

CPS – Sistemas Ciberfísicos:

Ensino e Desenvolvimento

Prof. José Raimundo de Oliveira

26 de Agosto de 2022
DCA – FEEC – Unicamp

Sumário

- **Introdução e Conceitos**
- **Exemplos de Aplicação**
- **O desenvolvimento**
- **O ensino de CPS**
- **CPS na FEEC**

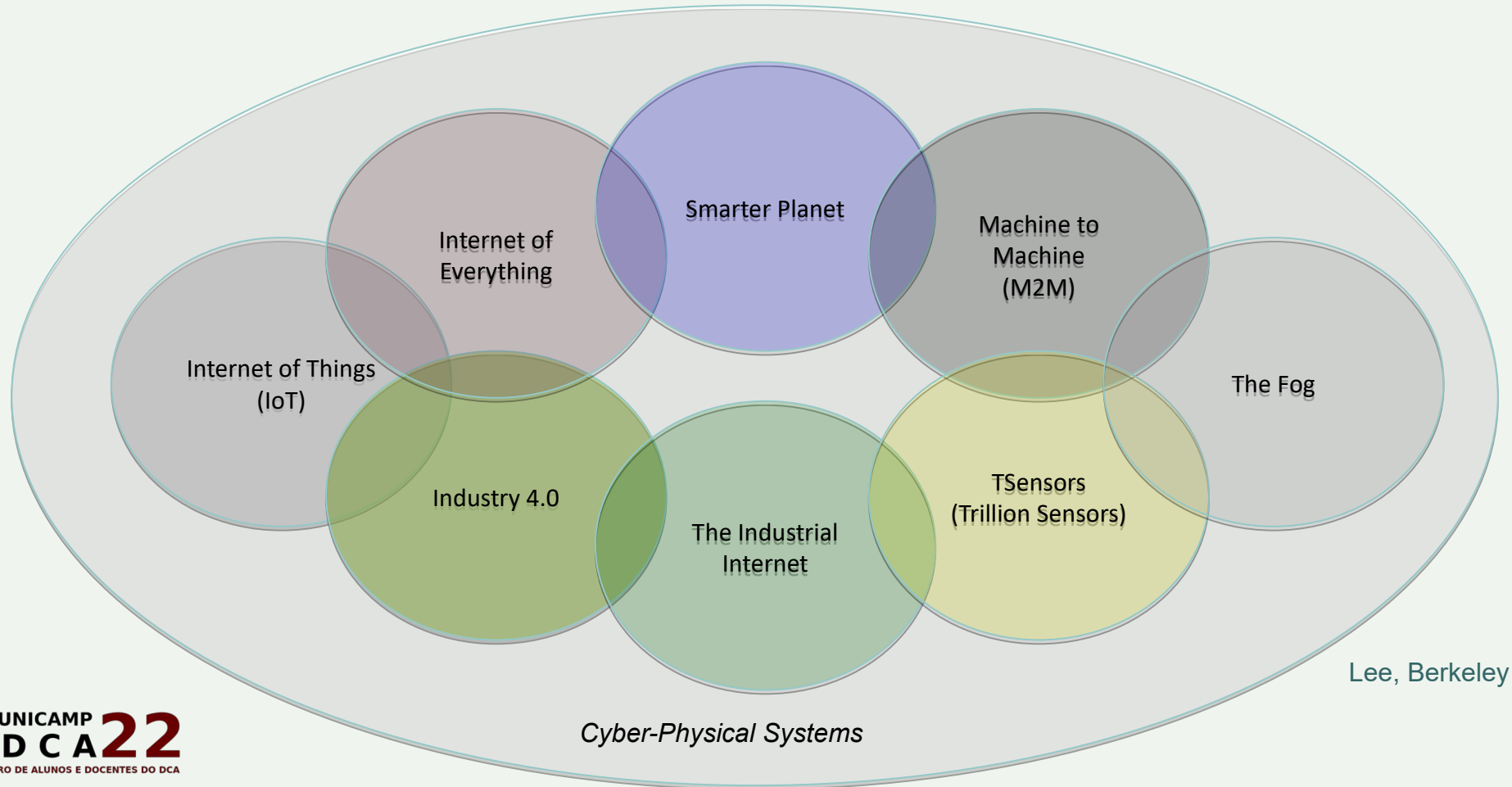
Definição de CPS (Cyber-Physical Systems)

Cyber-Physical Systems (CPS) are integrations of computation and physical processes (Lee,2007).

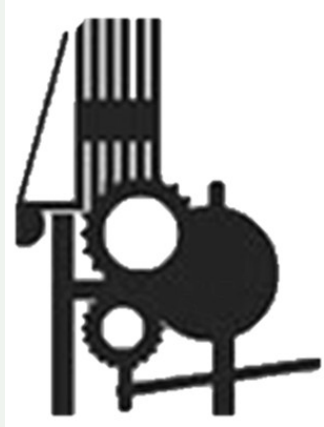
This term extends the term “embedded system (ES),” which has been used for many years. Models of CPS are assumed to include a model of the physical environment (physical entities and their dynamics) and of the ES (the “cyber-part”).

(Marwedel et al. 2020)

