



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DE DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA
COMPUTACIÓN

**Diseño y Verificación de Sistemas de
Tiempo Real Heterogéneos**

Francisco Ezequiel Páez

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2020

Prefacio

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado académico de Doctor en Ciencias de la Computación, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta u otra Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo durante el período comprendido entre Abril de 2012 y Diciembre de 2019, bajo la dirección del Dr. Javier D. Orozco, la co-dirección del Dr. Pablo Fillottrani y la supervisión local del Dr. José M. Urriza.

Francisco Ezequiel Páez
Puerto Madryn, Noviembre 2020

Dedico esta Tesis a mis padres

Agradecimientos

Agradecer en primer lugar a mis padres, por su apoyo, cariño y querer siempre hacer de mí una mejor persona.

A la Universidad Nacional del Sur, en especial al Departamento de Ciencias e Ingeniería de la Computación y al Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras. Al CONICET y a la Secretaria de Ciencia, Investigación e Innovación Productiva de la Provincia del Chubut. A la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, en particular a la Facultad de Ingeniería, por formarme en su momento como Licenciado en Informática.

A mis hermanos Lila, Joaquín y Néstor. A David López Villegas y Paula Alzorriz, por su amistad y hospitalidad en cada viaje a Bahía Blanca.

A mis directores, por la confianza depositada en mí para la realización de esta tesis. Especialmente al Dr. José M. Urriza, cuya constante guía, consejo y amistad han sido invaluable.

Y sobre todo a Joanna, por su amor y compañía, tanto en los mejores como en los más difíciles momentos que vivimos juntos durante estos años.

Resumen

Un Sistema de Tiempo Real (*STR*) debe garantizar que sus resultados, además de correctos, cumplan también con un conjunto de restricciones temporales. En general, esto implica asegurar que sus tareas finalicen su ejecución antes de un vencimiento. Para cumplir esto, la predictibilidad y el determinismo adquieren suma importancia.

El campo de aplicación clásico de los *STR* ha sido la industria, como por ejemplo la aviónica, la exploración espacial, equipamiento médico, sistemas de control, etc. Todos estos sistemas tienen en común el de ser de *misión crítica*, donde un fallo tiene consecuencias graves, como pérdidas materiales y económicas, daños al medio ambiente o poner en riesgo la vida humana. Por lo general estos sistemas son estáticos, y utilizan arquitecturas de hardware y algoritmos de efectividad comprobada. En muchas ocasiones su diseño e implementación es *ad-hoc*.

Sin embargo, en las últimas décadas el campo de aplicación de los *STR* se ha extendiendo. En la actualidad son utilizados en ámbitos y productos de lo más variados: electrodomésticos, productos electrónicos de consumo, telefonía celular, automóviles, comunicaciones, sistemas de reservas de pasajes, etc.

Muchos de estos sistemas están constituidos tanto por tareas críticas como por tareas no-críticas. Un fallo en la ejecución de las primeras tiene consecuencias graves, en tanto que el incumplimiento de las restricciones temporales de las últimas afecta la calidad de servicio esperada. Es vital entonces que las tareas no-críticas no afecten la correcta ejecución de las tareas críticas. Un *STR* con estas características se denomina *heterogéneo*. En los últimos años, gracias al incremento de la potencia de cálculo de los microprocesadores, y la reducción de sus costos, el número de *STR* que permiten que coexistan estos dos conjuntos de tareas ha aumentado.

Para lograr una correcta ejecución de un *STR* heterogéneo, se requiere de técnicas que calculen y administren en línea, el tiempo ocioso disponible. De esta manera, el

planificador puede mantener la garantía de cumplimiento de las constricciones temporales de las tareas críticas, y al mismo tiempo brindar una atención aceptable a las tareas sin requerimientos estrictos. En la actualidad, microprocesadores más potentes abren la posibilidad de implementar estos métodos incluso en sistemas que antaño contaban con muy baja potencia de cálculo. Sin embargo, la sobrecarga que agregan no es despreciable, por lo que reducir el costo computacional de estos métodos sigue siendo de suma utilidad, aún cuando se dispone de hardware con mayor capacidad de computo.

