco en el nivel 0 de la misma. Posee un desarrollo de *Technology Compatibility Kit (TCK)* como es solicitado en SCJ, chequeo estático de *Annotations SCJ* y un conjunto de *benchmarks SCJ*. Su licencia es *New BSD*. La plataforma sobre la cual está desarrollada oSCJ es una FPGA Xilinx con un softcore LEON3 corriendo el sistema operativo de tiempo real RTEMS. Este desarrollo dista mucho del microcontrolador que se utiliza en el trabajo y no se ha encontrado documentación para portarlo a otra arquitectura.

KESO VM se desarrolla en Universidad Friedrich-Alexander, Alemania, con licencia LGPL V3. Está diseñada para correr sobre el sistema operativo de tiempo real OSEK, sobre las plataformas JOSEK, CiAO, Trampoline OS, Elektrobot ProOSEK y RTA-OSEK. En la web oficial existen ejemplos sobre la arquitectura AVR de 8 bits de la compañía Atmel. Si bien posee soporte de *threads real-time*, no se basa en ninguna de las especificaciones para Java de tiempo real anteriores. Por otro lado, no se encontró documentación acerca de como llevar la misma a otra distribución de OSEK.

Hardware near Virtual Machine (**HVM**) comenzó como un desarrollo para la tesis doctoral de Stephan Erbs Korsholm (Icelabs). Es un entorno de ejecución de *Safety Critical* Java (SCJ) nivel 1 y 2, de código abierto diseñado para plataformas embebidas de bajos recursos.

HVM corre directamente sobre el hardware sin necesidad de un sistema operativo (*bare-metal*). Su diseño y documentación [ref biblio HVM REF] facilita la portabilidad a nuevas arquitecturas.

Se compone de las siguientes partes:

- **Icecaptools**. Es un *plugin* que convierte al IDE Eclipse, en un IDE para la programación en lenguaje Java para HVM. Icecaptools genera código C a partir de la aplicación Java de usuario para correr sobre la máquina virtual de Java, HVM, así como los propios archivos que implementan a esta máquina virtual.
- **HVM SDK**. Es el *Software Development Kit* de HVM que incluye las clases que implementan SCJ.

En [ref biblio] se porveen *benckmarks* de HVM, KESO VM y FijiVM relativas a la aplicación de los mismos algoritmos en lenguaje C.

Debido a estas características se elije HVM como la JVM a utilizar en este trabajo.

Cabe destacar, que durante el desarrollo del presente trabajo se ha entrado en contacto con Korsholm, vía correo electrónico, quien con excelente predisposición ha facilitado mucho la labor contestando todas las dudas. De esta manera, se ha logrado una cooperación entre los equipos de investigación de la Universidad Nacional de Quilmes e Icelabs, y se espera luego de la conclusión de este trabajo, contribuir al proyecto HVM con el aporte del *port* para la CIAA de HVM.

1.2. Justificación

El autor del presente Trabajo Final forma parte de un proyecto de investigación orientado por la práctica profesional perteneciente al departamento de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Quilmes, titulado, “*Estrategias de desarrollo de sistemas embebidos en ambientes de automatización y control industrial. Un enfoque de programación con objetos y servicios web*”. Cuyo director es, además, el director de este trabajo, MSc. Ing. Félix Gustavo E. Safar y su co-director es Ing. Leonardo Ariel Gassman.

Este trabajo surge entonces como necesidad de de obtener una herramienta para llevar a cabo los desarrollos en el marco de dicho proyecto.

1.3. Objetivo

El objetivo del Trabajo Final permitir la programación en lenguaje Java de la CIAA con aplicación en entornos industriales. El camino elegido para llevarlo a cabo es:

- Realizar el *port* de la máquina virtual de HVM para que corra sobre las plataformas CIAA-NXP y EDU-CIAA-NXP, permitiendo la programación de aplicaciones Java.
- Diseñar e implementar una API sencilla para permitir controlar periféricos del microcontrolador desde una aplicación Java.
- Llevar a cabo el *port* de la capa SCJ de la máquina virtual de HVM, para permitir desarrollar aplicaciones Java SCJ.
- La integración del *port* para la CIAA al IDE de HVM, para completar un IDE de Java SCJ sobre la CIAA.

Estas tareas conllevan a la obtención de un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) para programar en lenguaje Java las plataformas CIAA-NXP y EDU-CIAA-NXP.