E Pluribus Unum: Out of Many, One



Evolução da Revolução Industrial



Primeiro tear mecânico 1784

Indústria 1.0

- Mecanização
- Vapor

Final do século 18



Primeira linha de produção:
Matadouro de Cincinnati 1870

Indústria 2.0

- Eletrificação
- Divisão de tarefas
- Linha de produção
- Produção em massa

Início do século 20



Primeiro PLC:
Modicon084 1969

Indústria 3.0

- Eletrificação
- Automação
- Computadores

Início dos anos 1970



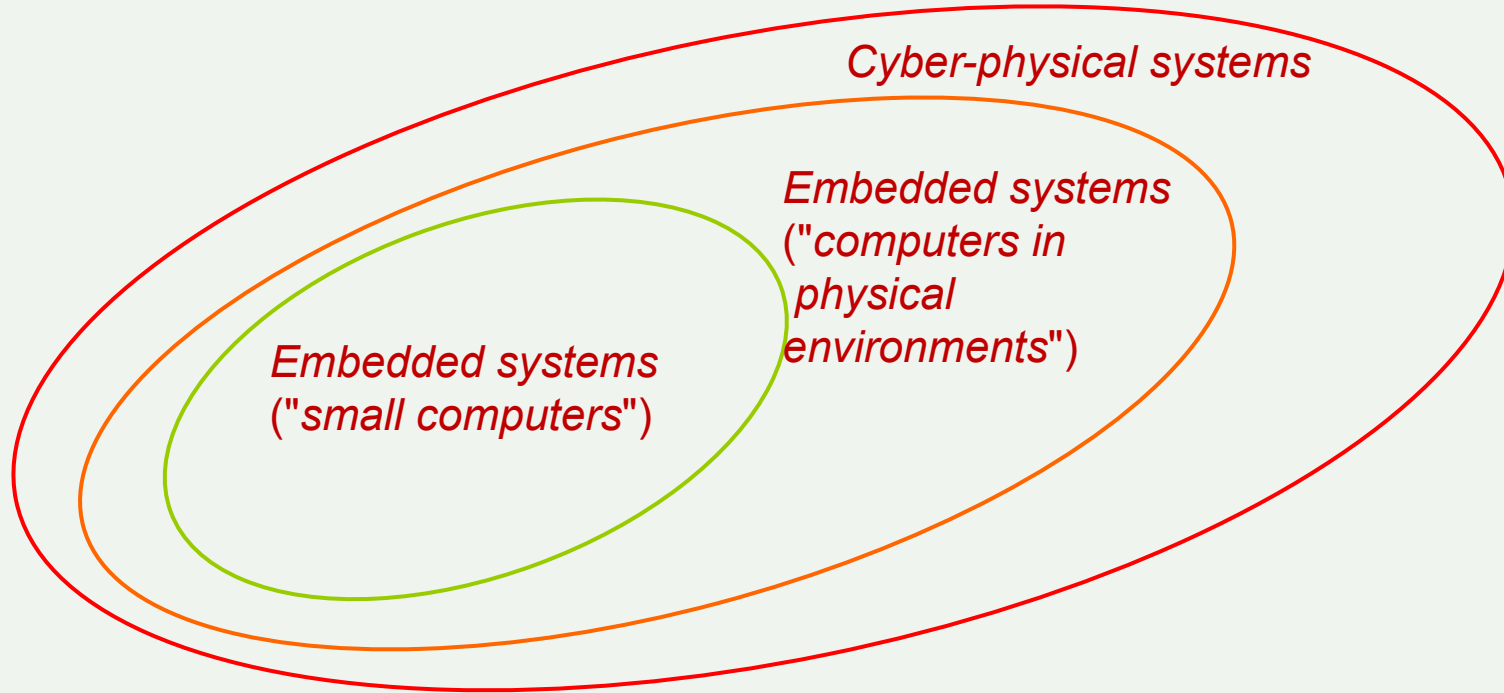
Indústria 4.0

- CPS
- IoT
- M2M
- Nuvem
- Fog
- Tsensors
- Smart*
- Internet-Industrial

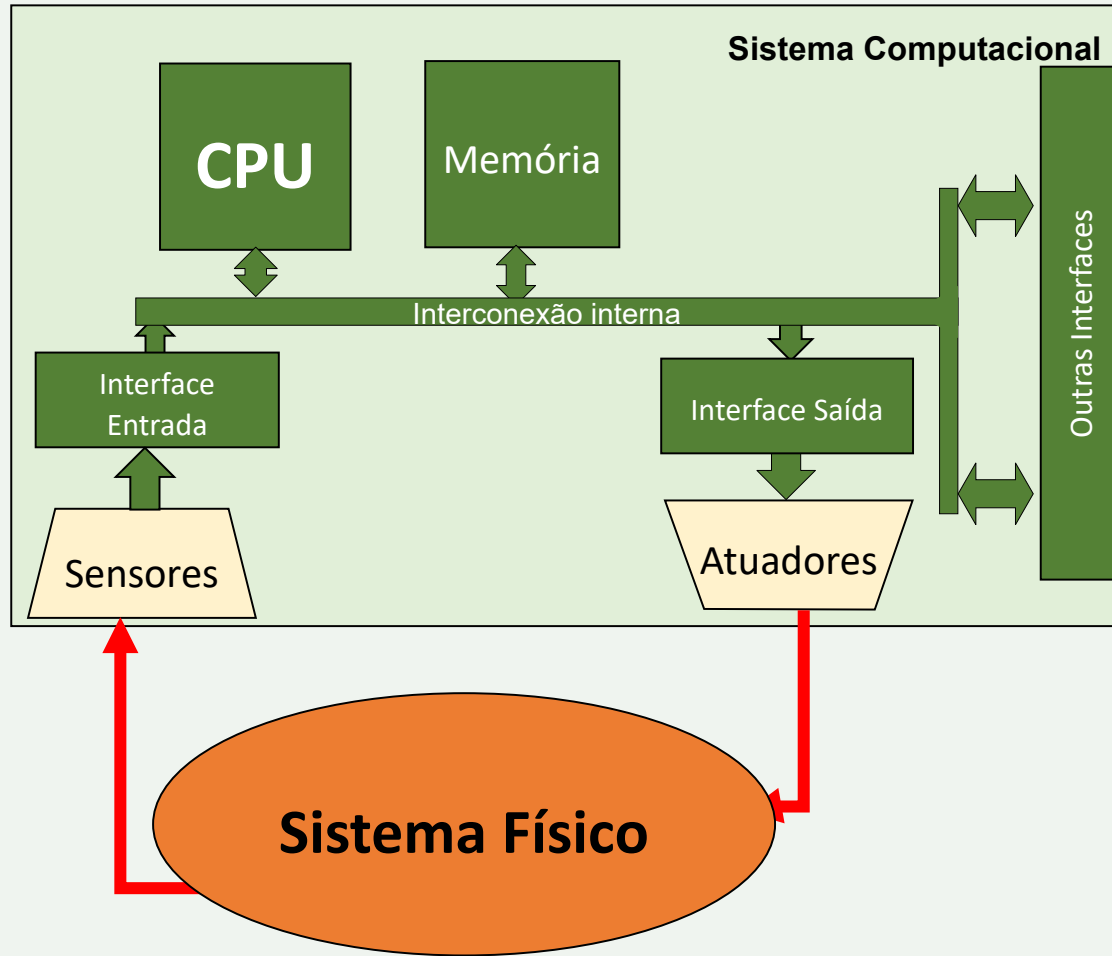
Hoje em dia

Cyber-Physical Systems & Embedded Systems

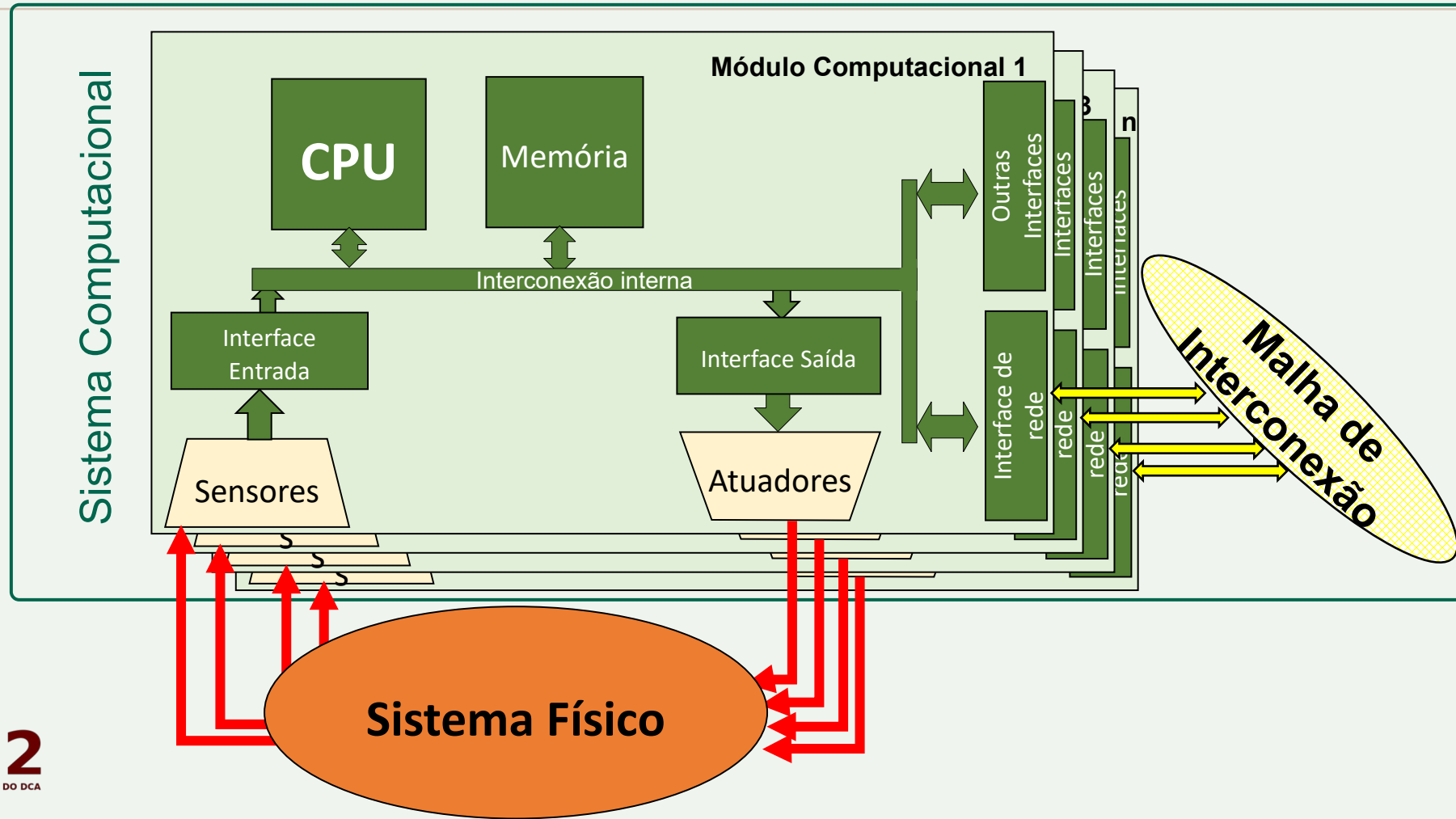
CPS = ES + physical environment



ES – Diagrama

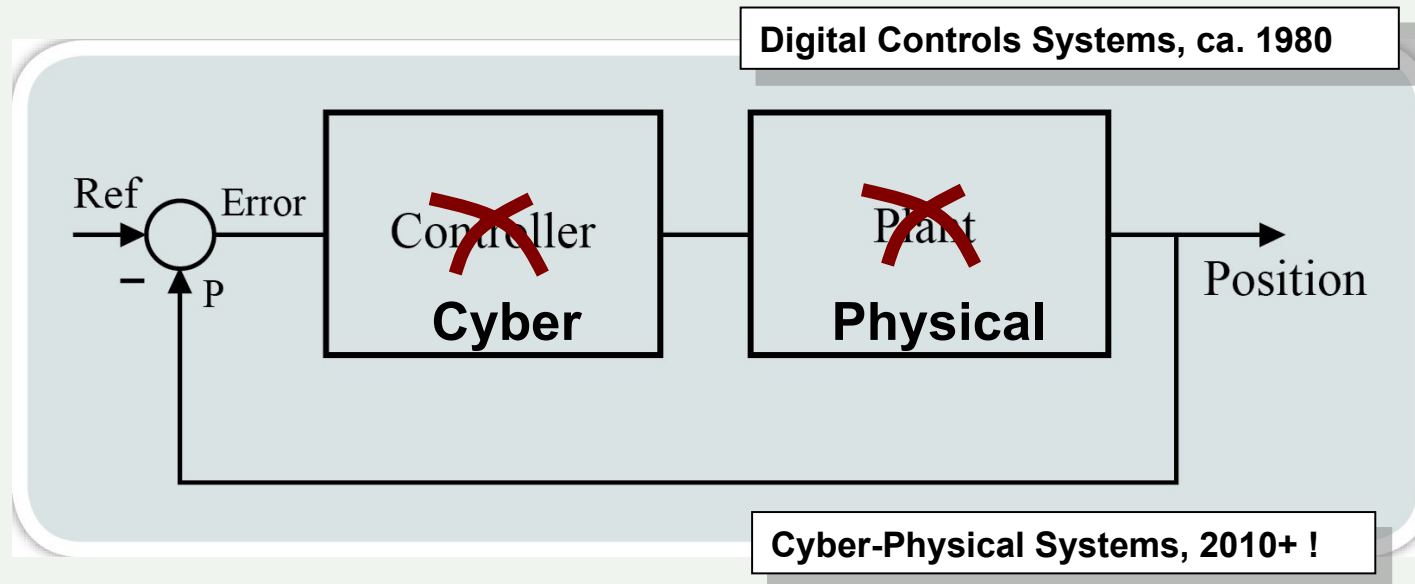


CPS – Diagrama



What is a *Cyber-Physical System*?

Visão extrema



O termo e seus predecessores

- »» 1926 – Nikola Tesla “*Teleautomation*”
- »» 1948 – Norbert Wiener “*Cybernetic*”
- »» 1961 – Charles Stark Draper “*Apollo Guidance Computer*”
- »» 1988 – Mark Weiser “*Ubiquitous Computing*”
- »» 1999 – Kevin Ashton “*Internet of Things*”
- »» 2006 – Helen Gill “*Cyber-Physical Systems*”

Dra. D. Helen Gill

A Dra. D. Helen Gill é a Diretora do programa *Embedded & Hybrid Systems* da *National Science Foundations Directorate for Computer and Information Science and Engineering (CISE)* *Division of Computer and Network Systems (CNS)*.



Cyber-physical systems are physical, biological, and engineered systems whose operations are integrated, monitored, and/or controlled by a computational core. Components are networked at every scale. Computing is deeply embedded into every physical component, possibly even into materials. The computational core is an embedded system, usually demands real-time response, and is most often distributed

Algumas características de *Cyber-Physical Systems*

Reativo

- Opera na velocidade do ambiente

Real-time

- O *timing* dos eventos importam!

Simultâneo

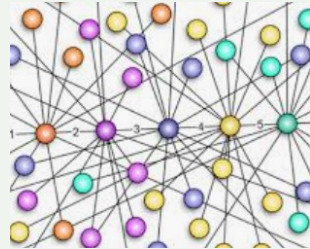
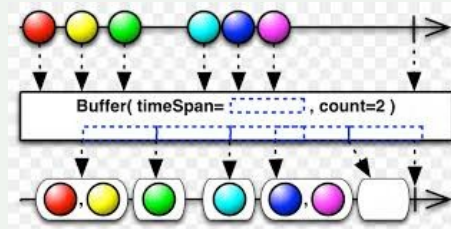
- sistema + ambiente, no mínimo

Heterogêneos

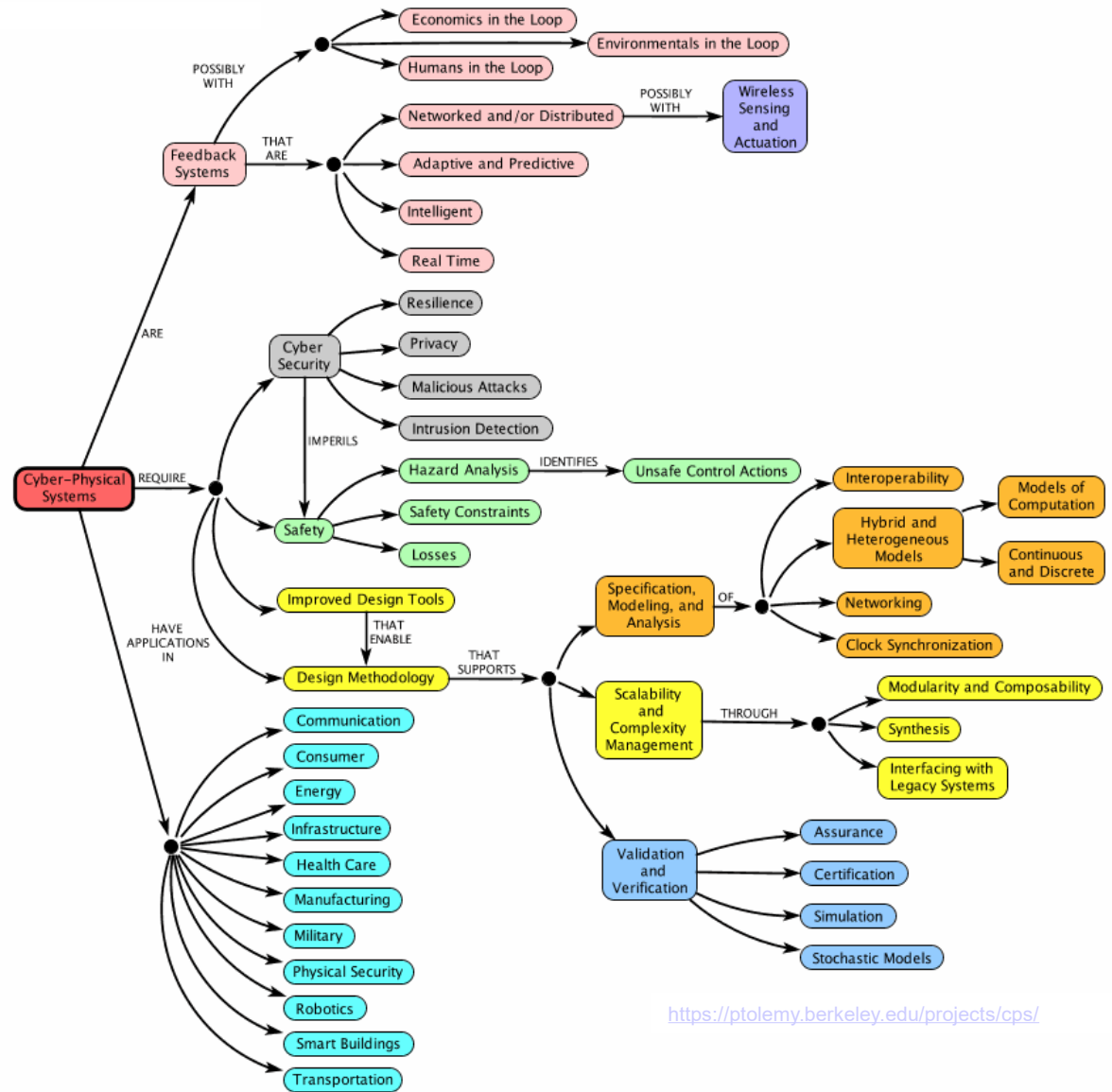
- hardware/software/redes, processos físicos

Em rede (cada vez mais)

- distribuído, exposto a ataques

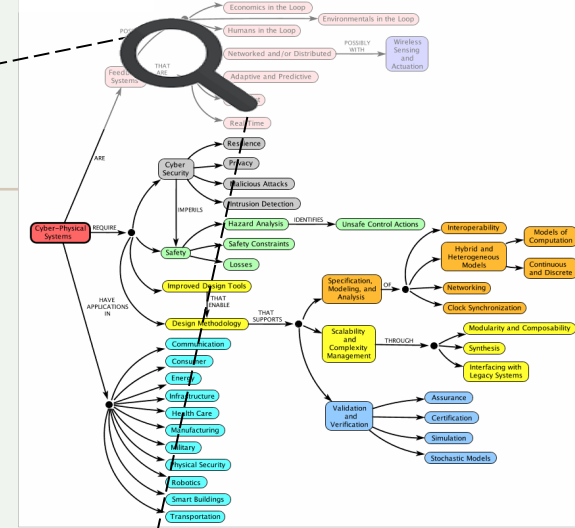
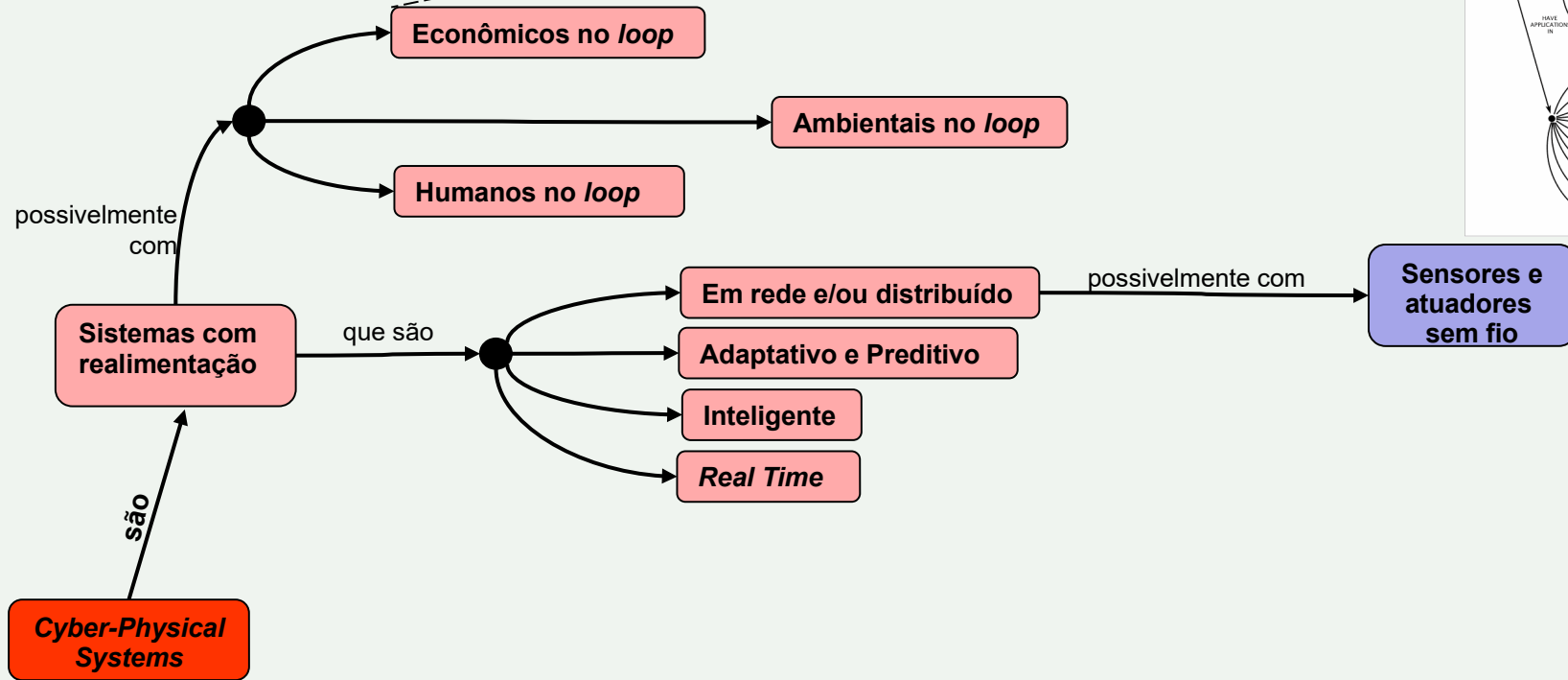


