



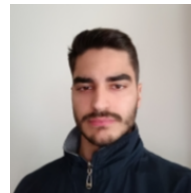
**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

# 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.

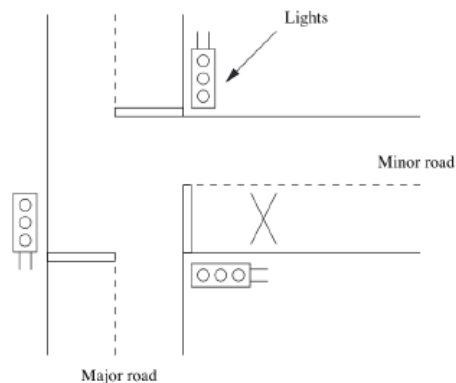


Fig. 1: Cenário em estudo

## 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.

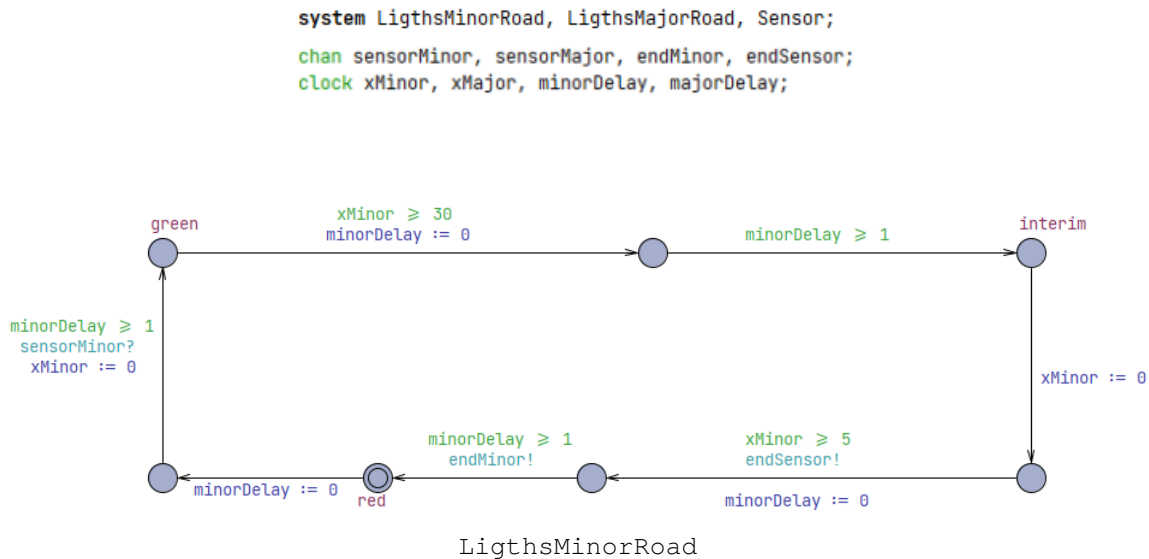
O sistema também respeita as seguintes restrições temporais:

- 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:



