RICARDO JORGE SILVÉRIO DE MAGALHÃES MACHADO

Metodologias de Desenvolvimento em Projectos de Engenharia de Computadores no Suporte à Implementação de Sistemas de Informação Distribuídos Não Convencionais (Industriais)

Tese de Doutoramento submetida à ESCOLA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO MINHO
para a obtenção do grau académico de
Doutor em *Informática/Engenharia de Computadores*.

UNIVERSIDADE DO MINHO
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO

Braga, Novembro de 2000

ESCOLA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO MINHO
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO

GRUPO DE ENGENHARIA DE TELECOMPUTAÇÃO
CENTRO DE INVESTIGAÇÃO ALGORITMI

METODOLOGIAS DE DESENVOLVIMENTO EM PROJECTOS DE ENGENHARIA DE COMPUTADORES NO SUPORTE À IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO DISTRIBUÍDOS NÃO CONVENCIONAIS (INDUSTRIAIS)

Ricardo Jorge Silvério de Magalhães Machado

Licenciado em *Engenharia Electrotécnica e de Computadores*
Ramo de *Telecomunicações e Computadores*
pela FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO, 1994

Mestre em *Informática*
Área de Especialização em *Sistemas Distribuídos,*
Comunicações por Computador e Arquitectura de Computadores
pela ESCOLA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO MINHO, 1996

Tese de Doutoramento submetida para satisfação dos requisitos do
Grau Académico de Doutor em *Informática/Engenharia de Computadores*
e realizada sob a supervisão científica do Prof. Doutor Eng.º Henrique Manuel Dinis dos Santos,
Professor Associado do DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO DA
ESCOLA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO MINHO

Braga, Novembro de 2000

FICHA TÉCNICA

Título: *Metodologias de Desenvolvimento em Projectos de Engenharia de Computadores no Suporte à Implementação de Sistemas de Informação Distribuídos Não Convencionais (Industriais)*
Autor: *Ricardo Jorge Silvério de Magalhães Machado*
Âmbito: *Tese de Doutoramento (ramo de Informática, área de conhecimento em Engenharia de Computadores)*
Orientador: *Henrique Manuel Dinis dos Santos*
Instituição: *Escola de Engenharia - Universidade do Minho*
Data de Início: *Projecto de Doutoramento aprovado pelo Conselho Científico da Escola de Engenharia da Universidade do Minho em 1997/07/23*
Data de Conclusão: *Novembro de 2000*

Impressão e Acabamentos: *Serviços de Reprografia e Publicações, Universidade do Minho, Largo do Paço, 4700-320 Braga*
Edição: *1ª edição (8 exemplares), Braga, Novembro de 2000*
2ª edição (92 exemplares), Braga, Abril de 2001

À Sofia e à pequena Inês,

À mãe Lourdes e ao pai Manuel.

"A verdade de um curso não está no que aí se aprende, mas no que disso sobeja:
o halo que isso transcende e onde podemos achar-nos homens."

Virgílio Ferreira

Entidades, Programas e Iniciativas que Apoiaram esta Tese:

UNIVERSIDADE DO MINHO

ESCOLA DE ENGENHARIA

PRAXIS

Resumo

Os sistemas (baseados em computador) tempo-real embebidos constituem, cada vez mais, um dos suportes computacionais privilegiados para ajudar a dotar a almejada *sociedade da informação e do conhecimento* das necessárias infra-estruturas tecnológicas, caracterizadas pela versatilidade funcional (reconfiguração dinâmica), ubiquidade (distribuição generalizada e computação arbitrariamente remota) e heterogeneidade implementacional (*hardware*/*software*). Perante a recente proliferação e apetência por este tipo de sistemas, cada vez mais complexos, computacionalmente poderosos e não convencionais, os projectistas têm sido confrontados com a "inexistência" (fraca existência) de metodologias de desenvolvimento compatíveis com as exigências de projecto que aquele tipo de sistemas coloca, nomeadamente no que diz respeito ao controlo da complexidade e à garantia da continuidade dos modelos.

Esta tese propõe uma metodologia de desenvolvimento de sistemas tempo-real embebidos, designada de *INES* (***i**ntegrated e**n**vironment for **e**mbedded **s**ystems design*), que recorre a especificações homogéneas (representações unificadas), neutras (independência da implementação), orientadas por objecto, multi-vista e parcialmente compatíveis com a norma *OMG UML*, sobre as quais actua o processo de reificação que adopta a proposta da estratégia do *4-set rule set* para garantir a continuidade dos modelos na passagem dos requisitos do utilizador para os requisitos do sistema. Para suportar especificamente as vistas dinâmicas é proposto um meta-modelo baseado em redes de Petri orientadas por objectos, o meta-modelo *shobi-PN v2.0*.