Resumo

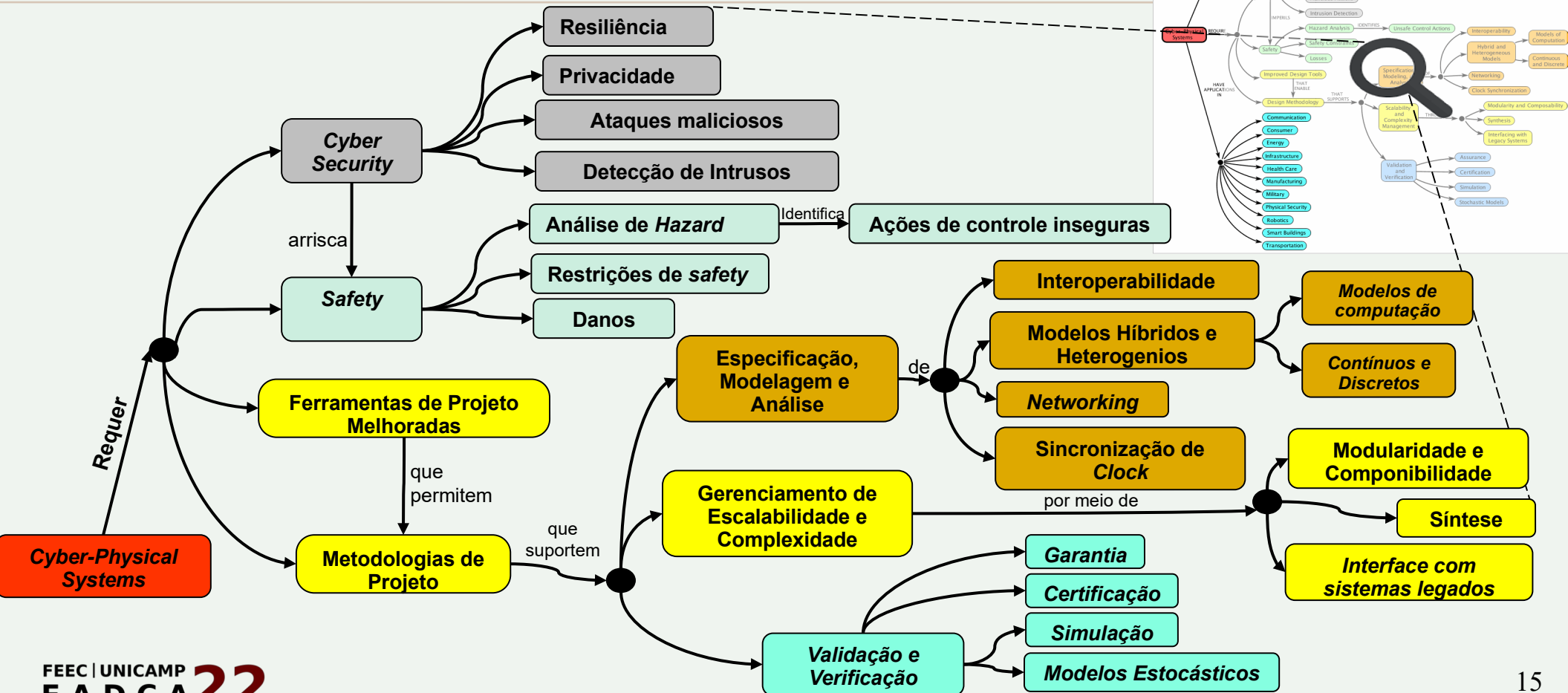


<https://ptolemy.berkeley.edu/projects/cps/>

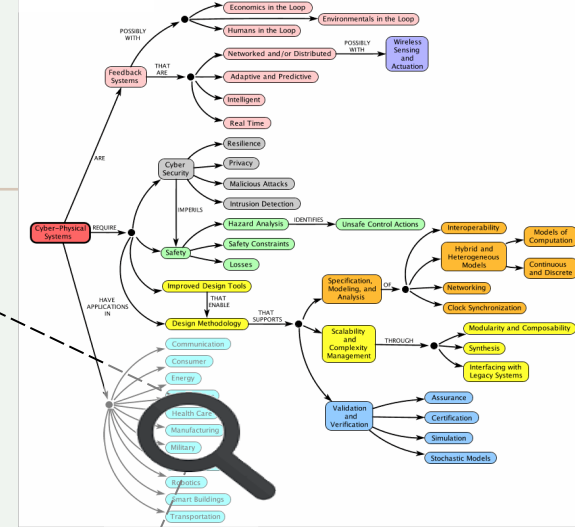
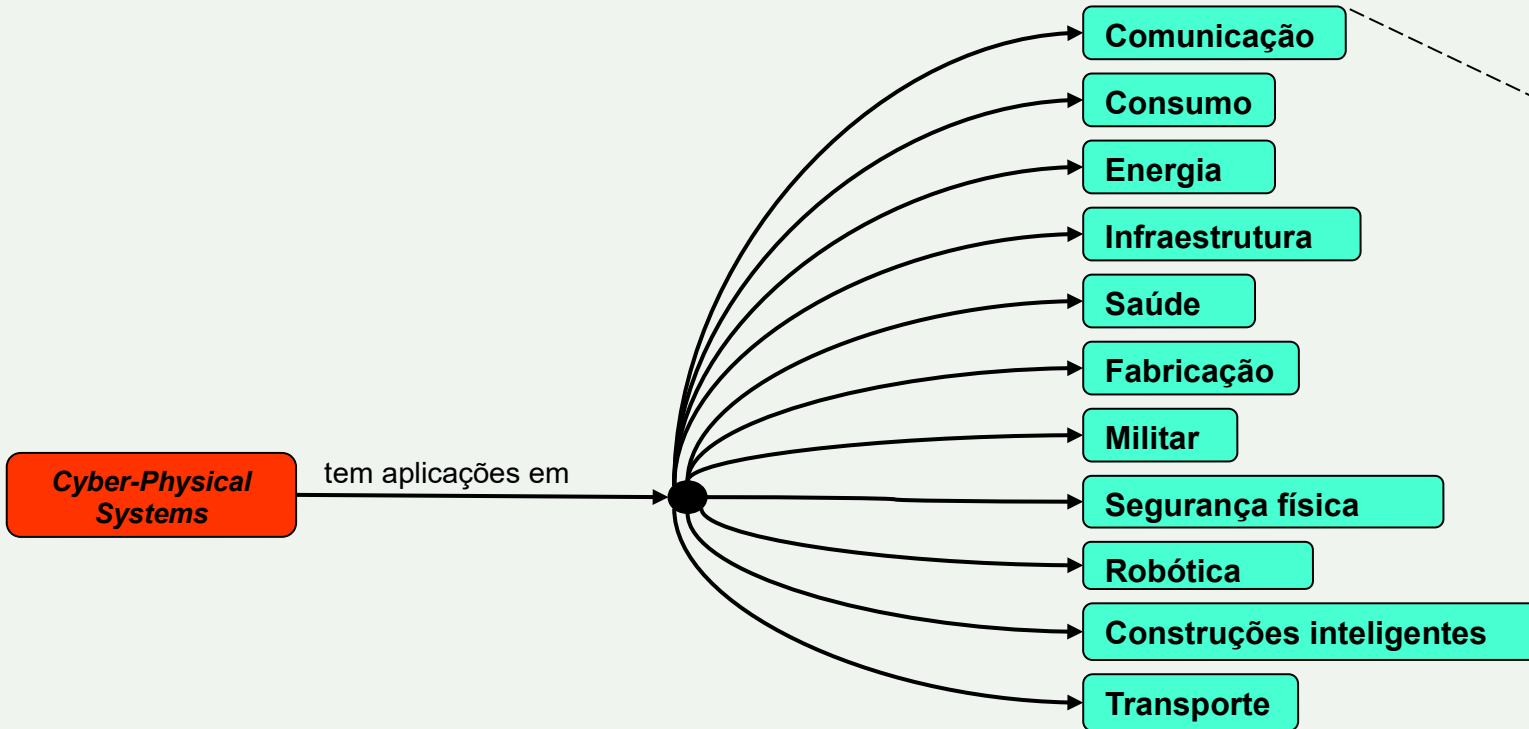
CPS são:



CPS requer:



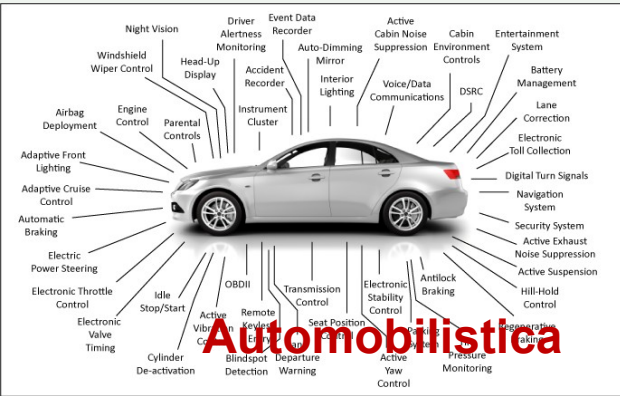
CPS tem aplicações em:



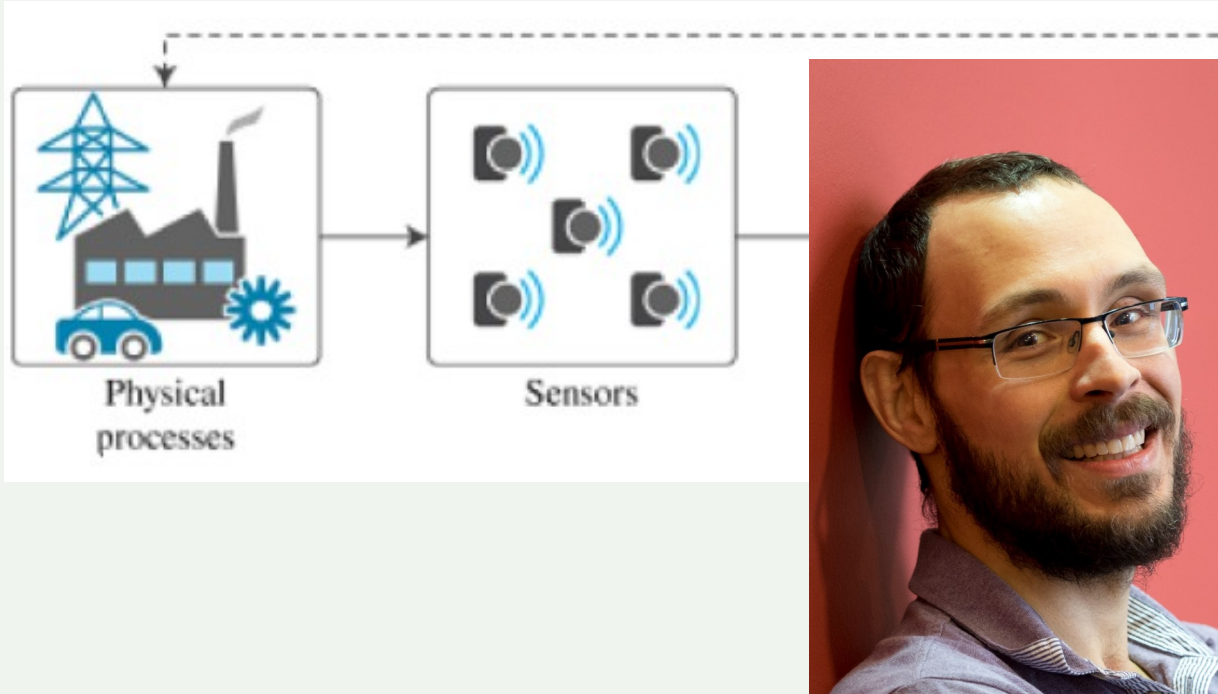
Exemplos de aplicação

- Eletrônica Automotiva
- Avionica
- Transporte e logística
- Saúde
- Entretenimento e residencial
- Agricultura e pecuária de precisão
- Smart Grid