Capítulo 2

DISEÑO - (8 pag)

2.1. IDE Icecaptools

Icecaptools se distribuye como un plugin de Eclipse realizado por Stephan Erbs Korsholm, que convierte al Eclipse en un IDE para la programación en lenguaje Java y permite compilar el programa de usuario para HVM. Funciona realizando una traducción de un programa de usuario escrito en lenguaje Java, a un programa en lenguaje C que incluye el código de dicho programa y el código C generado de HVM. De esta manera, logra portabilidad entre diferentes microcontroladores y permite integración con programas escritos previamente en lenguaje C, como por ejemplo, el firmware de la CIAA. Requiere un toolchain de lenguaje C, para el microcontrolador objetivo, que permita compilar el código, generando un binario ejecutable, y su posterior descarga a dicho dispositivo. En la figura [2.1] se incluye un esquema gráfico de su funcionamiento.

HVM provee tres formas de acceso al hardware:

- **Variables Bindeadas.** Es una variable que puedo utilizar en lenguaje Java y tiene correspondencia directa con una variable en otro lenguaje (en este caso particular, lenguaje C).
- **Hardware Objects.** Es una abstracción que permite acceder a registros del microcontrolador mapeados en memoria para manipularlos desde el programa en lenguaje Java. De esta forma se puede crear una biblioteca completa dependiente del microcontrolador que maneje un periférico a nivel de registros directamente en Java.
- **Métodos nativos.** Esta alternativa permite utilizar funciones realizadas en otro lenguaje como métodos en lenguaje Java. De esta manera permite ejecutar código *legacy* dando la posibilidad de utilizar bibliotecas completas realizadas en otro lenguaje. Para conectar un método con una función en lenguaje C, deben respetarse ciertas convenciones de nombres y de pasajes de parámetros en las funciones realizadas para que el compilador de Java puede asociarlas.

Se elige métodos nativos como alternativa para proveer al programa de usuario en lenguaje Java el acceso a los periféricos del microcontrolador. Esto es porque ya existen bibliotecas completas de manejo de periféricos y además *stacks* y *file systems* entre otras.

2.2. Port de HVM a una nueva arquitectura

Para portar el Firmware HVM a una nueva arquitectura deben realizarse los siguientes pasos:

- Conseguir un ambiente de desarrollo en lenguaje C para la arquitectura.
- Estandarizar los tamaños de tipos de datos.

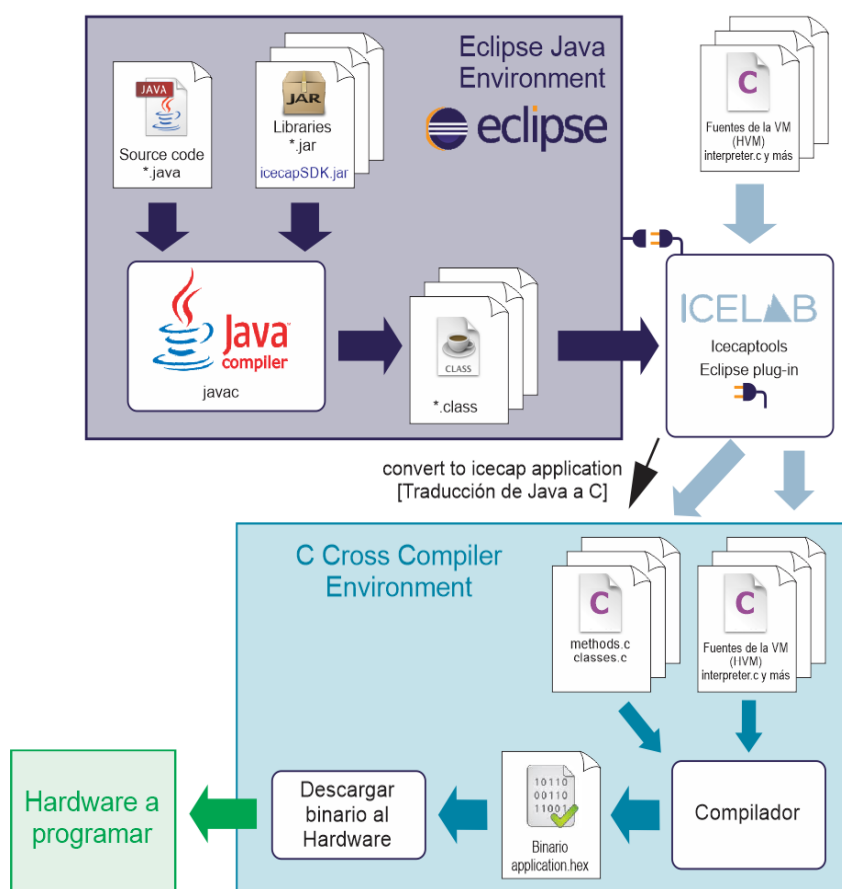


Figura 2.1: Esquema de funcionamiento de Icecaptools.