No que diz respeito ao macroprocesso da metodologia *INES*, é sugerida uma abordagem em que existem três níveis distintos de co-projecto *hardware*/*software* (3 microprocessos independentes), como forma de promover a minimização do tempo de implementação dos sistemas (soluções finais), por reutilização intensiva e parametrização de módulos, designados de FMOTSs (***f**unctional-**m**odules-**o**ff-**t**he-**s**helf*), previamente desenvolvidos e afectos a classes de funcionamento perfeitamente caracterizadas. No âmbito dos microprocessos de níveis 2 e 3 da metodologia *INES*, a formalização das interfaces dos FMOTSs pode ser realizada à custa da utilização da notação gráfica FIDL (***F**MOTSs **i**nterface **d**efinition **l**anguage*) proposta e a concepção arquitectural é baseada na utilização do padrão (*design pattern*) *Multi-Level ICIS* proposto.

Adicionalmente à metodologia *INES*, foram propostos (adoptados e adaptados) dois ambientes de desenvolvimento: (1) um que suporta o nível 2 de (co-)projecto (desenvolvimento de FMOTSs) à custa da ferramenta de CASE (***c**omputer **a**ided **s**oftware **e**ngineering*) *OBLOG*, para a qual foi desenvolvido um pacote de geração automática de código *C* para a família *MCS-51* da *INTEL* e adaptado um pacote de geração automática de código *JAVA* para proceder à simulação funcional de FMOTSs; (2) outro que suporta o nível 3 de (co-)projecto (desenvolvimento de soluções finais) à custa da ferramenta de CAE (***c**omputer **a**ided*

e**ngineering*) *LabVIEW*, para a qual foi desenvolvida a biblioteca *VAL* (v**irtual **a**utomation **l**ibrary*) para elevar o nível de abstracção do desenvolvimento das soluções finais. Foram, também, desenvolvidos o escalonador *VASch* (***v**irtual **a**utomation **sch**eduler*), para dotar os FMOTSs da capacidade de multiprocessamento, e o protocolo de comunicações *VAP* (***v**irtual **a**utomation **p**rotocol*), para implementar, sobre uma rede industrial baseada em *CAN*, um pacote de serviços de comunicações para interligar funcionalmente vários FMOTSs.

Uma vez que os sistemas de informação industriais orientados ao controlo (***i**ndustrial **c**ontrol-based **i**nformation **s**ystems* - ICISs) constituem a área aplicacional privilegiada desta tese, foram utilizados dois casos de estudo industriais e reais para validar as propostas metodológicas e tecnológicas aqui sugeridas. No âmbito do primeiro, realizado na *BLAUPUNKT AUTO-RÁDIOS PORTUGAL*, procedeu-se à especificação completa, e sua simulação funcional e estatística, de um controlador distribuído para uma linha de produção de auto-rádios. No âmbito do segundo, realizado na *TÊXTIL A. FALCÃO*, realizou-se a concepção e implementação de um sistema de supervisão de uma linha de produção de meias, que possibilitou o desenvolvimento de um FMOTS capaz de supervisionar diversas marcas/modelos de teares para a indústria têxtil.

Palavras Chave: *metodologias de desenvolvimento, projecto, co-projecto, especificação, redes de Petri, orientação aos objectos, desenvolvimento baseado em componentes, arquitectura de software, padrões de concepção, arquitecturas reconfiguráveis, sistemas tempo-real, sistemas embebidos, sistemas baseados em computador, UML, OBLOG, LabVIEW.*

Áreas Temáticas: *engenharia de software, arquitectura de sistemas informáticos, informática industrial distribuída, sistemas de informação industriais.*

Abstract

Real-time embedded (computer-based) systems have been increasingly used as one of the privileged computational supports to endow the desired *knowledge and information society* with the necessary technological infrastructures, characterised by its functional versatility (dynamic reconfiguration), ubiquity (generalised distribution and arbitrary remote computation) and heterogeneous implementations (hardware/software). In the presence of the recent proliferation and demand for this kind of systems, each time more complex, computationally powerful and non-conventional, designers have been confronted with the "non-existence" (weak existence) of development methodologies capable of dealing with the demanding design requirements that those kind of systems poses, namely in what concerns the control of complexity and of models' continuity.

This thesis proposes the *INES* (*integrated environment for embedded systems design*) methodology for real-time embedded systems development, that employs homogeneous (unified representations), neutral (implementation independence), object-oriented, multiple view and *OMG UML* partially compliant specifications. The reification process, executed over those specifications, adopts the proposed *4-step rule set* strategy to assure the models' continuity in the transformation of user's requirements into system's requirements. To support the dynamic views, the author proposes one object-oriented Petri net-based meta-model, called *shobi-PN v2.0*.

In what concerns *INES* macroprocess, a 3-level hardware/software co-design approach (3 independent microprocesses) is suggested, as a means to reach a minimal implementation time of the desired systems (final solutions). This goal is achieved by reusing and parameterising pre-synthesised modules, called FMOTSs (***f****unctional-****m****odules-****o****ff-****t****he-****s****helf*), belonging to clearly defined functional classes. Within *INES* microprocesses of levels 2 and 3, it is possible to formalise the FMOTSs interface by using the proposed FIDL (***F****MOTSs* ***i****nterface* ***d****efinition* ***l****anguage*) graphical notation, and architectural design is based on the proposed *Multi-Level ICIS* design pattern.