Aplicações



Destaque: *Smart Grid*



Professor Pedro Henrique Juliano Nardelli

*Lappeenranta – Lahti University of Technology LUT · School of Energy Systems
D.Sc. (Tech.)*

Dr. Unicamp – 29 de agosto 2013 (Paulo Cardieri)

CYBER- PHYSICAL SYSTEMS

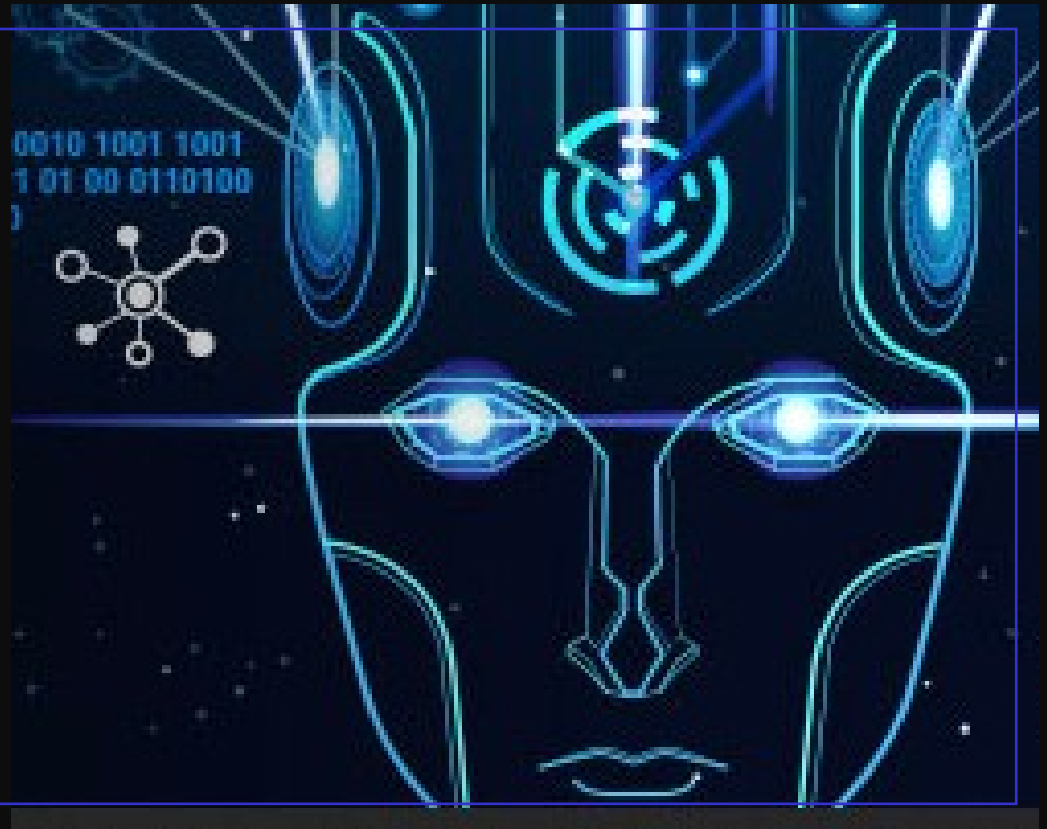
THEORY, METHODOLOGY,
AND APPLICATIONS

PEDRO H. J. NARDELLI

IEEE PRESS

WILEY

O desenvolvimento



O Desenvolvimento de Cyber-Physical Systems Não é mais somente uma questão de TI

- ***Cyber + Physical***
- **Processamento + Dinâmica**
- **Segurança (*Security + Safety*)**

Cyber-Physical Systems

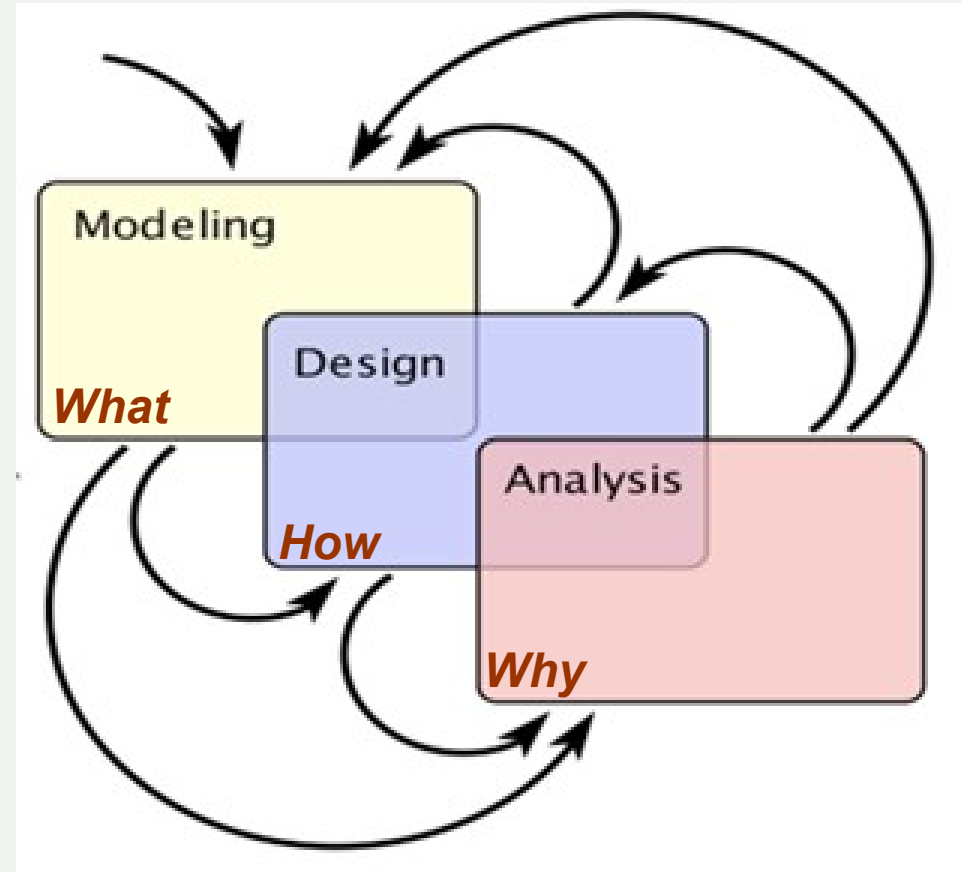
É cheio de requisitos contraditórios

Contradições		
Adaptabilidade	vs.	Repetibilidade
Alta conectividade	vs.	Segurança e Privacidade
Alto desempenho	vs.	Baixa Energia
Assíncrono	vs.	Coordenação/Cooperação
Escalabilidade	vs.	Confiabilidade e Predibilidade
Leis e Regulamentos	vs.	Possibilidades Técnicas
Economia de escala (nuvem)	vs.	Localização (<i>fog</i>)
Sistema Aberto	vs.	Proprietário
Algoritmos	vs.	Dinâmica

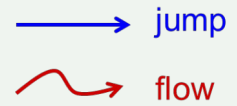
O Processo de Projeto de Sistema Ciber-físico

Segundo E.A. Lee & S.A. Seshia, 2017

- **Modelagem** é a etapa do processo de obter uma compreensão mais profunda de um sistema através da imitação. Os modelos expressam **o que** (*what*) um sistema faz ou deveria fazer. Normalmente esta é a etapa inicial do projeto.
- **Projeto (Design)** é a criação estruturada de artefatos que irão realizar as tarefas do sistema. Especifica **como** (*how*) um sistema faz o que faz.
- **Análise** é o processo de obter uma compreensão mais profunda de um sistema através da dissecação. Ele explicita **por que** (*why*) um sistema faz o que faz (ou não faz o que um modelo diz que deveria fazer).

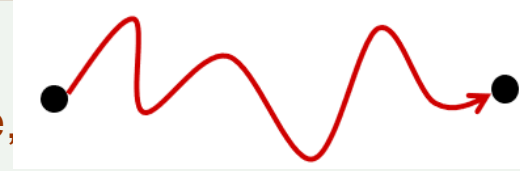


Modelagem



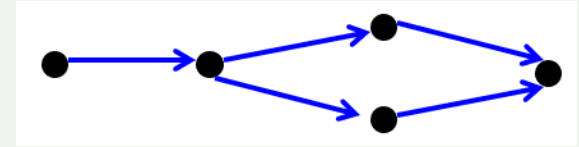
- **Sistema Contínuo**

- Equações diferenciais ordinárias, transformadas de Laplace, modelos de controle de *feedback*, ...



- **Sistema Discreto**

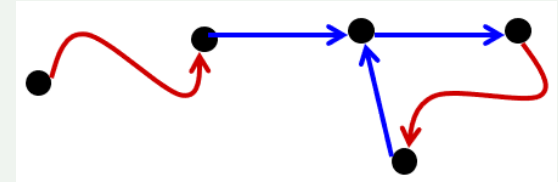
- FSM, filas, cadeias de Markov generalizadas, álgebra max-plus, lógica temporal, redes de Petri



- **Sistema Híbrido**

- **Composição de Máquinas de Estado**

- Construção de máquinas de estado complexas a partir de blocos de construção mais simples. Espacial /Temporal



- **Modelos Simultâneos de Computação**

- Alternativa para *threads*

(E.A. Lee & S.A. Seshia, 2017)

Projeto

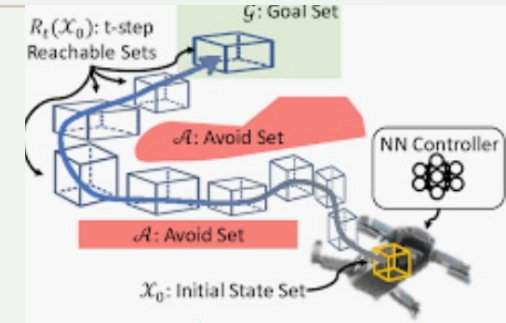
- **Sensores e Atuadores**
- **Entrada e Saída**
- **Arquitetura de Memória**
- **Processadores**
- ***Multitasking / Scheduling***



(E.A. Lee & S.A. Seshia, 2017)

Análise

- Lógica temporal e Invariante
- Equivalência e Refinamento
- Análise de Atingibilidade e Checagem de Modelo
- Análise Quantitativa
- Segurança e Privacidade



(E.A. Lee & S.A. Seshia, 2017)

CPS-VO

Cyber-Physical Systems Virtual Organization



Grupos:

CPS Archives | Education | Energy | IOT and CPS | Medical | Safety | Cyber-Physical Security | Smart and Connected Communities | Secure & Trustworthy Cyberspace | Tools & Design Studios | Transportation

ACM CPSS 2022: The 8th ACM Cyber-Physical System Security Workshop
Nagasaki, Japan, May 30, 2022

Exemplo de ferramentas de projeto

<https://cps-vo.org/group/tools/toollibraries>

Design studios are frameworks with tools and services for simplifying engineering tasks.

This provides a simplified front-end for interested users to gain access, run provided examples and tutorials, and generate practical results without having to download, install, and configure software. Look below for a listing of WebGME-based Design Studios integrated into the CPS-VO.

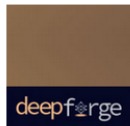
DESIGN STUDIOS LIST



ROSMOD Design Studio

Developer: *Bradley Pottleiger*

The Robot Operating System Model-driven development tool suite (ROSMOD) is an integrated development environment for modeling, generating, deploying, and managing distributed component-based software using ROS. ROSMOD is well suited for the design, development and deployment of large-scale distributed applications on embedded devices.



DeepForge Design Studio

Developer: *Brian Broll*

DeepForge is a development environment for deep learning designed for simplicity, collaboration and reproducibility of experiments. Visual editing allows quick and easy design of neural network architectures and machine learning pipelines. Automatic version control assures every experiment can be easily reproduced. All executions can be designed/developed from within the browser and monitored using real-time feedback.



Hierarchical Finite State Machine Design Studio (HFSM)

Developer: *William Emfinger*

The Finite State Machine (FSM) is a design pattern in which actions are determined by events and the current context of the system. The driver code dispatches events to the FSM that forwards it to the current state. Functions processing the events decide what should be the next system state. After that, the process repeats. The Hierarchical FSM is an extension of the FSM concept.



Modelica Design Studio

Developer: *Patrik Meijer*

Modelica® is a non-proprietary, object-oriented, equation based language to conveniently model and simulate complex physical systems containing, e.g., mechanical, electrical, electronic, hydraulic, thermal, control, electric power or process-oriented subcomponents.



FSolidM Design Studio For Ethereum Smart Contracts

Developer: *Anastasia Mavridou*

FSolidM is a framework rooted in rigorous semantics for designing contracts as Finite State Machines (FSM) on an easy-to-use graphical interface and for automatically generating Ethereum contracts. Integrated in FSolidM is a set of design patterns, implemented as plugins that developers can easily add to their contracts to enhance



FSolidM Design Studio For Ethereum Smart Contracts

Developer: *Anastasia Mavridou*

FSolidM is a framework rooted in rigorous semantics for designing contracts as Finite State Machines (FSM) on an easy-to-use graphical interface and for automatically generating Ethereum contracts. Integrated in FSolidM is a set of design patterns, implemented as plugins that developers can easily add to their contracts to enhance security and functionality.



BIP Design Studio

Developer: *Anastasia Mavridou*

The Behavior Interaction Priority (BIP) framework, rooted in rigorous semantics, allows modeling heterogeneous component-based systems. This group presents the various features provided by the BIP Design Studio including the modeling language, design guidance services, code generators and integration with the BIP tool-set.



GRIDLAB-D

Developer: *Himanshu Neema*

GridLAB-D™ is a new power distribution system simulation and analysis tool that provides valuable information to users who design and operate distribution systems, and to utilities that wish to take advantage of the latest energy technologies. It incorporates the most advanced modeling techniques, with high-performance algorithms to deliver the best in end-use modeling.