- Implementar una API para la arquitectura.
- Implementar el acceso al hardware.

Para facilitar la inclusión de nuevas arquitecturas a icecapttools y automatizar tareas habituales, que en caso contrario debería realizar el usuario para cada nueva aplicación, se propone la programación de un plugin llamado HVM4CIAA.

Finalmente, en la figura [] se gráfica la solución propuesta para lograr utilizar icecapttools y HVM con la CIAA.

FIGURAAAAAAAAAAAA

2.3. Diseño de API para manejo de periféricos

Diseño de una API sencilla.

2.4. Diseño del IDE

Diseño del IDE.

Capítulo 3

IMPLEMENTACIÓN - (14 pag)

La implementación consiste en:

- La realización del *port* de la máquina virtual de HVM para que corra sobre el microcontrolador NXP LPC4337, que contienen las plataformas CIAA-NXP y EDU-CIAA-NXP, permitiendo la programación de aplicaciones Java.
- Una API¹ sencilla para permitir controlar el Hardware desde una aplicación Java, que funciona además, como HAL².
- El *port* de la capa SCJ de la máquina virtual de HVM, para permitir desarrollar aplicaciones Java SCJ.
- La integración del *port* para la CIAA al IDE de HVM, para completar un IDE de Java SCJ sobre la CIAA.

En las siguientes secciones se describen las herramientas utilizadas y

3.1. Paradigmas y lenguajes de programación utilizados

Paradigmas y lenguajes de programación utilizados.

3.2. Entorno Eclipse

Entorno Eclipse.

3.3. Port de HVM (Java básico) para CIAA-NXP

Port de HVM (Java básico) para CIAA-NXP.

3.4. Implementación de una API para manejo de periféricos

Implementación de API para manejo de periféricos CIAA-NXP.

sAPI

Como subproducto, se obtiene además un nuevo módulo de Firmware para la CIAA nombrado sAPI (simple API) que permite mediante un conjunto de clases encapsular el manejo de periféricos

¹ *Application Programming Interface*, es decir, una interfaz de programación de aplicaciones.

² *Hardware Abstraction Layer*, significa: capa de abstracción de hardware.

con una interfaz muy sencilla pensada para el programador con perfil informático no experto en Sistemas embebidos.

Enumerar el hardware que permite atacar

3.5. Port de HVM SCJ para CIAA-NXP

Port de HVM (Java SCJ) para CIAA-NXP.

3.6. Implementación del IDE

Implementación del IDE.

3.6.1. Plugins desarrollados

Plugins desarrollados.

Capítulo 4

RESULTADOS - (8 pag)

4.1. Acerca del IDE obtenido

Acerca del IDE obtenido.

4.2. Comparaciones entre Java y C

4.3. Aplicación de referencia SCJ

Aplicación de referencia SCJ.

- Ejemplos de aplicaciones Java utilizando periféricos de la CIAA-NXP y EDU-CIAA-NXP mediante la API desarrollada.
- Un ejemplo de aplicación Java SCJ utilizando el concepto de Proceso SCJ para demostrar el funcionamiento del cambio de contexto.
- Otro ejemplo de aplicación Java SCJ utilizando el concepto de Planificador SCJ.
- Una aplicación SCJ completa.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

5.1. Conclusiones

En el presente Trabajo Final se ha logrado obtener un entorno de desarrollo para aplicaciones Java SCJ sobre las plataformas CIAA-NXP y EDU-CIAA-NXP, que además de ser software libre, cubre las necesidades planteadas, tanto al ofrecer programación orientada a objetos, así como funcionalidades de tiempo real para entornos industriales, sobre sistemas embebidos.

Como subproducto, se obtiene además una API sencilla para el manejo de periféricos de las plataformas CIAA-NXP y EDU-CIAA-NXP, que puede utilizarse en aplicaciones Java, o directamente en lenguaje C, debido a su diseño como módulo de Firmware de la CIAA. Se ha tenido especial cuidado en el diseño de esta API para que la misma sea lo más genérica posible logrando que además se comporte como una HAL.

