



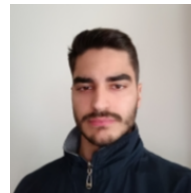
**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

# Programação Ciber-Física

## 2023/2024

### Trabalho Prático 1

Ricardo Lopes Santos Silva :: pg54188; Afonso Xavier Cardoso Marques :: pg53601



### I. INTRODUÇÃO

Este trabalho prático centra-se na modelagem e análise de um sistema ciber-físico relacionado com o funcionamento dos semáforos numa interseção em forma de T. O objetivo principal é desenvolver um modelo abrangente que represente de forma precisa o comportamento e as interações dos componentes do sistema, incluindo as estradas principais e secundárias, bem como os semáforos correspondentes. Através da utilização de técnicas de modelagem formal e metodologias de análise, a tarefa visa investigar a funcionalidade e eficácia do sistema ciber-físico na garantia de um fluxo de tráfego seguro e eficiente na interseção.

A seguinte imagem representa o cenário de estudo que consiste numa interseção em forma de T com uma estrada principal (Major Road) e dois semáforos e uma estrada secundária (Minor Road) com um sensor e um semáforo. Neste cenário, os carros conduzem do lado esquerdo.

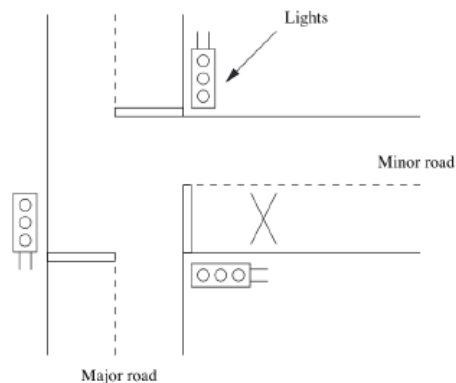


Fig. 1: Cenário em estudo

## II. PARTE 1

### A. Contextualização

O primeiro objetivo deste trabalho é modelar e analisar o sistema em causa de forma a garantir o funcionamento correto dos semáforos na interseção.

Para garantir um fluxo de tráfego razoável, o sistema tem as seguintes restrições:

- 1) Os semáforos na Major Road estão sempre verdes, e sempre vermelhos na Minor Road, a menos que um veículo seja detetado pelo sensor.
- 2) Caso o sensor seja ativado, os semáforos mudarão de acordo com a ordem normal e permitirão que o tráfego saia da Minor Road. Após um intervalo de tempo adequado (30 segundos), os semáforos voltarão à posição padrão para que o tráfego possa fluir na Major Road novamente.
- 3) Finalmente, assim que um veículo for detetado pelo sensor, este é desativado até que os semáforos da Minor Road voltem a estar vermelhos.

O sistema também respeita as seguintes restrições temporais:

- 1) Os semáforos intermediários (com luz amarela) permanecem ligados por 5 segundos.
- 2) Existe um atraso de 1 segundo entre desligar uma luz e ligar a próxima.
- 3) O semáforo da Major Road deve permanecer verde por pelo menos 30 segundos em cada ciclo, mas deve reagir ao sensor imediatamente após esse período.

### B. Desenvolvimento e Apuramento de Resultados

#### 1) Modelo:

O primeiro passo na resolução desta primeira parte consiste na modelação em UPPAAL do sistema de semáforos descrito anteriormente. Sendo assim, propomos o seguinte modelo:

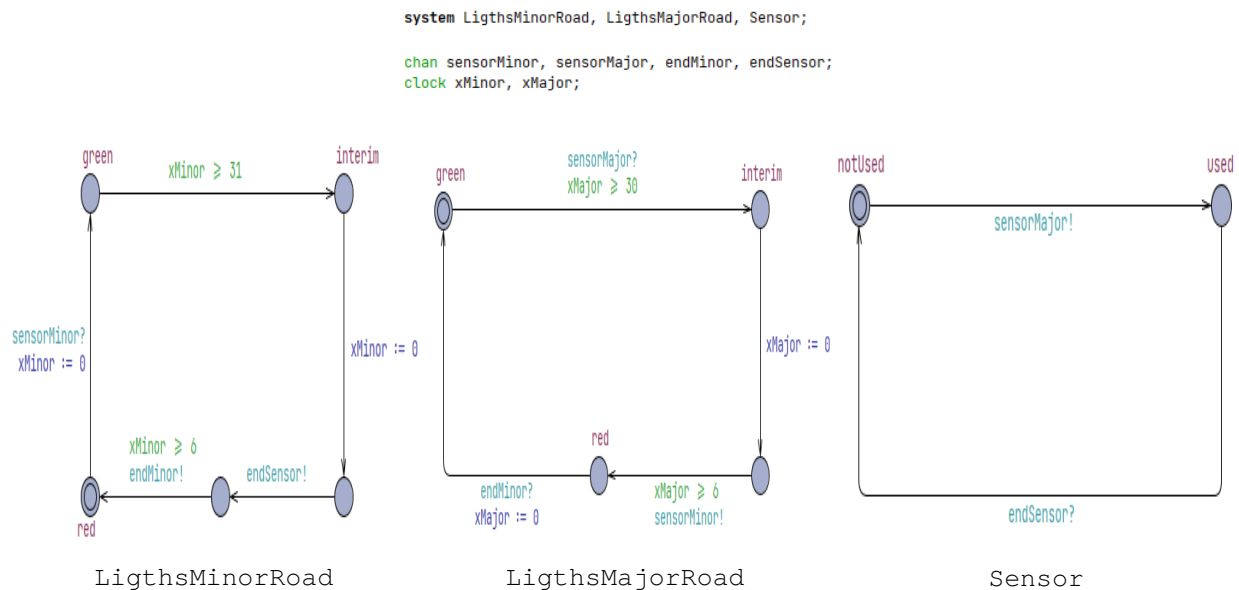


Fig. 2: Modelo desenvolvido

Como é possível ver na imagem acima, foram criadas três entidades (representadas sob a forma de autómatos) que ilustram, pela ordem em que aparecem, o comportamento dos semáforos na Minor Road, os semáforos na Major Road e o Sensor. De seguida apresentamos uma descrição mais detalhada de cada autômato:

- **LighsMinorRoad:**  
Este automato é composto por ...

- **LightsMajorRoad:**  
Este automato é composto por ...
- **Sensor:**  
Este automato é composto por ...

O modelo foi devidamente testado para garantir um funcionamento dentro do esperado e que cumpra as regras estabelecidas. O anexo A ilustra a simulação feita em UPPAAL.

## 2) *Verificação de Propriedades:*

De forma a garantir que o modelo do sistema está bem construído e que as suas regras e restrições são respeitadas, expressamos em CTL as seguintes propriedades de *reachability*, *safety* e *liveness* e testamos-las no UPPAAL para verificar se eram satisfatíveis.

- (1) o semáforo da Minor Road pode ficar verde;
- (2) o semáforo da Major Road pode ficar vermelho.
- (3) o sistema nunca entra em estado de bloqueio (*deadlock*);
- (4) os semáforos da Minor e Major Road não podem estar verdes ao mesmo tempo.
- (5) se houver carros à espera, eventualmente eles irão ter o sinal verde.

Em CTL, as propriedades são expressas da seguinte forma:

- (1) `E<> LightsMinorRoad.green`
- (2) `E<> LightsMajorRoad.red`
- (3) `A[] not deadlock`
- (4) `A[] !(LightsMajorRoad.green and LightsMinorRoad.green)`
- (5) `A<> (LightsMajorRoad.red imply LightsMajorRoad.green) or (LightsMinorRoad.red imply LightsMinorRoad.green)`

Usando a ferramenta Verifier do UPPAAL (ver anexo B), testamos a satisfatibilidade de todas as propriedades tendo em todos os casos obtido resultado positivo, pelo que concluímos que o modelo está bem construído.

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, encontramos outras propriedades que consideramos desejáveis para o sistema ciber-físico em estudo, tais como:

- (6) ...
- (7) ...

Usando a sintaxe em CTL abaixo, estas propriedades foram testadas no Verifier do UPPAAL (ver anexo ...) tendo-se novamente obtido o resultado de satisfatível.

- (6) ...
- (7) ...