Besides the *INES* development methodology, this thesis has proposed (adopted and adapted) two design environments: (1) one that supports level 2 of (co-)design (development of FMOTSs) by using the *OBLOG* CASE (***c****omputer* ***a****ided* ***s****oftware* ***e****ngineering*) tool, for which a package for automatic *C* code generation for the *INTEL MCS-51* family has been developed and a package for automatic *JAVA* code generation has been adapted to allow the functional simulation of FMOTSs; (2) another that supports level 3 of (co-)design (development of final solutions) by using the *LabVIEW* CAE (***c****omputer* ***a****ided* ***e****ngineering*) tool, for the *VAL* (***v****irtual* ***a****utomation* ***l****ibrary*) library which has been developed, to allow the rising of the abstraction level in the development of final solutions. Additionally, the *VASch* (***v****irtual* ***a****utomation*

sch*eduler*) scheduler has been developed, to endow FMOTSs with the capability of multiprocessing, and the *VAP* (***v****irtual* ***a****utomation* ***p****rotocol*) communications protocol has been defined, to implement a communication service pack, over an industrial network based on *CAN*, to allow the functional interconnect of several FMOTSs.

Since **i**ndustrial **c**ontrol-based **i**nformation **s**ystems (ICISs) constitutes the main application area of this thesis, two real industrial case studies have been used to validate the methodological and technological proposals suggested here. In the first case, performed at *BLAUPUNKT AUTO-RÁDIOS PORTUGAL*, a distributed controller for a production line of car radios has been fully specified and functionally and statistically simulated. In the second case, performed at *TÊXTIL A. FALCÃO*, a supervision system for a production line of socks has been designed and implemented, which allowed the development of one FMOTS capable of supervising several kinds of knitting machines for the textile industry.

Keywords: *design methodologies, design, co-design, specification, Petri nets, object orientation, component-based design, software architecture, design patterns, reconfigurable architectures, real-time systems, embedded systems, computer-based systems, UML, OBLOG, LabVIEW.*

Thematic Areas: *software engineering, architecture of computer systems, distributed industrial informatics, industrial information systems.*

Índice

Índice de Figuras

Índice de Tabelas

Acrónimos e Abreviaturas

"You have to study a great deal to know a little"

Charles de Secondat, Baron de Montesquieu

5 T's	***t**imelines, **t**asks, **t**ools, **t**echnology, **t**alent*
ACID	***a**tomicity, **c**onsistency, **i**solation, **d**urability*
ADC	***a**nalog/**d**igital **c**onverter*
ADT	***a**bstract **d**ata **t**ype*
ALU	***a**rithmetic and **l**ogic **u**nit*
AMT	***a**synchronous **m**acro-**t**ransition*
API	***a**pplication **p**rogram **i**nterface*
ASIC	***a**pplication-**s**pecific **i**ntegrated **c**ircuit*
ASIP	***a**pplication-**s**pecific **i**nstruction-set **p**rocessor*
BD	***b**lock **d**iagram*
bit	***b**inary dig**it***
BJT	***b**ipolar **j**unction **t**ransistor*
BLIF	***B**erkeley **l**ogic **i**nterchange **f**ormat*
BLIF-MV	***m**ulti-**v**alued **B**erkeley **l**ogic **i**nterchange **f**ormat*
BPM/E	***b**usiness **p**rocess **m**anagement/**e**ngineering*
CAD	***c**omputer **a**ided **d**esign*
CAE	***c**omputer **a**ided **e**ngineering*
CAM	***c**omputer **a**ided **m**anufacturing*
CAN	***c**ontroller **a**rea **n**etwork*
CANit	***C**AN **i**ndustrial **t**erminal*
CASE	***c**omputer **a**ided **s**oftware **e**ngineering*
CBD	***c**omponent-**b**ased **d**evelopment*
CBS	***c**omputer-**b**ased **s**ystem*
CCD	***c**omponent-**c**onnectivity **d**iagram*
CDFG	***c**ontrol/**d**ata **f**low **g**raph*
CFG	***c**ontrol **f**low **g**raph*