ALC Toolchain

Developer: *Gabor Karsai*

The ALC Design Studio enables an engineer to design Cyber-Physical Systems (CPS's) with integrated learning-enabled components (LECs), e.g. deep neural networks, that are executed in a ROS environment. The studio allows for the design, training, deployment and testing of the LECs in the context of the CPS, including a simulation of its physical environment. The ALC tools support the training and deployment of assurance monitors for each LEC in the CPS. Additionally, they facilitate the formal verification of the CPS with the deployed LECs against requirements expressing desired correctness and robustness properties.



HyST Design Studio

Developer: *Taylor Johnson*

HyStudio is a development environment to aid verification tool developers by providing a seamless integration experience with benchmark models so that at one point they can compare their work with other teams. Its editor is based on SpaceX modeling language and it employs HyST for translating output data into a suitable format to present to an analyzer.

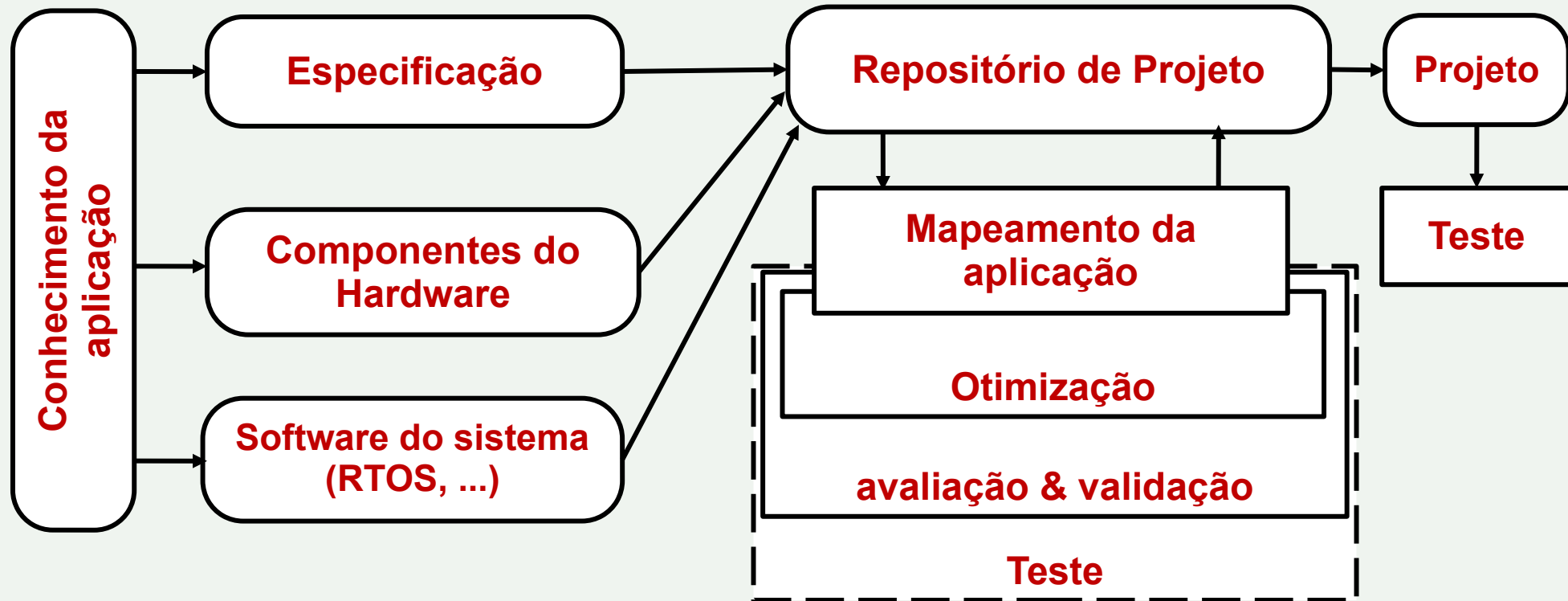


SEAM Design Studio

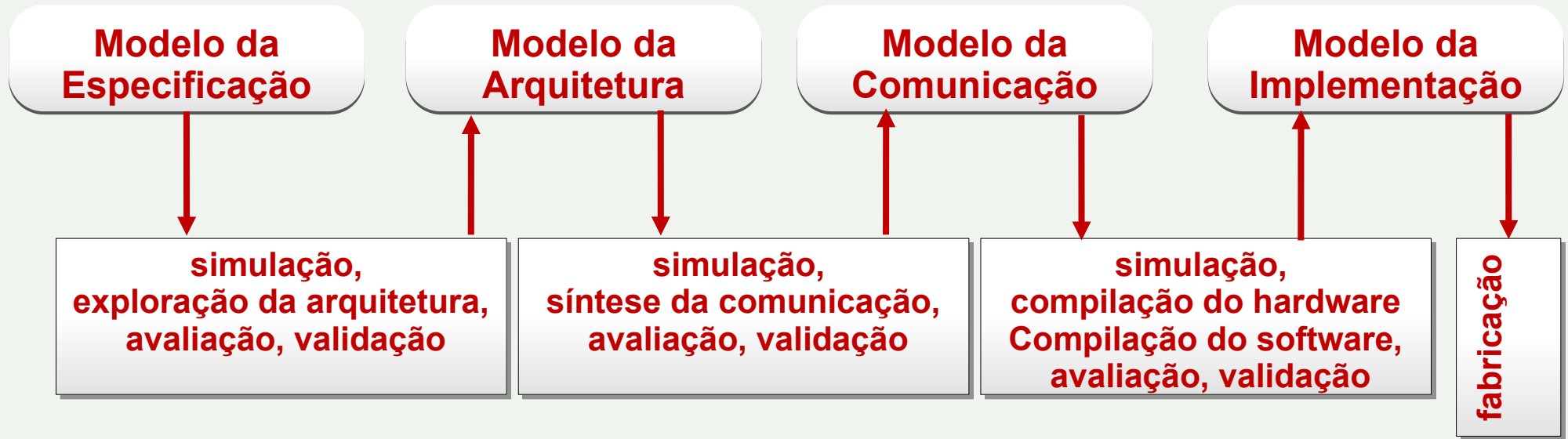
Developer: *Gabor Karsai*

Systems Engineering and Assurance Modeling (SEAM) is a tool for the modeling of assurance cases that are integrated with the models of the system, such as requirement models, functional decomposition models, and architecture models extended with fault propagations.

Fluxo Simplificado da Informação de Projeto

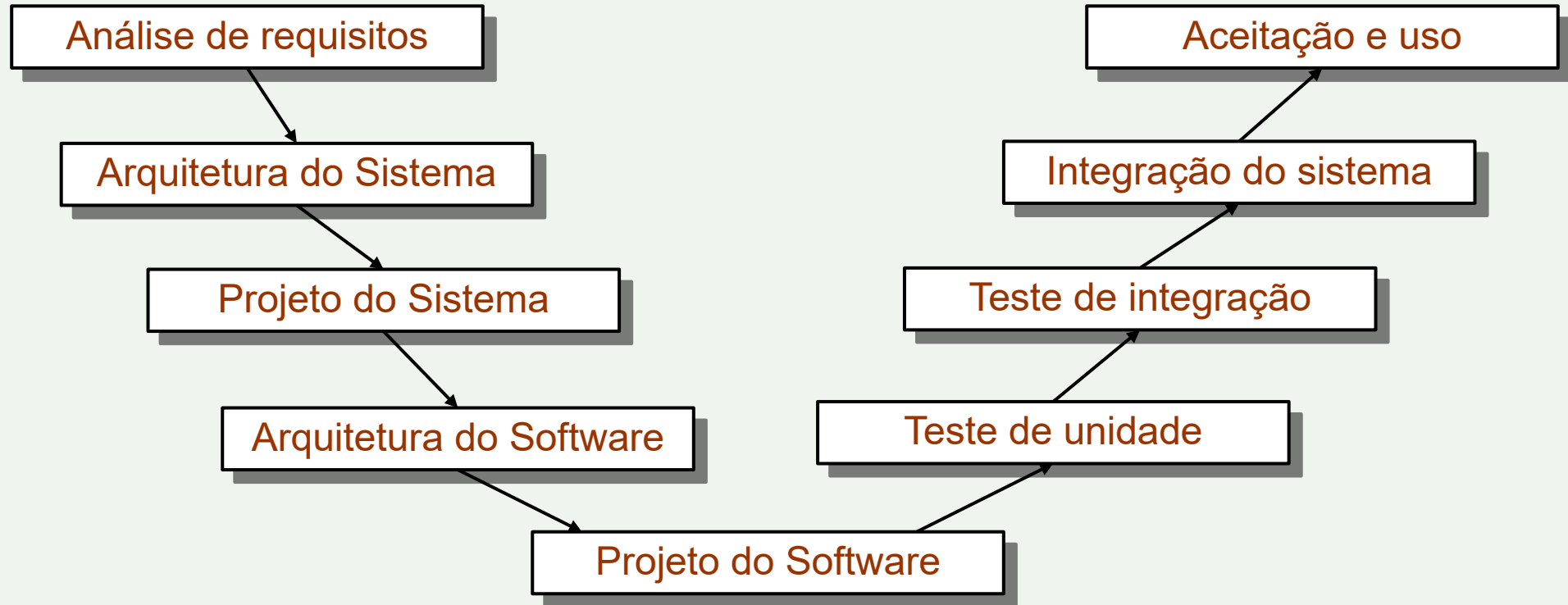


Fluxo de Projeto da Ferramenta SpecC (*simplificado*)

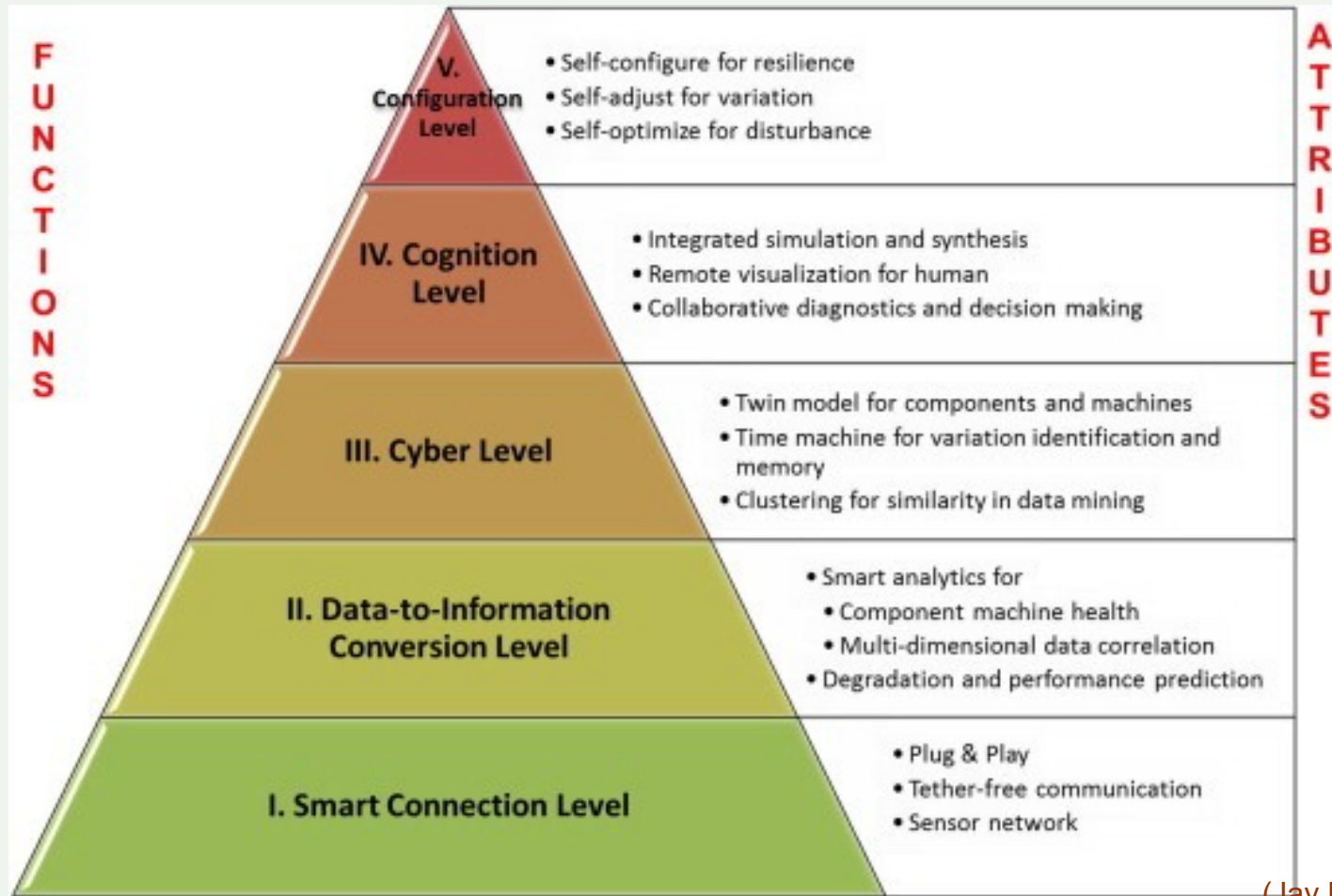


Gajski, D., Zhu, J., Dömer, R., Gerstlauer, A., Zhao, S.: SpecC: Specification Language Methodology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (2000)