## III. PARTE 2

### A. *Contextualização*

O sistema anterior de semáforos funciona razoavelmente bem sob a suposição de que uma das estradas tem mais tráfego do que a outra. No entanto, essa suposição muitas vezes é muito forte: pode ser o caso de que ambas as estradas tenham a mesma quantidade de tráfego, ou até mesmo que o fluxo de tráfego varie drasticamente ao longo do dia.

A segunda parte deste trabalho (mais exploratório) tem como objetivo abordar precisamente esse problema, que é conhecido por ter um impacto significativo na economia e no meio ambiente. Para isso, agora podemos assumir que cada semáforo tem um sensor inteligente ligado a ele. O sensor informa se o tráfego próximo ao semáforo é alto, baixo ou simplesmente inexistente. As restrições da primeira parte mantêm-se.

## B. Desenvolvimento e Apuramento de Resultados

### 1) Modelo:

Para a resolução da segunda parte, foi necessário adaptar o modelo UPPAAL anterior para levar em consideração as informações fornecidas pelos sensores. Espera-se, por exemplo, que se o sensor mais à direita indicar tráfego intenso e os outros sensores não indicarem tráfego, então o semáforo mais à direita deve permanecer verde pelo menos até que os sensores forneçam novas informações. Sendo assim, propomos a seguinte reformulação para o modelo:

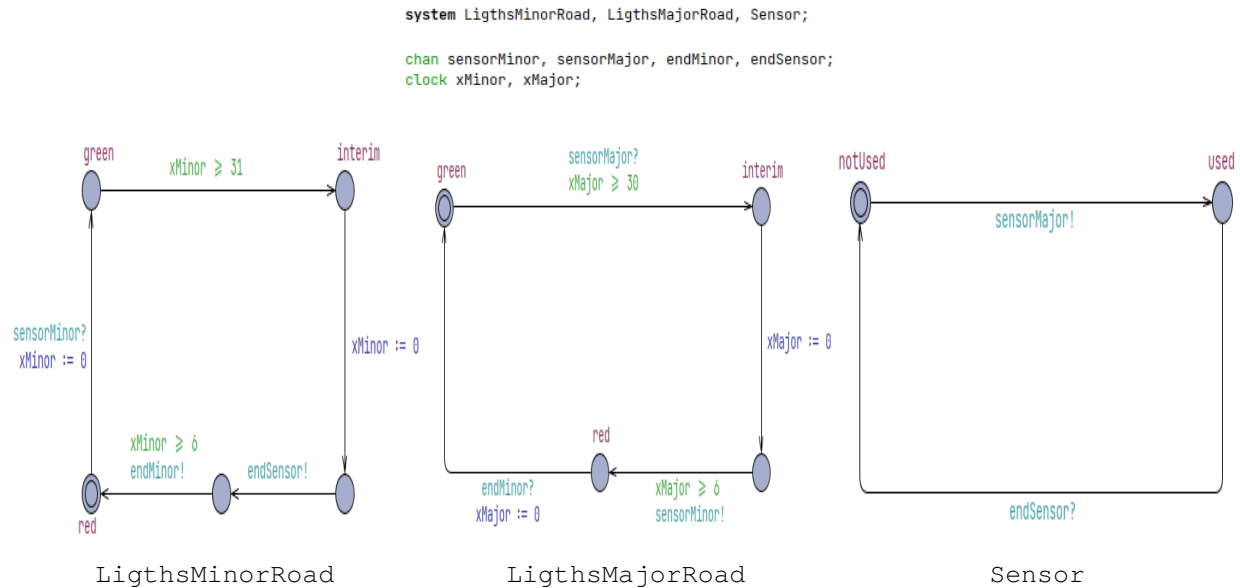


Fig. 3: Novo modelo desenvolvido

### 2) Verificação de Propriedades:

Iremos agora verificar se todas as propriedades mencionadas na primeira parte ainda são válidas para o novo modelo. Fazendo os devidos testes, concluímos que ...

### 3) (Valorização):

A segunda parte é de natureza mais exploratória, e portanto existe a liberdade para ajustar os parâmetros dos sensores conforme necessário para promover soluções diferentes e criativas. Serão valorizadas propriedades expressas em CTL que digam algo sobre a eficiência do sistema desenvolvido. Tal propriedade pode ser, por exemplo, "Se o sensor mais à direita sempre detectar tráfego intenso e os outros não detectarem tráfego algum, então observaremos no máximo uma mudança nos semáforos".