CFSM	***c**o-design **f**inite-**s**tate **m**achine*
CIA	***C**AN **i**n **A**utomation International Users and Manufacturers Group e. V.*
CIM	***c**omputer **i**ntegrated **m**anufacturing*
CLB	***c**onfigurable **l**ogic **b**lock*
CMOS	***c**omplementary **m**etal-**o**xide **s**emiconductor*
CNC	***c**omputer **n**umerically **c**ontrolled*
CODES	***c**oncurrent **d**esign **e**nvironment*
COM	***c**omponent **o**bject **m**odel*
CORBA	***c**ommon **o**bject **r**equest **b**roker **a**rchitecture*
COSYMA	***cosy**nthesis for embedded **m**icro **a**rchitectures*
COTS	***c**omponent-**o**ff-**t**he-**s**elf*
CPLD	***c**omplex **p**rogrammable **l**ogic **d**evice*
CPU	***c**entral **p**rocessing **u**nit*
CSMA/CD	***c**arrier **s**ense **m**ultiple **a**ccess with **c**ollision **d**etected*
CTR	***c**ompile-**t**ime **r**econfiguration*
DCOM	***d**istributed **C**O**M***
DFD	***d**ata **f**low **d**iagram*
DFG	***d**ata **f**low **g**raph*
DLL	***d**ynamic **l**ink **l**ibrary*
DSP	***d**igital **s**ignal **p**rocessor*
ECAD	***e**lectronic **c**omputer **a**ided **d**esign*
ECL	***e**mitter-**c**oupled **l**ogic*
EDA	***e**lectronic **d**esign **a**utomation*
EDF	***e**arliest **d**eadline **f**irst*
EDIF	***e**lectronic **d**esign information **i**nterchange **f**ormat*
EEPROM	***e**lectrically **EPROM*** (*=E2PROM*)
EFSM	***e**xtended **f**inite-**s**tate **m**achine*
EPLD	***e**lectrically **p**rogrammable **l**ogic **d**evice*
EPROM	***e**rasable **p**rogrammable **r**ead-**o**nly **m**emory*
ERD	***e**ntity-**r**elationship **d**iagram*
ERP	***e**nterprise **r**esources **p**lanning*
ESA	***E**uropean **S**pace **A**gency*
ESG	***e**xtended **s**yntax **g**raph*
ETPN	***e**xtended **t**imed **P**etri **n**et*
FC	***f**low**c**hart*
F-CCM	***F**PGA-based **c**ustom **c**omputing **m**achine*
FIDL	***F**MOTSs **i**nterface **d**efinition **l**anguage*
FMOTS	***f**unctional-**m**odule-**o**ff-**t**he-**s**helf*
FMS	***f**lexible **m**anufacturing **s**ystems*

FPCB	***f**ield-**p**rogrammable **c**ircuit **b**oard*
FPGA	***f**ield **p**rogrammable **g**ate-**a**rray*
FPI	***f**ield-**p**rogrammable **i**nterconnect*
FPIC	***f**ield-**p**rogrammable **i**nterconnect **c**omponent*
FPID	***f**ield-**p**rogrammable **i**nterconnect **d**evice*
FPLD	***f**ield-**p**rogrammable **l**ogic **d**evice*
FSA	***f**inite-**s**tate **a**utomata*
FSM	***f**inite-**s**tate **m**achine*
FSMD	***f**inite-**s**tate **m**achine with **d**ata path*
GAL	***g**eneric **a**rray **l**ogic*
GAS	***g**eneralized **a**rc **s**et*
GSM	***g**lobal **s**ystem for **m**obile communications*
GUI	***g**raphical **u**ser **i**nterface*
HCFSM	***h**ierarchical **c**oncurrent **f**inite-**s**tate **m**achine*
HCPLD	***h**igh-**c**apacity **p**rogrammable **l**ogic **d**evice*
HDL	***h**ardware **d**escription **l**anguage*
HLL	***h**igh-**l**evel **l**anguage*
HLS	***h**igh-**l**evel **s**ynthesis*
HMI	***h**uman-**m**achine **i**nterface*
HOOD	***h**ierarchical **o**bject-**o**riented **d**esign*
HPC	***h**igh **p**erformance **c**omputer*
HTML	***h**yper**t**ext **m**ark-up **l**anguage*
HTTP	***h**yper**t**ext **t**ransfer **p**rotocol*
I&D	***i**nvestigação **e** **d**esenvolvimento*
I/O	***i**nput and **o**utput*
ICIS	***i**ndustrial **c**ontrol-based **i**nformation **s**ystem*
IEC	***I**nternational **E**lectrotechnical **C**ommission*
IEEE	***I**nstitute of **E**lectrical and **E**lectronics **E**ngineers*
ILP	***i**nstruction-**l**evel **p**arallelism*
INES	***i**ntegrated e**n**vironment for **e**mbedded **s**ystems design*
INSYDE	***in**tegrated **sy**stem **de**sign*
IOB	***i**nput/**o**utput **b**lock*
IP	***i**nternet **p**rotocol*
ISO	***I**nternational **O**rganisation for **S**tandardisation*
ISP	***i**nstruction-**s**et **p**rocessor*
ISP	***i**n-**s**ystem **p**rogramming*
JEDEC	***J**oint **E**lectron **D**evice **E**ngineering **C**ouncil*
JSD	***J**ackson's **s**tructured **d**iagram*
JTAG	***J**oint **T**est **A**ction **G**roup*