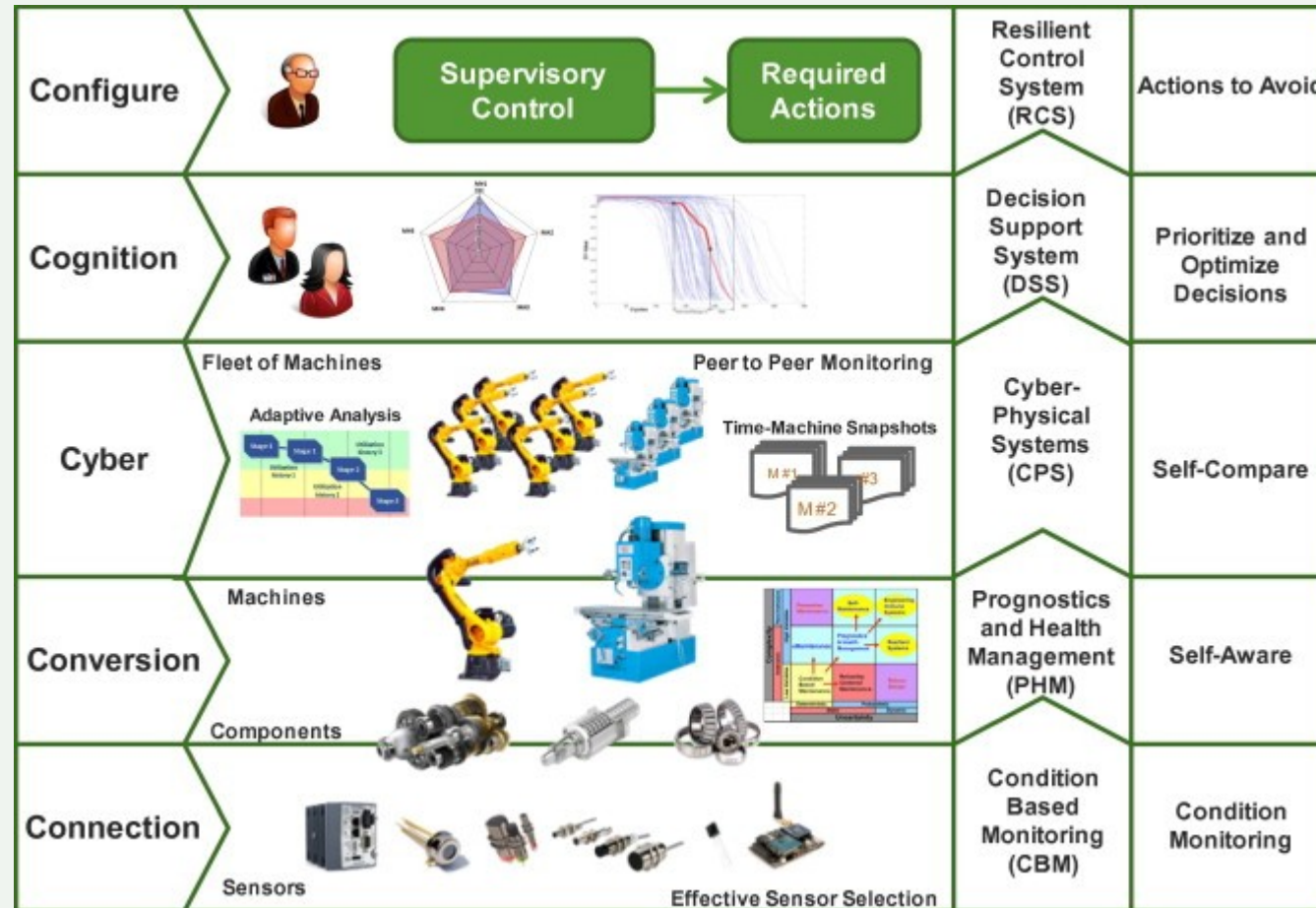
Fluxo de Projeto do Modelo V (V-model)



Arquitetura 5C para implementação de Cyber-Physical System.



Aplicações e técnicas associadas a cada nível da arquitetura 5C.



O Ensino de CPS

Como podemos educar os alunos de tal forma que eles sejam capazes de projetar sistemas CPS?

A formação de RH em CPS

Para completar as habilidades de desenvolvimento de um sistema ciber-físico completo, o estudante de Engenharia precisa ter formação em diversas áreas, não só em *hardware* e *software* de computadores.

- *Workshops* específico sobre ensino em CPS:
 - NSF, NASEM
- Artigos em :
 - IEEE, ACM, NSF

- A série de oficinas “*Workshop on Embedded e Cyber-Physical Systems Education (WESE)*” foi iniciada em 2005 e acontece todos os anos desde então.
- Inicialmente, a sigla referia-se apenas a “*Embedded Systems*”. Em 2012, a sigla “*Cyber-Physical*” foi adicionado ao nome do workshop, mas a sigla não foi alterada.

WESE 2020 is cancelled due to the ongoing pandemic. Workshop info. The WESE workshop series aims to bring researchers, educators...
The WESE workshop series is part of the SIGBED, CPSE-Labs and the ARTEMIS-IA.

Cursos sobre disponíveis

<https://cps-vo.org/group/edu>

Courses and Syllabi



Unmanned & Autonomous Systems Engineering

Embry Riddle | Graduate course



Cyber-Physical System Design (EECS 227)

UC Irvine | Undergraduate course



Cyber-Physical System Fundamentals

TU Dortmund



CPSS: Languages and Systems (CS556)

IIT | Graduate course



Design and Analysis of CPSS (COMP 451)

Rice University | Graduate course **



Introduction to Cyber-Physical Systems (CMPE142)

UC Santa Cruz | Undergraduate course



Logical Foundations of Cyber-Physical Systems (15-424)

Carnegie Mellon University | Undergraduate and Graduate course | [Videos](#)



Master of Engineering Degree Program in Cyber-Physical Systems

Vanderbilt University | Graduate Degree Program



Cyber-Physical Systems Design and Application (COMP_ENG 364, 464)

Northwestern University | Undergraduate/Graduate course



Internet-of-Things Sensors, Systems, and Applications (COMP_ENG 365, 465)

Northwestern University | Undergraduate/Graduate course



Embedded Systems (COMP_ENG 366, 466)

Northwestern University | Undergraduate/Graduate course



Social Sensing and Cyber-Physical Systems (CSE40437/60437)

Notre Dame University | Undergraduate/Graduate course

A natureza distribuída, conectada e em rede de CPS

Nas grades curriculares descritas na literatura atual existem duas interpretações levemente diferentes de CPS:

1. Uma **interpretação física**, quando a ênfase é colocada na ligação com o comportamento dinâmico das entidades físicas.
 - parece ser mais comum nos EUA
2. Uma **interpretação orientada para a comunicação**, que dá ênfase a conectividade (*network*), aproximando muito do termo “*Internet of Things (IoT)*”.
 - parece ser mais comum na Europa

Resultados Educacionais propostos pelo CPS-Ed 2013

A. Capacidade de aplicar modelos matemáticos de sistemas físicos, sistemas cibernéticos e sua composição.

componentes cibernéticos e físicos sujeitos a restrições, **incluindo segurança, custo e**

H. Uma compreensão de como as decisões de projeto no domínio cibernético podem afetar o domínio físico e vice-versa

F. Uma **compreensão das responsabilidades profissionais e éticas** do projeto de sistemas críticos de

I. Um reconhecimento da necessidade e capacidade de se engajar na aprendizagem ao longo da vida.

Resultados Educacionais propostos pelo CPS-Ed 2013

First Workshop on Cyber-Physical Systems Education

- A. Capacidade de **aplicar modelos matemáticos de sistemas** físicos, sistemas cibernéticos e sua composição.
- B. Capacidade de projetar e conduzir **simulações e testes** de um sistema ciber-físico e **analisar os resultados**.
- C. A capacidade de aplicar **boas práticas de engenharia** no projeto de um sistema que combina componentes cibernéticos e físicos sujeitos a restrições, **incluindo segurança, custo e confiabilidade**.
- D. Uma capacidade de **funcionar efetivamente em equipes multidisciplinares** abrangendo domínios cibernéticos e físicos.
- E. A capacidade de **identificar, formular e resolver problemas** de engenharia que têm aspectos físicos e cibernéticos.
- F. Uma **compreensão das responsabilidades profissionais e éticas** do projeto de sistemas críticos de vida e segurança.
- G. A capacidade de se **comunicar de forma eficaz** em domínios cibernéticos e físicos.
- H. Uma compreensão de como as **decisões de projeto** no domínio cibernético **podem afetar o domínio físico e vice-versa**.
- I. Um reconhecimento da necessidade e capacidade de se **engajar na aprendizagem ao longo da vida**.
- J. Um conhecimento de **questões contemporâneas com sistemas ciber-físicos**.

Tópicos sugeridos para o Ensino de CPS

(Marwedel et al. 2020) baseado em (NASEM, 2016)

- Data structures and algorithms
- Models of computation, including automata and discrete event systems
- Programming (incl. with sensors and actuators)
- Software engineering incl. requirement development, system evolution, and life-cycle certification
- Operating systems
- Networks (Internet of Things, cloud computing, wireless communication, ad-hoc networking)
- Model-based design (incl. tools)
- Verification and validation; testing
- Data analysis (machine learning, sensor fusion, analysis of signals)

- Graph theory and combinatorics
- Probability, statistics, and stochastic processes
- Logic
- Linear algebra
- Calculus and differential equations

- Control loops (hybrid control, networked control)
- Embedded hardware (including computational and power limits) & the cyphy interface (properties of sensors, sampling, A/D-conversion)
- Real-time systems
- Resource management, constraints such as time, memory size, power, quality metrics
- Properties of communication systems, including limitations of wireless communications
- Dependability (safety, security, privacy, fault tolerance, error detection, hazards, resilience, safety cases)

- Properties of the physical world, including uncertainty and risk

- Human factors related to human-in-loop and behavioral aspects
- Soft skills (communication, group work, project management, ethics, sustainability)

Case de currículos para CPS

(Marwedel et al. 2020)

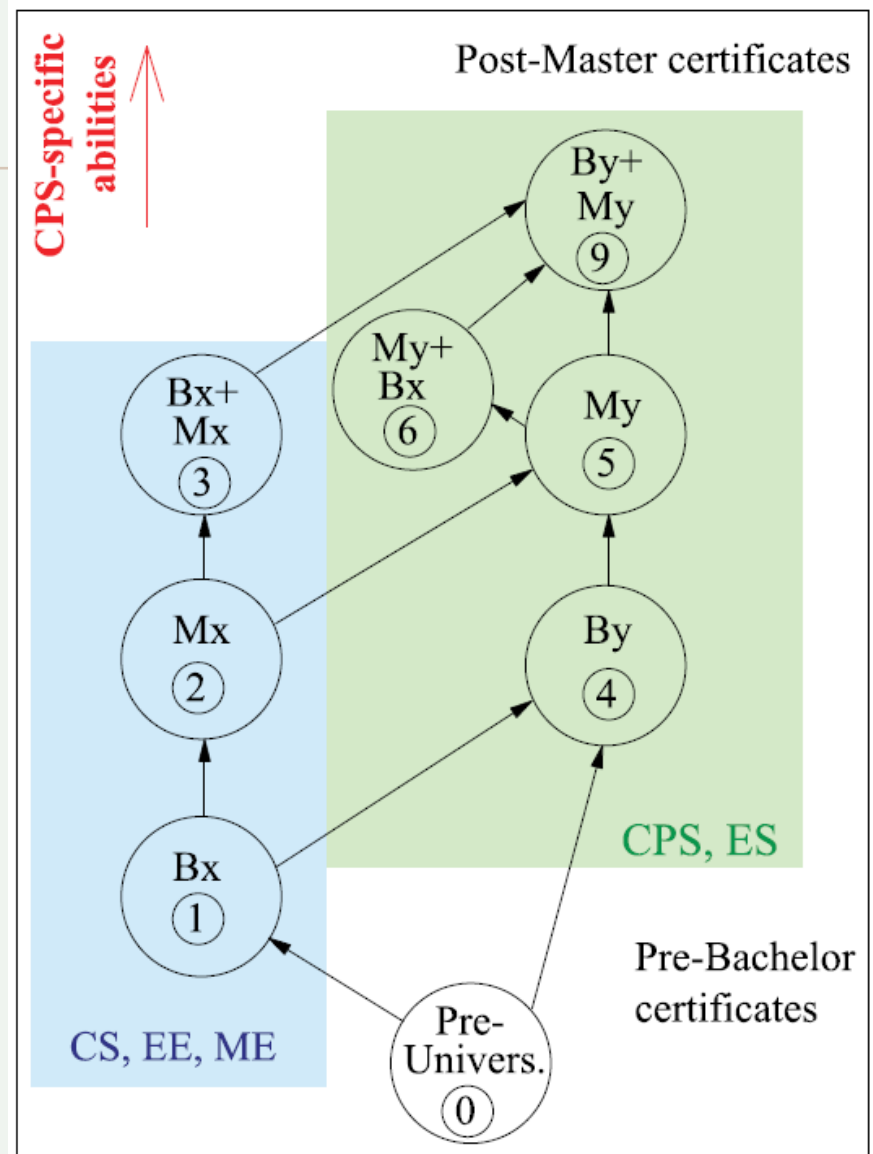
B = *Bachelor* = graduação;

M = *Master* = mestrado;

x = regular CS ou EE ou ME;

y = específico de CPS.

case	Descrição
①	Curso regular de graduação B _x
②	Curso regular de mestrado M _x
③	Sequência de cursos regulares de graduação e mestrado B _x + M _x
④	Curso específico CPS de graduação B _y
⑤	Curso específico CPS de mestrado M _y
⑥	Sequência de curso regular de graduação e específico de mestrado B _x +M _y
⑨	Sequência de cursos específicos de graduação e de mestrado B _y + M _y



analisa e classifica nos *cases* propostos diversas grades curriculares de escolas na Europa, América e Ásia com ensino de CPS.