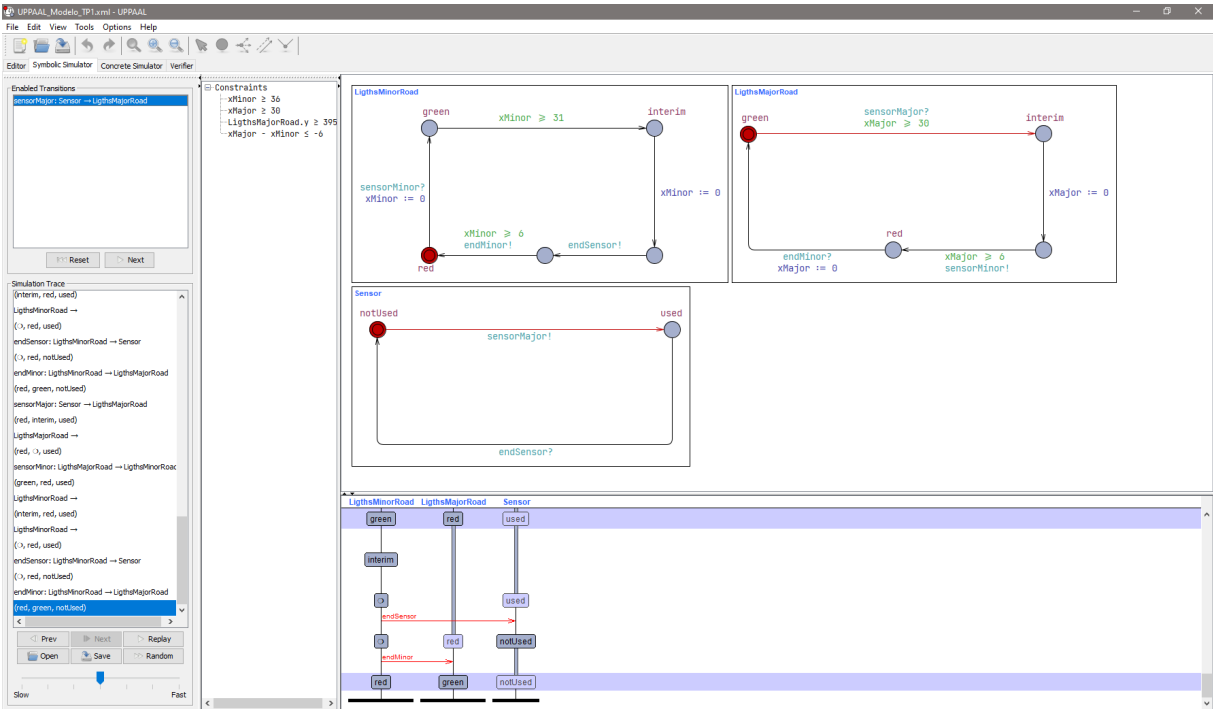
Sendo assim, para efeitos de valorização, propomos as seguintes propriedades ...

## IV. CONCLUSÃO

Com este projeto terminado, apresentamos uma breve conclusão que consideramos englobar todo o processo de aprendizagem despoletado por este trabalho.

Este relatório destaca o estudo feito sobre um sistema ciber-físico ...

APPENDIX A  
SIMULAÇÃO DO UPPAAL NA PARTE 1



APPENDIX B  
RESULTADOS VERIFIER DO UPPAAL NA PARTE 1

Editor	Symbolic Simulator	Concrete Simulator	Verifier
Overview			
E<> LigthsMinorRoad.green			
E<> LigthsMajorRoad.red			
A[] not deadlock			
A[] !(LigthsMajorRoad.green and LigthsMinorRoad.green)			
A<> (LigthsMajorRoad.red imply LigthsMajorRoad.green) or (LigthsMinorRoad.red imply LigthsMinorRoad.green)			

REFERENCES

[1] <https://uppaal.org/features/>  
[2] <https://haslab.github.io/MFP/PCF/2324/index>