JVM *JAVA virtual machine*

KISS *keep it simple, stupid!*

LCA *logic cell array*

LED *light emitting diode*

LLC *logic link control*

LSI *large-scale integration*

LUT *lookup table*

LYCOS *Lyngby co-synthesis*

MAC *medium access control*

MAP *manufacturing automation protocol*

MCSE *methodology for electronic systems design*

MIS *management information system*

MMS *manufacturing message specification*

MOOSE *model-based object oriented systems engineering*

MOSFET *metal-oxide semiconductor field-effect transistor*

MPGA *mask programmable gate array*

MPLD *mask programmable logic device*

MSI *medium-scale integration*

NASA *NATIONAL AERONAUTICS & SPACE ADMINISTRATION*

NIO *nets inside objects*

NRE *nonrecurring engineering costs*

NUMA *non-uniform memory access*

OBLOG *object logic*

OCL *object constraint language*

OIN *objects inside nets*

OLE *object linking and embedding*

OMG *object management group*

OMT *object modeling technique*

OO *object-orientation*

OOA *object-oriented analysis*

OOA/D *object-oriented analysis and design*

OOD *object-oriented design*

OOIE *object-oriented information engineering*

OORT *object-oriented real-time techniques*

OOSE *object-oriented software engineering*

OPC *OLE for process control*

ORB *object request broker*

PAL *programmable array logic*

PCB *printed circuit board*

PDA	***p**ersonal **d**igital **a**ssistant*
PERC	***p**ortable **e**xecutive **r**eliable **c**ontrol*
PL	***p**rogramming **l**anguage*
PLA	***p**rogrammable **l**ogic **a**rray*
PLC	***p**rogrammable **l**ogic **c**ontroller*
PN	***P**etri **n**et*
POS	***p**lant **o**perations **s**ystem*
POSIX	***p**ortable **o**perating **s**ystem **i**nterface for computer environments*
PR/T-NET	***pr**edicate **t**ransition **net***
PRAM	***p**arallel **r**andom **a**ccess **m**achine*
PROM	***p**rogrammable **r**ead-**o**nly **m**emory*
PSM	***p**rogram-**s**tate **m**achine*
RDL	***r**ule **d**efinition **l**anguage*
RMS	***r**ate **m**onotonic **s**cheduling*
ROOM	***r**eal-time **o**bject-**o**riented **m**odeling*
RPC	***r**emote **p**rocedure **c**all*
RTEUML	***r**eal-**t**ime **e**xtensions to **u**nified **m**odeling **l**anguage*
RTJEG	***R**eal-**T**ime for **J**AVA **E**xperts **G**roup*
RTL	***r**egister **t**ransfer **l**evel*
RTOS	***r**eal-**t**ime **o**perating **s**ystem*
RTR	***r**un-**t**ime **r**econfiguration*
RTSA	***r**eal-**t**ime **s**tructured **a**nalysis*
RTSJ	***r**eal-**t**ime **s**pecification for **J**AVA*
RTUML	***r**eal-**t**ime **u**nified **m**odeling **l**anguage*
SC	***s**tructure **c**hart*
SCADA	***s**upervision, **c**ontrol, **a**utomation and **d**ata **a**cquisition*
SDRTS	***s**tructured **d**evelopment for **r**eal-**t**ime **s**ystems*
SHIFT	***s**oftware **h**ardware **i**nterchange **f**orma**t***
shobi-PN	***s**ynchronous **h**ierarchical **ob**ject-oriented and **i**nterpreted **P**etri **n**et*
SIPN	***s**ynchronous and **i**nterpreted **P**etri **n**et*
SLDL	***s**ystem-**l**evel **d**esign **l**anguage*
SMS	***s**hort **m**essage **s**ervice*
SMT	***s**ynchronous **m**acro-**t**ransition*
SMTP	***s**imple **m**ail **t**ransfer **p**rotocol*
SOFHIA	***sof**tware for **hi**erarchical **a**rchitectures*
SOMA	***s**emantic **o**bject **m**odeling **a**pproach*
SPLD	***s**imple **p**rogrammable **l**ogic **d**evice*
SQL	***s**tructured **q**uery **l**anguage*
SRAM	***s**tatic **r**andom-**a**ccess **m**emory*

SRTSS	***s**trategies for **r**eal-**t**ime **s**ystem **s**pecification*
SSI	***s**mall-**s**cale **i**ntegration*
STD	***s**tate **t**ransition **d**iagram*
TAP	***t**est **a**ccess **p**ort*
TCP	***t**ransmission **c**ontrol **p**rotocol*
TOP	***t**echnical and **o**ffice **p**rotocol*
TOSCA	***to**ols for **s**ystem **c**o-design **a**utomation*
TTL	***t**ransistor-**t**ransistor **l**ogic*
UML	***u**nified **m**odeling **l**anguage*
UMLRT	***UML** for **r**eal-**t**ime*
VAB-CCM	*VLSI **a**ccelerator-**b**ased **c**ustom **c**omputing **m**achine*
VAL	***v**irtual **a**utomation **l**ibrary*
VAP	***v**irtual **a**utomation **p**rotocol*
VASch	***v**irtual **a**utomation **sch**eduler*
VHDL	***VHSIC HDL** (**v**ery **h**igh **s**peed **i**ntegrated **c**ircuit **h**ardware **d**escription **l**anguage)*
VHSIC	***v**ery **h**igh **s**peed **i**ntegrated **c**ircuit*
VI	***v**irtual **i**nstrument*
VLSI	***v**ery-**l**arge-**s**cale **i**ntegration*
WAP	***w**ireless **a**pplication **p**rotocol*
WML	***w**ireless **m**ark-up **l**anguage*
WCET	***w**orst-**c**ase **e**xecution **t**ime*
WORA	***w**rite **o**nce, **r**un **a**nywhere*

Prefácio

"O grau de doutor comprova
a realização de uma contribuição inovadora e original para o progresso do conhecimento,
um alto nível cultural numa determinada área do conhecimento e
a aptidão para realizar trabalho científico independente."