Destaques desta análise

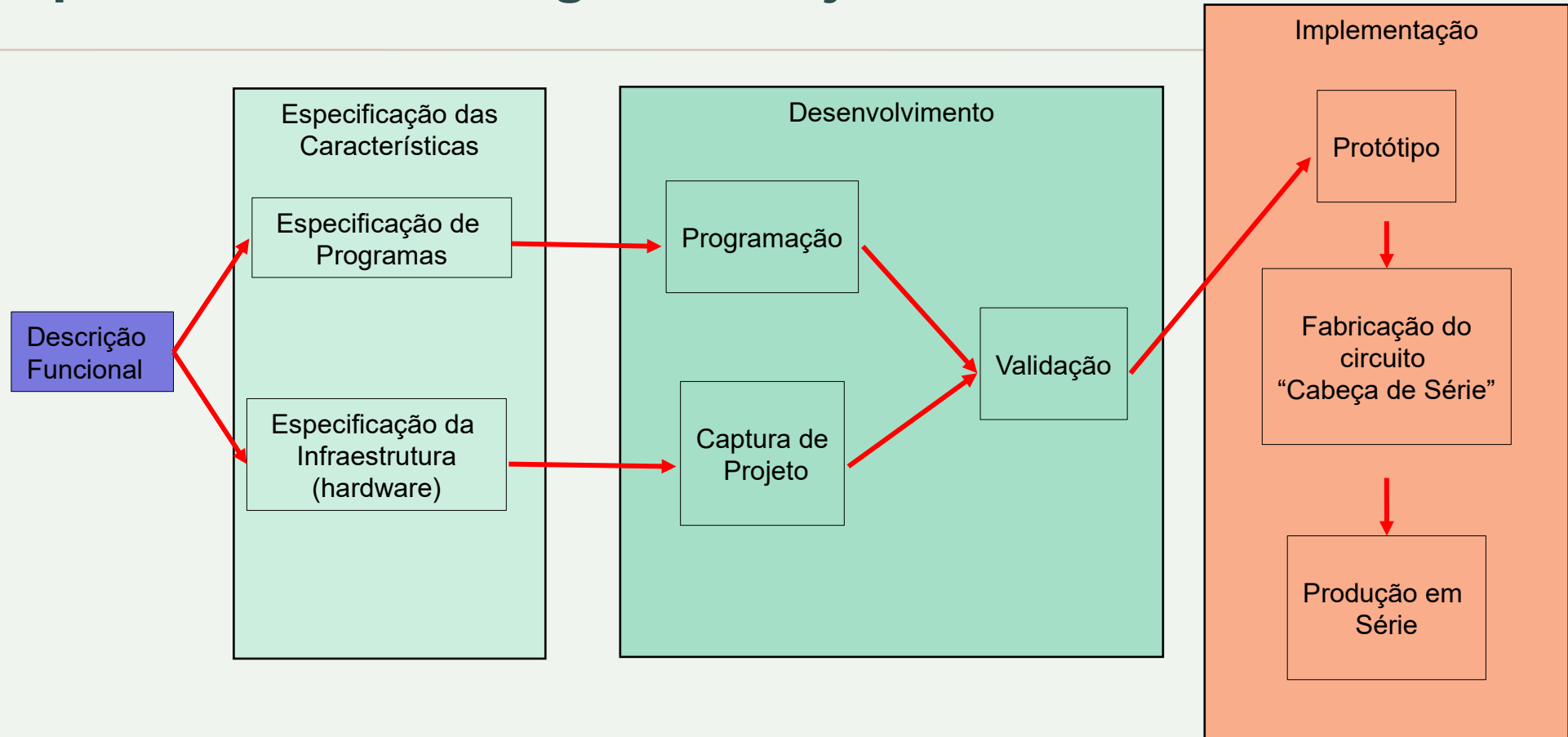
- ***Flipped classroom;***
- **Ensino baseado em projetos** (nas disciplinas e ao final);
- **Forte interação com indústria.**

CPS na FEEC

CPS na FEEC

- Desde 2018 1ºsem.:
 - **EA075** – Introdução a Projeto de Sistemas Embarcados
- Baseado em:
 - E. A. Lee & S. A. Seshia, *Introduction to Embedded Systems: A Cyber–Physical Systems Approach*, 2nd ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press 2017.
Disponível: <http://LeeSeshia.org>
 - Anotações de aula de Edward A. Lee & Prabal Dutta (UC Berkeley)
EECS 149/249A : Introduction to Embedded Systems - Fall 2017
Disponível: <http://LeeSeshia.org>
- Na pós-graduação da FEEC
 - **IA862 – Inteligência Artificial em Automação** (Prof. Fernando A. Gomide)

Proposta de Metodologia de Projeto

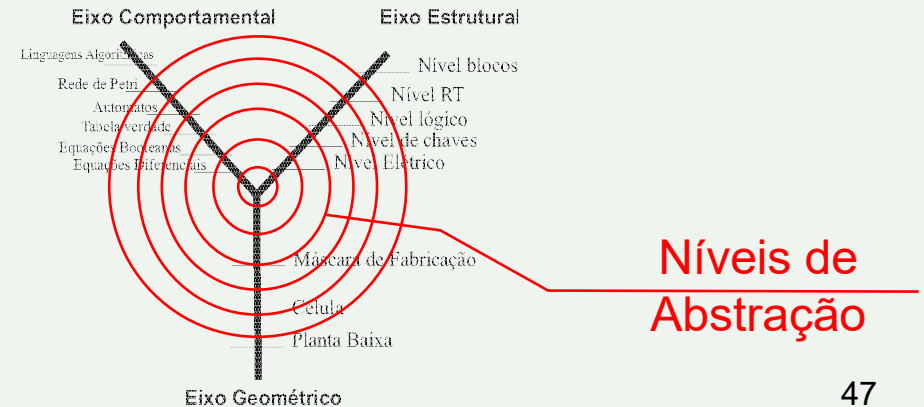
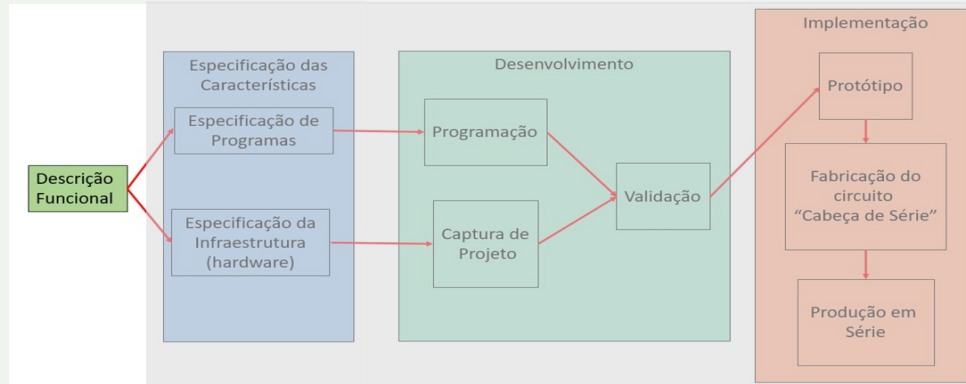


Descrição Funcional

Descrição do Comportamento

Descrição Estrutural do Sistema

Descrição da Geometria do Sistema



Descrição Funcional – do Comportamento

Com base na análise das funcionalidades e das características desejadas para o sistema em projeto, deve-se descrever:

Funcionalidades

Configurabilidade

eventos:

tratamento de eventos

Descrição Funcional – da Estrutura do Sistema

em nível de bloco ou sistema,

blocos funcionais: que compõem o sistema, incluindo uma síntese das funcionalidades de cada bloco

relacionamentos entre estes blocos: ou seja, incluir os principais sinais de comunicação.

caixas retangulares para representar os blocos funcionais

setas entre as caixas para indicar o(s) sentido(s) dos fluxos dos sinais disparados pelos eventos.

Descrição Funcional – da geometria do sistema



TAMANHO



FORMA



PESO

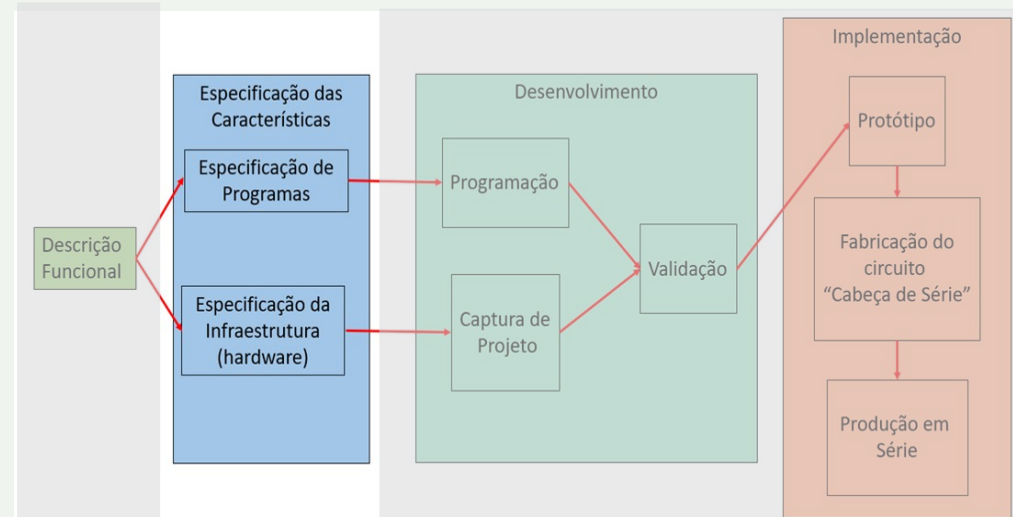
Especificação de Características

Especificação da infra-estrutura (hardware)

Especificação do programa (software/firmware)

A design without specifications cannot be right or wrong, it can only be surprising.

Young et al. (1985) em Lee & Seshia (2017)



jro 2022

Especificação da infra-estrutura (hardware)

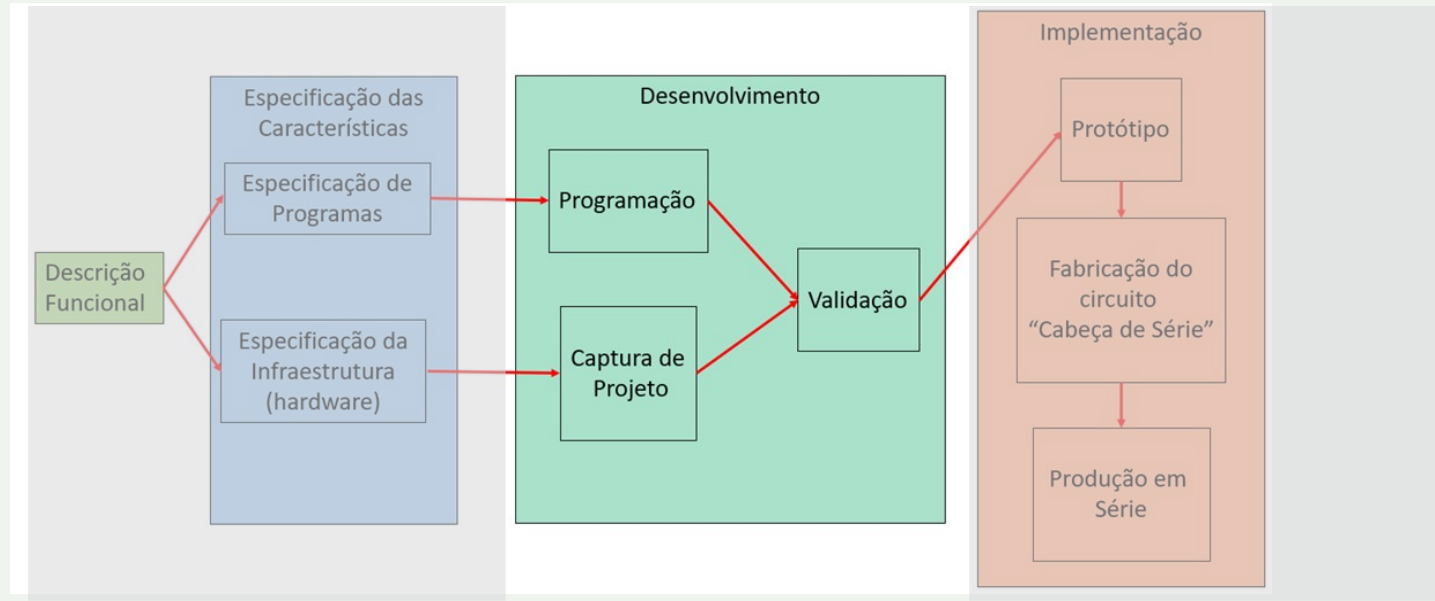
- Descreve textualmente o *hardware* a ser projetado
- Define:
 - os **módulos** (por exemplo, em FSMD)
 - as **interconexões** entre módulos
 - **níveis de sinais elétricos** de cada módulo
 - **diagrama de tempo** da comunicação entre módulos
 - **Pinagem** de conexões internas e externas
 - Especificação **de teste**
 - Pontos de acesso, programas, medidores, etc.