Existe una amplia literatura que aborda la problemática de la planificación de *STR* heterogéneos. Sin embargo, existe una brecha significativa entre los desarrollos teóricos en la disciplina, y las técnicas efectivamente utilizadas en la industria. Es necesario poder comprobar el costo real y las ventajas y desventajas objetivas de implementar los modelos teóricos de punta.

Muchos modelos teóricos no tienen en cuenta costos adicionales presentes en implementaciones concretas. Estos son comúnmente considerados despreciables en la modelización, a fin de simplificar el análisis, la evaluación y el desarrollo del sistema. Como consecuencia, en la implementación real se estos parámetros se sobrestiman, lo que resulta en una menor eficiencia del sistema. Un ejemplo común es el uso de microprocesadores con una capacidad de cálculo por encima de la realmente requerida, lo que impacta negativamente en el consumo de energía y en los costos. Un modelo más detallado en la etapa de diseño, implementación y verificación, permitiría mejorar el desempeño del sistema final, sin abandonar la garantía de predictibilidad temporal. Igualmente importantes, se deben contar con técnicas y herramientas que permitan implementar estos modelos métodos teóricos de manera eficiente.

La presente tesis se basa en la hipótesis de que los *STR heterogéneos* pueden ser eficaces en la planificación de sus conjuntos de tareas y en el uso de sus recursos computacionales. Bajo esta premisa, se presentan nuevos modelos y mejoras a modelos ya existentes, junto con simulaciones, pruebas y desarrollos necesarios para su verificación. El trabajo se basa fuertemente en la implementación práctica de los resultados teóricos, identificando las dificultades reales que su puesta en práctica trae aparejado. De esta manera, se busca reducir la brecha existente entre los resultados obtenidos por la investigación científica en la disciplina de los *STR*, y aquello concretamente utilizado e implementado realmente en la industria, la investigación y el desarrollo tecnológico.

Abstract

A Real-Time System (*RTS*) must warrant that its results are correct and fulfill a set of temporal restrictions. This implies that each task completes its execution before a specific deadline. In order to accomplish this, the predictability and determinism of the system as a whole is very important.

These kind of systems are used in several industries, like aircraft avionics, space exploration, medical equipment, etc., which are mission critical. A failure in this systems could have catastrophic consequences, like loss of human lives. Most of the time the design and implementation of these systems is ad-hoc.

In the last decades, thanks to the growth and sophistication of embedded systems, the application domain of the *RTS* increased. Nowadays they can be found on consumer electronics, cellphones, communications systems, cars, etc.

A lot of these new kind of real-time systems are composed of both critical and non-critical tasks. A failure in the execution of the former have severe consequences, but a missed deadline of the later only affects the quality of service. Such a *RTS* is known as a *heterogeneous* one.

In order to accomplish a correct execution of a heterogeneous *RTS*, methods and techniques that calculates and manages the system idle-time are needed. With these tools, the system scheduler can guarantee that all the time-critical tasks fulfill their deadlines. Nonetheless, these techniques add an execution overhead to the system.

Although several works in the literature proposes solutions for many of the scheduling problems in a heterogeneous *RTS*, a gap exists between these results and what is actually used and implemented in the industry.

Many theoretical models do not take into account the additional costs present in a concrete implementation. These are commonly considered negligible in order to simplify the analysis, evaluation and development of the system. As a consequence, some param-

eters are overestimated, resulting in reduced system efficiency. A common scenario is the use of microprocessors more powerful than required, with negative impact on energy consumption and production costs. A more detailed model in the design and implementation stage could improve the performance of the final system, without abandoning the guarantee of temporal predictability. Equally important, there must be techniques and tools that allow the implementation of these theoretical results.

The working hypothesis of this thesis is that a heterogeneous *RTS* could be efficient in the scheduling of their tasks and resources. Following this premise, new models and improvements to existing ones are presented, in conjunction with several simulations and implementations of the theoretical results, in order to identify the real difficulties that the implementation brings about. This seeks to reduce the gap between the scientific research in the discipline of *RTS* and what actually implemented in the industry.