Art.º 17º, Cap.º III, Dec.-Lei n.º 216/92, de 13 de Outubro, Ministério da Educação

Enquadramento

A estimativa recente de que nos países desenvolvidos (classificação da responsabilidade da OCDE) existe mais do que uma dezena de sistemas embebidos por cada habitante, leva-me a pensar na enorme quantidade de profissionais que se dedica actualmente ao projecto (desenvolvimento/programação) desses sistemas, tendo em conta que ainda não é usual os *curricula* das licenciaturas (em engenharia electrotécnica, engenharia de computadores e engenharia informática) disponibilizarem disciplinas naquela área, bem como o facto de não existir uma grande oferta bibliográfica acerca do projecto daquele tipo de sistemas.

Neste cenário pouco amistoso para quem acaba por se dedicar profissionalmente à área dos sistemas embebidos, tive a sorte de lidar com aqueles sistemas em duas realidades estruturantes para a minha formação como engenheiro. Na primeira, ainda como estagiário de licenciatura na ENSEA em Cergy/Paris, tive a oportunidade de verificar a importância dos sistemas embebidos para a electrónica de consumo, uma vez que estive envolvido no desenvolvimento de uma unidade de processamento de voz em tempo-real para incorporar (embeber) num produto de um dos maiores fabricantes franceses de sistemas de áudio profissional, a *BARTHE*. A segunda, já como engenheiro de desenvolvimento da TISEP na Maia/Porto, fui confrontado com a realidade industrial dos sistemas embebidos, uma vez que fui "obrigado" a projectar alguns para supervisionarem, monitorizarem e controlarem equipamentos e processos produtivos (um dos quais deu, agradavelmente, origem ao registo de uma patente).

Estas duas experiências pessoais acabaram por marcar profundamente este doutoramento, pelo facto de me terem sensibilizado para a importância da fertilização cruzada entre a Universidade e a Indústria na execução das actividades de investigação: (1) no sentido *Indústria* $\rightarrow$ *Universidade* com o objectivo de sensibilizar e influenciar a investigação na direcção das necessidades reais das pessoas; (2) no sentido *Universidade* $\rightarrow$ *Indústria* com o objectivo de introduzir nos processos, sistemas e produtos reais as inovações científicas e

tecnológicas, desenvolvidas no seio de um ambiente protegido e despreocupado das pressões produtivas e comerciais sempre presentes nos ambientes empresariais. A defesa da necessidade desta fertilização cruzada é, aliás, extrapolada para a própria actividade de docência universitária pelo Professor Doutor Eng.º Júlio Barreiros Martins, aquando da sua jubilação na *UNIVERSIDADE DO MINHO* em Julho de 2000 (da qual foi publicado um excerto pela revista *Ingenium*, em Setembro de 2000, com o título *Investigação Fundamental e Investigação Aplicada*), quando refere que:

"*... o professor universitário, para verdadeiramente o ser, tem de estar ligado à investigação aplicada e portanto no acompanhamento das grandes obras e seus projectos e/ou na resolução de problemas que a respeito das obras reais sempre se colocam.*".

Outra influência marcante nesta tese consiste no facto da minha formação de base (licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) me ter fornecido uma visão clássica da disciplina de projecto, em que a abordagem é solidamente fundamentada nos princípios científicos e tecnológicos comprovadamente aceites como válidos para basear todas as tomadas de decisão conducentes à implementação sustentada do sistema final em projecto. Esta realidade metodológica ainda não é totalmente possível no projecto de sistemas embebidos, tal como é magnificamente referido pelo Prof. Doutor Eng.º José Nuno Oliveira na sua "sebenta" da disciplina de *Especificação e Desenvolvimento Formal de Software* do Mestrado em Informática da *UNIVERSIDADE DO MINHO* (disciplina que eu tive o enorme prazer de frequentar há alguns anos atrás) a propósito da reificação de *software*:

"*Assim, todos os "truques" de programação introduzidos numa implementação para aumentar a sua eficiência são, por inerência, detalhes irrelevantes e sem significado ao nível da especificação de que se partiu. Em suma, o salto "epistemológico" entre especificações e implementações está longe de ser "suave" e é a principal preocupação da chamada tecnologia da reificação (ou refinamento), um ramo relativamente recente da engenharia da programação de computadores...*".

Perante este cenário de influência multifactorial (no que diz respeito à minha motivação pessoal para ter tratado, nesta tese, o tema do projecto de sistemas embebidos), este doutoramento foi desenvolvido, numa continuação explícita e intencional dos trabalhos de investigação iniciados no mestrado, como uma "cruzada" pessoal, com o objectivo de contribuir para que a disciplina de projecto em engenharia de computadores venha a ser considerada, um dia, uma disciplina clássica de projecto, pelas vindouras especialidades de engenharia que já se adivinham neste, quase, início de século XXI.

Agradecimentos

Esta tese de doutoramento é o resultado de cerca de três anos de trabalho intensivo que não poderia ter sido desenvolvido e concluído sem a inevitável colaboração de várias pessoas e entidades, às quais gostaria de deixar aqui expresso o meu reconhecimento público.