Especificação do programa (*software/firmware*)

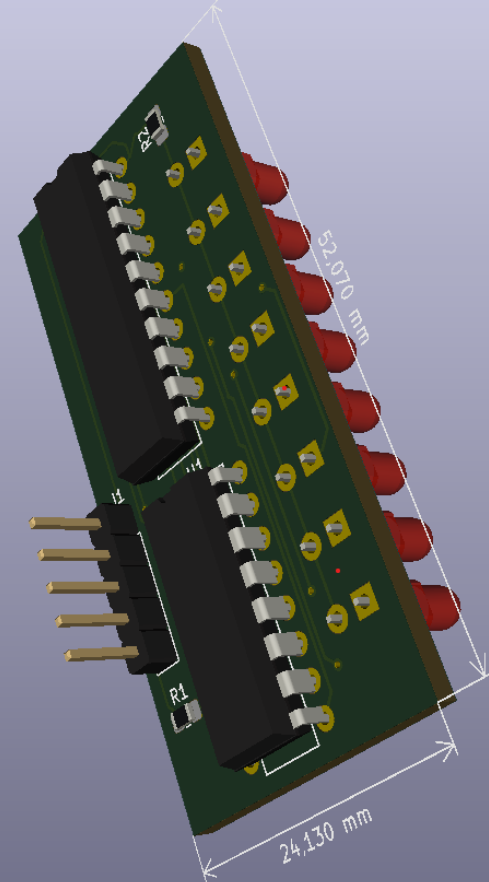
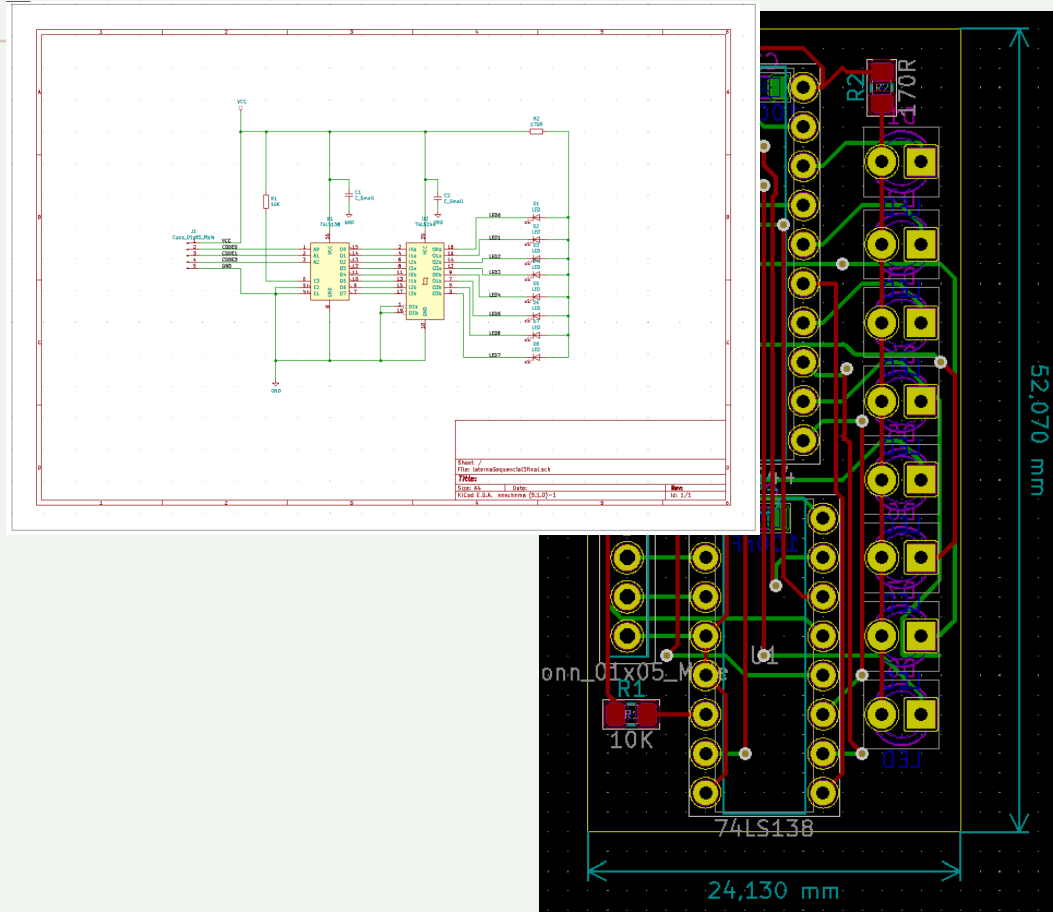
- Eventos
 - algoritmo de tratamento de eventos
- Descrito em:
 - *Flowcharts*, ou fluxograma;
 - *Statecharts*, ou diagrama de estados;
 - *Sequence Diagram*, ou diagrama de sequência, UML;
 - *FSMD*, ou máquina de estados finitos com dataflow.
- *Como testar*

Desenvolvimento

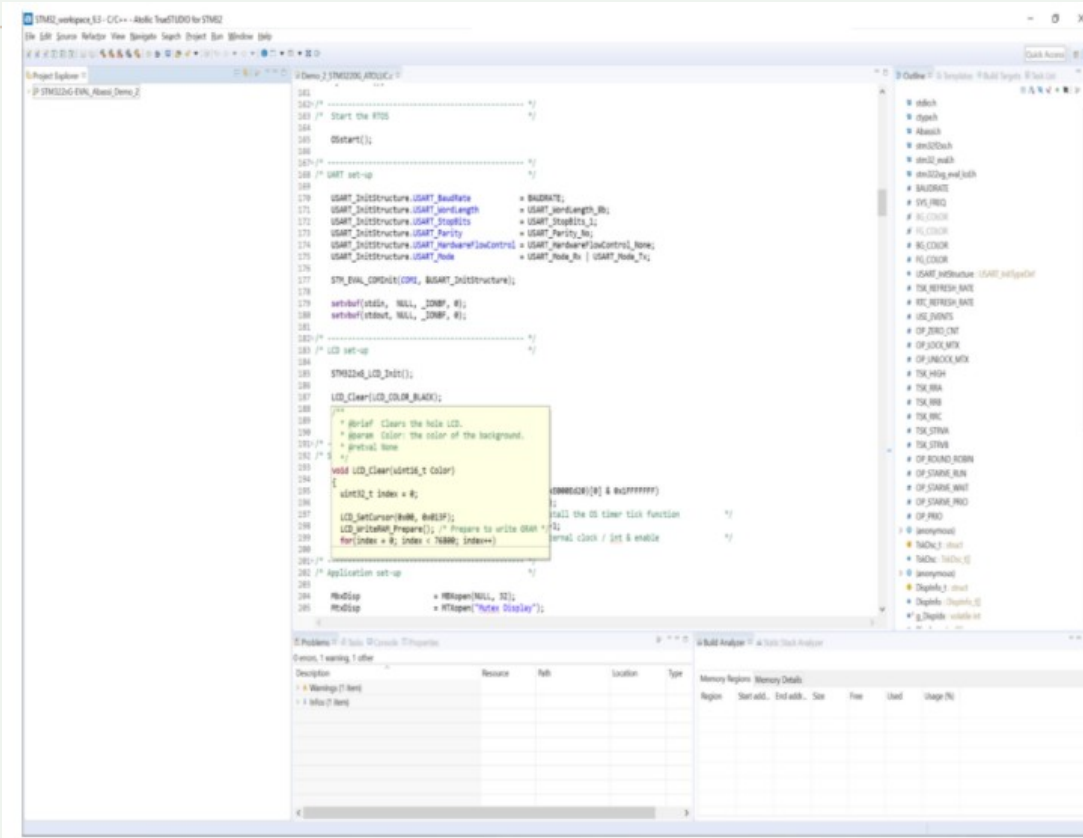
- Captura do projeto
- Programação



Desenvolvimento – Captura do projeto



Desenvolvimento – Programação



Características Típicas de um IDE

- *Editor*
 - *Destacando a Sintaxe*
- *Compilador*
- *Ligador*
- *Refatoração*
- *Controle de Versão*
- *Depuração*
- *Busca de Código*
- *Programação Visual*
- *Suporte à linguagem de programação*

Desenvolvimento Validação do Projeto

- Teste com base no que foi especificado
- Teste por partes, ou por etapas

Técnicas simples de verificação e validação

- Peça a alguém para avaliar seu trabalho (parece com laboratórios de aula com monitores)
 - Mas geralmente isso não acontece no mundo real
 - geralmente não há uma "folha de solução" no mundo real!
 - É esperado que você dê a folha de respostas e depois os convença de que está certo.
- Peça a um amigo para dar uma olhada (“avaliações por pares”)
- Faça com que alguém de fora examine (“avaliações externas”)
- Peça a uma agência de testes para exercitar (“certificação”)

Concluindo...

A nossa escola oferece disciplinas nas áreas de Biomédica, Telecomunicações, Sistemas de Energia, Eletrônica, Controle e Computação.

Destaca-se aqui a importância das disciplinas na área de controle para modelagem e análise de sistemas.

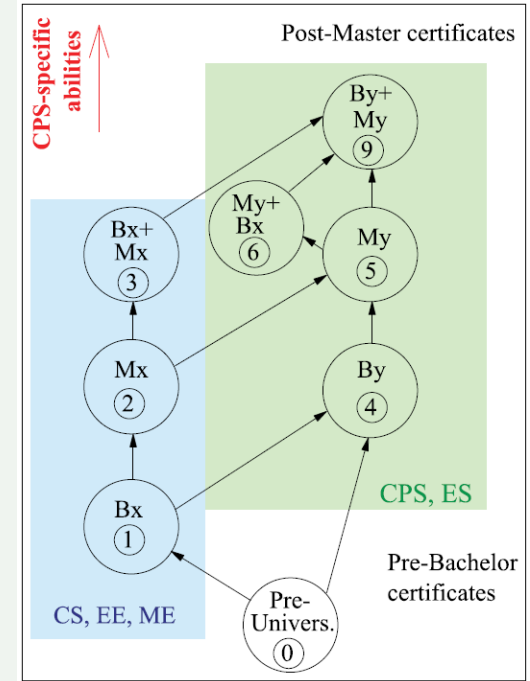
Conclusões

A FEEC poderia ser classificada no *case* ⑥ por Marwedel(2020)

- Tem um conjunto de disciplinas na graduação que cobrem boa parte dos tópicos sugeridos em NASEM (2016);
- Adota trabalho de final de curso;
- Tem na pós pelo menos um curso que aborda CPS.

Minha sugestão:

- Conseguir, com parceiros na indústria, ideias de projetos que possam ser publicados e aplicados em disciplinas, principalmente na graduação.



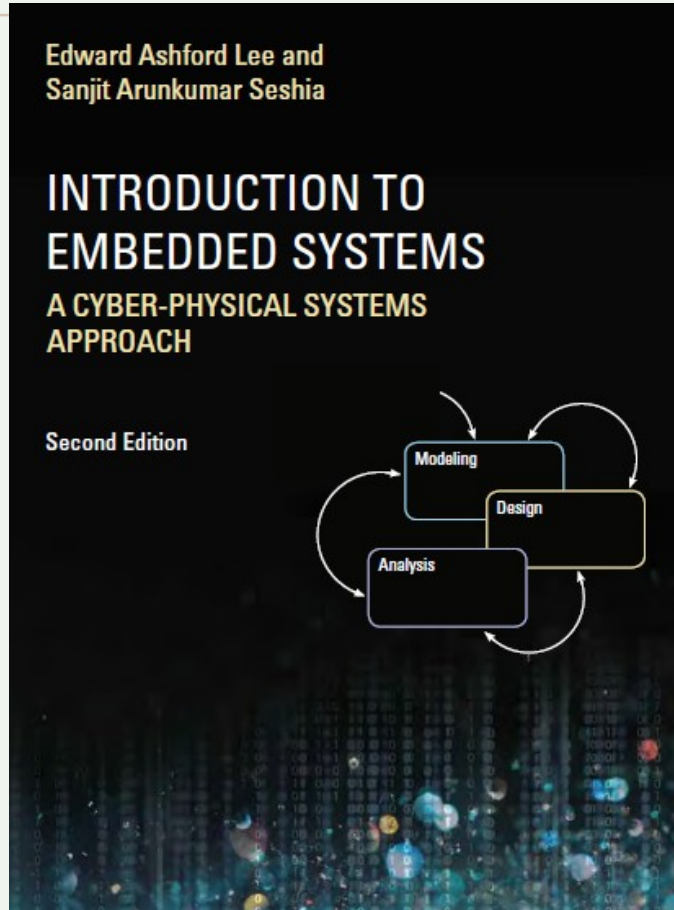
Sugestão de Livros Texto



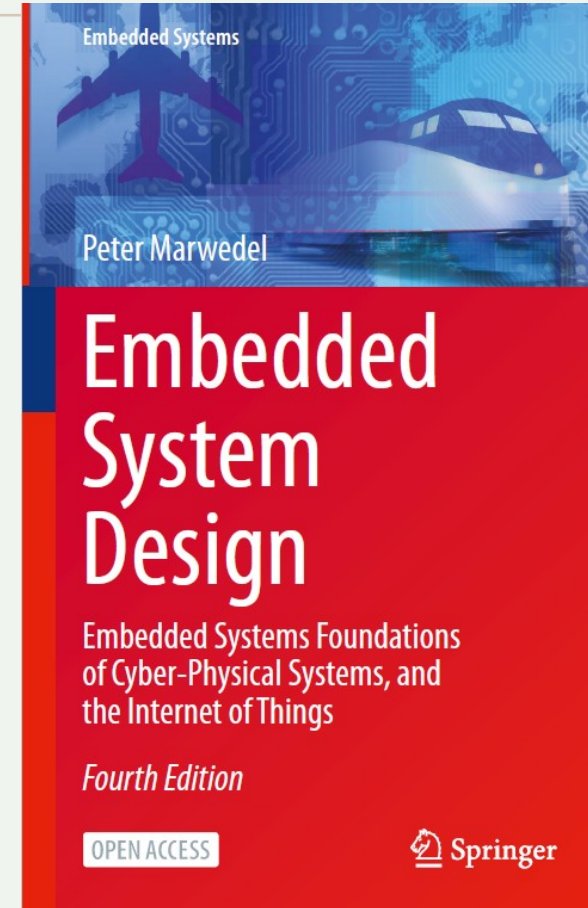
Edward A. Lee



Sanjit A. Seshia



Disponível em: <http://LeeSeshia.org>



Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-60910-8>



P. Marwedel

**Obrigado
!**

FEEC | UNICAMP
E A D C A 22
XIV ENCONTRO DE ALUNOS E DOCENTES DO DCA

Dúvidas?