El desarrollo de este Trabajo Final demandó la articulación de conocimientos adquiridos a lo largo de la Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos, en particular, las asignaturas:

- **Arquitectura de microprocesadores.** Se utilizaron de esta asignatura los conocimientos adquiridos sobre la arquitectura ARM Cortex M necesarios para implementar en lenguaje *assembler* las funciones que realizan el cambio de contexto, necesarias para que funcione el concepto de Proceso SCJ.
- **Programación de microprocesadores.** De esta asignatura se aprovecha la experiencia sobre lenguaje C para microcontroladores de 32 bits y el manejo de sus periféricos. Fue de especial importancia, debido a que, a excepción de unas pocas, todas las funciones para portar HVM a la CIAA debían realizarse en lenguaje C. Este lenguaje también se utilizó en la creación de la API para el manejo de periféricos.
- **Ingeniería de software en sistemas embebidos.** Se aplican de la misma las metodologías de trabajo, provenientes de la ingeniería de software, que aportan calidad y eficiencia al desarrollo. En particular, diseño iterativo y manejo repositorios de software, diseño modular y en capas.
- **Gestión de Proyectos en Ingeniería.** Durante esta se desarrolló el Plan de Proyecto del Trabajo Final, permitiendo desde un principio tener una clara planificación del trabajo a realizar.
- **Sistemas Operativos de Propósito General.** Se aprovechan los conocimientos adquiridos sobre Linux para probar las herramientas desarrolladas sobre este sistema operativo.

- **Sistemas Operativos de Tiempo Real (I y II).** De estas asignaturas se aplica el conocimiento obtenido sobre planificadores de tareas expropiativos y la manera en que trabajan. Esto ha sido muy importante para la realización de este Trabajo Final. También la creación de módulos de Firmware para la CIAA.
- **Desarrollo de Sistemas Embebidos en Android.** La plataforma Android es un claro caso de éxito de la aplicación de un lenguaje POO en sistemas embebidos (aunque no sea para aplicaciones industriales). Estas aplicaciones se realizan en lenguaje Java. Si bien se contaba con experiencia en programación orientada a objetos en otros lenguajes, esta asignatura fue para el autor el primer acercamiento a dicho lenguaje. En consecuencia, mucho de lo aprendido colaboró en la decisión de llevar a cabo este trabajo.
- **Diseño de Sistemas Críticos.** Los conceptos aprendidos en esta asignatura contribuyeron a comprender, inmediatamente, las importantes implicancias de poder programar aplicaciones SCJ en sistemas embebidos, que provee HVM, para aplicaciones industriales.

Además, se han adquirido aprendizajes en las temáticas:

- Programación de aplicaciones en lenguaje Java.
- Especificaciones de Java, entre ellas, RTSJ y SCJ.
- Programación de aplicaciones SCJ.
- Experiencia en construcción de planificadores expropiativos con restricciones de tiempo real.
- Máquinas Virtuales de Java para sistemas embebidos y su funcionamiento interno.
- Desarrollo de API para sistemas embebidos.
- Desarrollo de *plugins* para Eclipse y la aplicación de patrones de diseño orientado a objetos para lograr una exitosa solución.

Por lo tanto, se llega a la conclusión que los objetivos planteados al comenzar el trabajo han sido alcanzados satisfactoriamente, y además, se han adquirido conocimientos muy importantes para la formación profesional del autor.

5.2. Trabajo a futuro

Como labor a futuro, pueden realizarse las siguientes tareas:

- Programar los *Launchers* para las plataformas CIAA y EDU-CIAA-NXP para permitir *debuggear* directamente en Java.
- Integrar el port de la CIAA al repositorio oficial de HVM.
- Investigar HVM-TP, el nuevo desarrollo de Stephan Erbs Korsholm. Es una máquina virtual de Java *Time Predictable* y Portable para sistemas embebidos *Hard Real-Time*, que toma como base a HVM, extendiéndola y mejorando sus capacidades.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. The Open Group (2013). *Safety-Critical Java Technology Specification JSR-302*. Version 0.94, 25-06-2013. Oracle. On line, última consula 12-10-2015 http://download.oracle.com/otn-pub/jcp/safety_critical-0_94-edr2-spec/scj-EDR2.pdf.
2. Stephan E. Korsholm (2014). *The HVM Reference Manual*. Icelabs, Dinamarca. On line, última consula 05-10-2015 en <http://http://icelab.dk/resources/HVMRef.pdf>.