Em primeiro lugar, pretendo agradecer sinceramente ao meu orientador científico, o *Prof. Doutor Eng.º Henrique Santos*, do departamento de Sistemas de Informação da *ESCOLA DE ENGENHARIA* da *UNIVERSIDADE DO MINHO*, o excepcional clima de abertura e diálogo que sempre incutiu nas inúmeras conversas e discussões que travámos ao longo deste anos. Este clima de informalidade, cordialidade e cooperação revelaram-se imprescindíveis numa tarefa que exige uma elevadíssima perseverança e resistência psicológica, como são a prossecução dos trabalhos de I&D subjacentes a um doutoramento, bem como a escrita propriamente dita do documento que materializa a tese, tantas são as adversidades que um doutorando português enfrenta ao longo do seu percurso para atingir a meta do grau académico desejado.

Adicionalmente, queria agradecer-lhe as conversas frutíferas que me proporcionou e os muitos comentários, críticas e sugestões que valorizaram enormemente esta tese. Obrigado por ter sabido encontrar o equilíbrio entre o *orientar* e o *criar espaço para aprender*!

Tenho de deixar expressa uma palavra de profundo agradecimento ao meu colega (recém Prof. Doutor) *Eng.º João Miguel Fernandes*, do departamento de Informática da *ESCOLA DE ENGENHARIA* da *UNIVERSIDADE DO MINHO*, pelo facto de me ter acompanhado nesta "cruzada" pessoal, desde que, em Julho de 1995, me encontrei com ele pela primeira vez nos, antigos, corredores do departamento de Informática. Desde então, o nosso percurso tem sido trilhado em conjunto, num equilíbrio perfeito entre a necessária satisfação legítima das aspirações pessoais e o desenvolvimento de esforços consertados na persecução de metas mais ambiciosas, somente alcançáveis através de uma adequada rentabilização das sinergias de grupo, que se traduziram, nomeadamente, nas actividades de co-coordenação operacional dos três projectos que estão na base deste doutoramento, para além das variadíssimas publicações científicas que juntos temos escrito. Não tenho quaisquer dúvidas em afirmar que sem a sua participação aqueles três projectos teriam seguido um rumo menos interessante. Agradeço-lhe também o tempo dispensado na revisão do texto desta tese.

Ao *Eng.º Braz Costa*, director-geral do *CITEVE* e director executivo da iniciativa SIPROFIT, ao *Eng.º Eduardo Pinto*, director operacional do *IDITE-Minho*, e ao *Eng.º Adelino Silva*, chefe do projecto INFRACOM, por terem acreditado que as minhas "teorias" poderiam ser aplicadas à realidade industrial portuguesa.

Ao *Eng.º José Cunha*, director de produção da *BLAUPUNKT AUTO-RÁDIOS PORTUGAL*, e ao *Dr. António Falcão*, director-geral da *TÊXTIL A. FALCÃO S.A.*, por terem promovido e cultivado uma aproximação exemplar entre a Universidade e a Indústria.

Ao *Dr. Luís Andrade* e ao *Dr. João Gouveia*, directores da *OBLOG SOFTWARE S.A.*, e ao *Eng.º Pedro Alves*, director da *NATIONAL INSTRUMENTS* em Portugal, pelas facilidades concedidas na utilização das ferramentas de CASE (*OBLOG EDITOR* e *OBLOG GENERATOR*) e de CAE (*LabVIEW*) que representam e pela prestável ajuda no esclarecimento das diversas dúvidas de carácter técnico que foram surgindo, ao longo destes anos, relativamente à utilização das referidas ferramentas.

Ao *Eng.º Jorge Cruz*, ao *Eng.º Francisco Duarte* e ao *Eng.º Fernando Barbosa*, os três quadros técnicos superiores da *BLAUPUNKT AUTO-RÁDIOS PORTUGAL*, pela forma dedicada e profissional como trabalharam no projecto de *Diagnóstico e Optimização do Sistema de Controlo das Linhas HIDRO*. Agradeço, igualmente, aos colegas *Prof. Doutor Eng.º Guilherme Pereira* e *Eng.º Luís Silva Dias*, do departamento de Produção e Sistemas da *ESCOLA DE ENGENHARIA* da *UNIVERSIDADE DO MINHO*, a preciosa colaboração prestada na simulação estatística do controlador especificado no âmbito do projecto acima referido. Com esta equipa materializou-se a primeira pedra basilar do meu doutoramento, a metodologia de especificação.

À equipa de desenvolvimento do projecto *Virtual Automation* (nas pessoas da *Celeste Pinto*, da *Dr.ª Paula Monteiro*, do *Eng.º Vitor Macedo*, do *Eng.º Sérgio Dias*, do *Eng.º Manuel Carvalho*, do *Eng.º Nuno Rodrigues* e do *Luís Costa*) queria exprimir os meus sinceros agradecimentos pela excepcional dedicação a um projecto que, devido à sua natureza, tanto trabalho e esforço tem exigido, de todos, para que a equipa, como um todo, atinja a tão almejada "luz ao fundo do túnel". Com esta equipa materializou-se a segunda pedra basilar do meu doutoramento, a metodologia de concepção.

Aos diversos alunos das licenciaturas em Matemática e Ciências da Computação, em Engenharia de Sistemas e Informática e em Engenharia Electrónica Industrial da *UNIVERSIDADE DO MINHO* que comigo colaboraram (*Ana Alves*, *Celeste Pinto*, *Paula Monteiro*, *Filipe Pereira*, *Hugo Paredes*, *Manuel Carvalho*, *Luís Costa*, *Rui Pimenta* e *Gonçalo Areias*), através da realização de projectos e estágios de final de curso, permitindo adiantar algumas das actividades realizadas nesta tese.

Do ponto de vista institucional, queria agradecer à *UNIVERSIDADE DO MINHO* (na pessoa do seu actual reitor, o *Professor Doutor Eng.º Chainho Pereira*), à *ESCOLA DE ENGENHARIA* (na pessoa do seu actual presidente, o *Professor Doutor Eng.º Guimarães Rodrigues*) e ao *CENTRO DE INVESTIGAÇÃO ALGORITMI* (na pessoa do seu actual director, o *Prof. Doutor Eng.º João Monteiro*) por terem disponibilizado as condições possíveis para suportar, dentro do exequível, a prossecução deste trabalho de doutoramento.

Do ponto de vista departamental, queria agradecer ao departamento de Informática (na pessoa do seu actual director, o *Prof. Doutor Eng.º Francisco Moura*), por, em Julho de 1997, ter apoiado a submissão, ao Conselho Científico da Escola, da minha proposta de plano de doutoramento ainda como docente daquele departamento, e ao departamento de Sistemas de Informação, o meu actual departamento, (nas pessoas dos seus actuais directores, o *Professor Doutor Eng.º Altamiro Machado* e o *Prof. Doutor Eng.º João Álvaro Carvalho*) por, desde a sua pré-génese ainda como NDIG (núcleo do departamento de Informática em Guimarães), ter acolhido com cordialidade e respeito o trabalho científico que tenho desenvolvido. Gostaria de agradecer especialmente ao *Professor Doutor Eng.º Altamiro Machado* pela força e incentivo que sempre me deu no "tratamento" das variantes *não convencionais* dos sistemas de informação.

Ao *ME/PRODEP* e à *FCT/PRAXIS*, pelo apoio financeiro que, directa ou indirectamente, concederam a esta tese, nomeadamente, na aquisição de material bibliográfico e no suporte às deslocações para apresentação de comunicações científicas em conferências e simpósios nacionais e internacionais na divulgação dos resultados deste doutoramento.

À *Sofia* e à pequena *Inês* agradeço toda a compreensão demonstrada ao longo destes cerca de 3 anos aquando da minha dupla actividade de "engenheiro de dia" e de "investigador à noite" que a tantos sacrifícios familiares obrigou. Assim, agradeço-lhes, sobretudo, todos aqueles serões, fins de semana, férias, horas, minutos, segundos ... que me "emprestaram" e que lhes pertenciam, mas que sem os quais não teria sido possível terminar este meu projecto pessoal e profissional tão rapidamente. Comprometo-me a devolver-lhes, com juros, o tempo perdido! Adicionalmente, agradeço à *Sofia* a ajuda e o tempo dispensados na revisão do texto desta tese.

Por último, não posso esquecer os meus *pais* pela forma dedicada como sempre me incutiram rigor no estudo e gosto pela investigação (que vieram a revelar-se cruciais para a minha carreira académica), nem a minha irmã *Rita* pelo seu incondicional apoio...

A todos muito obrigado !

Ricardo Jorge Silvério de Magalhães Machado

Outubro de 2000

Constituição do Júri*

Presidente	*Prof. Doutor Eng.º* **Carlos Bernardo**	Prof. Catedrático	Vice-Reitor da Universidade do Minho

Arguente	*Prof. Doutor Eng.º* **João Gabriel** Monteiro de Carvalho e Silva	Prof. Associado com Agregação	Dept. de Eng.ª Informática Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra
Arguente	*Prof. Doutor Eng.º* Adolfo Sanchez **Steiger Garção**	Prof. Catedrático	Dept. de Eng.ª Electrotécnica Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa

Vogal	*Prof. Doutor Eng.º* José Alfredo Ribeiro da **Silva Matos**	Prof. Catedrático	Dept. de Eng.ª Electrotécnica e de Computadores Faculdade de Engenharia Universidade do Porto
Vogal	*Prof. Doutor Eng.º* **Altamiro** Barbosa **Machado**	Prof. Catedrático	Dept. de Sistemas de Informação Escola de Engenharia Universidade do Minho
Vogal	*Prof. Doutor Eng.º* **Carlos** Alberto Caridade Monteiro e **Couto**	Prof. Catedrático	Dept. de Electrónica Industrial Escola de Engenharia Universidade do Minho
Vogal	*Prof. Doutor Eng.º* **Alberto** José Gonçalves de Carvalho **Proença**	Prof. Catedrático	Dept. de Informática Escola de Engenharia Universidade do Minho

Supervisor	*Prof. Doutor Eng.º* **Henrique** Manuel Dinis dos **Santos**	Prof. Associado	Dept. de Sistemas de Informação Escola de Engenharia Universidade do Minho

(*) As provas públicas de doutoramento foram realizadas no dia 20 de Março de 2001, na sala do Senado, na Reitoria da Universidade do Minho.