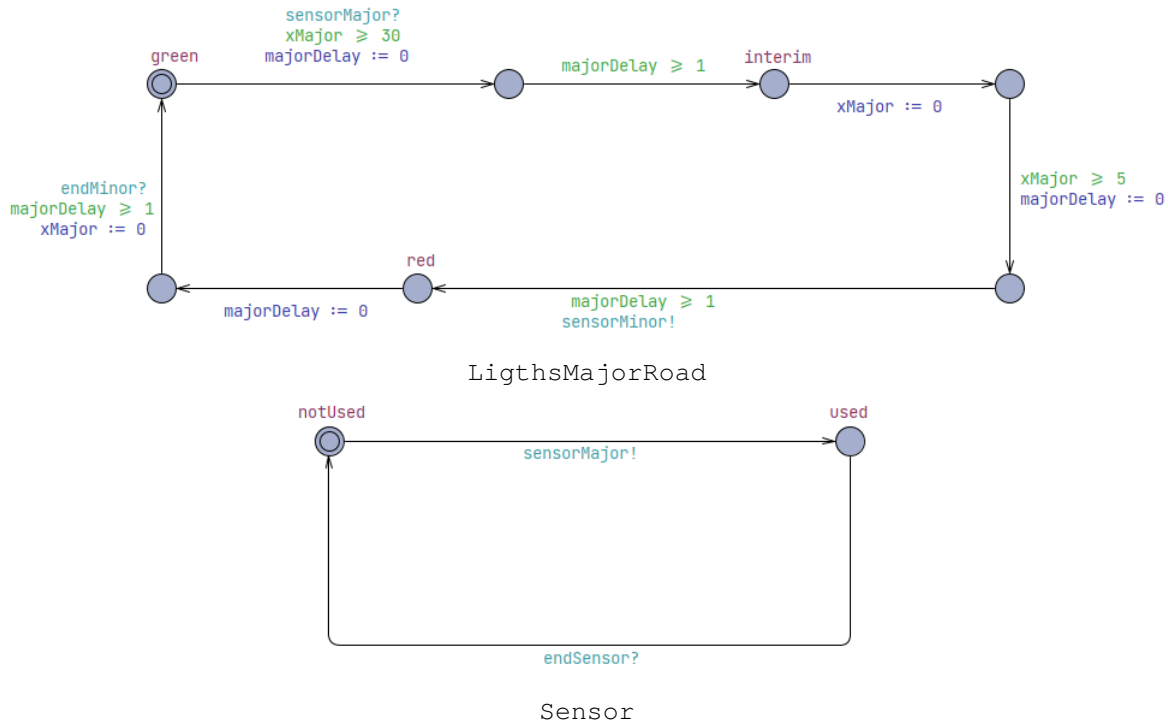


Fig. 2: Modelo desenvolvido

Como é possível ver na imagem acima, foram criadas três entidades (representadas sob a forma de autômatos) que ilustram, pela ordem em que aparecem, o comportamento dos semáforos na Minor Road, os semáforos na Major Road e o Sensor. Também estão declarados os diversos relógios que regulam o comportamento dos autômatos, sendo  $xMinor$  e  $minorDelay$  os relógios que regulam o tempo que cada luz fica acesa e o atraso na transição das mesmas na Minor Road,  $xMajor$  e  $majorDelay$  são o equivalente para a Major Road. Os canais de comunicação estabelecidos consistem em  $sensorMinor$  e  $endMinor$  que estabelecem comunicação entre a Major Road e a Minor Road,  $sensorMajor$  que permite ao sensor comunicar com Major Road e  $endSensor$  estabelecido entre Minor Road e o Sensor.

De seguida apresentamos uma descrição mais detalhada de cada autômato:

- **LightsMinorRoad:**

Este autômato é composto por três estados principais e quatro estados intermédios. Os estados principais consistem nas três possíveis luzes que um semáforo pode ter: vermelho (*red*), amarelo/intermédio (*interim*) e verde (*green*). Este autômato começa no estado inicial de vermelho, sendo apenas iniciado o ciclo de transição de luzes após ter recebido informação através do canal  $sensorMinor$  enviada pelo semáforo da Major Road. O relógio  $xMinor$  regula o tempo em que a luz verde fica acesa, precisamente 30 segundos, e a luz amarela, durante 5 segundos. O relógio  $minorDelay$  garante que as transições entre cada luz só ocorrem durante 1 segundo. Quando está na transição entre a luz amarela e a luz vermelha, comunica com o sensor através de  $endSensor$  permitindo que este volte ao estado de desativado. Após o estado intermédio, comunica com o semáforo de Major Road através de  $endMinor$ , permitindo que este acenda novamente as luzes verdes.

- **LightsMajorRoad:**

Este autômato é semelhante ao anterior, tendo os mesmos estados principais (*red*, *interim*, *green*) e os mesmos estados intermédios. A diferença está nas comunicações efetuadas e relógios usados. Contrariamente ao anterior, este autômato começa com um estado inicial de luz verde, sendo que o ciclo de luzes apenas começa após ser recebida informação da entidade Sensor pelo canal  $sensorMajor$ . O ciclo decorre da mesma forma que o semáforo da Minor Road, onde os relógios  $xMajor$  e  $majorDelay$  regulam o tempo em que as luzes verde e amarela ficam acesas e o tempo de transição entre cada luz, respetivamente. No instante antes de chegar ao estado de vermelho, utiliza o canal de comunicação  $sensorMinor$  para indicar ao semáforo da Minor Road que é seguro iniciar a sua transição para a luz verde. Assim consegue-se garantir que as luzes dos semáforos nas duas estradas nunca são verde ou vermelho simultaneamente.

- **Sensor:**

Este autômato é o mais simples de todos e é composto por apenas dois estados, desativado (*notUsed*) e ativado (*used*). Ao ser ativado, envia um sinal aos semáforos da Major Road pelo canal *sensorMajor* de forma a que estes iniciem o seu ciclo de luzes, permitindo assim a gradual passagem de verde a vermelho. Após receber o sinal do semáforo da Minor Road através do canal *endSensor*, retorna ao estado de desativado.

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 satisfazíveis.

- (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<> LighthsMinorRoad.green`
- (2) `E<> LighthsMajorRoad.red`
- (3) `A[] not deadlock`
- (4) `A[] !(LighthsMajorRoad.green and LighthsMinorRoad.green)`
- (5) `Sensor.used and LighthsMinorRoad.red  $\leadsto$  LighthsMinorRoad.green`

Usando a ferramenta Verifier do UPPAAL (ver anexo B), testamos a satisfatibilidade de todas as propriedades tendo obtido resultado positivo em quatro dos cinco casos, sendo a quinta propriedade aquela que falha. Observando a simulação dos nossos autômatos, conseguimos perceber que uma das razões pela qual a quinta propriedade falha durante os testes de satisfatibilidade poderá ser o facto de os estados dos semáforos, tanto em Major Road com em Minor Road, terem a possibilidade de transitarem de estado mas de nunca serem obrigados ou forçados a fazê-lo. Infelizmente, não conseguimos contornar este problema, pelo que optamos por manter os autômatos no estado atual em que são apresentados, permitindo assim ter uma simulação sem ocorrências de *deadlocks*.

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

- (6) é possível o semáforo da Major Road estar vermelho ao mesmo tempo que o semáforo da Minor Road está verde;
- (7) o semáforo da Minor Road fica sempre amarelo após terem passado 30 segundos de luz verde.

Usando a sintaxe em CTL abaixo, estas propriedades foram testadas no Verifier do UPPAAL (ver anexo B) tendo-se obtido o resultado de satisfazível nos dois casos:

- (6) `E<> LighthsMajorRoad.red and LighthsMinorRoad.green`
- (7) `A[] LighthsMinorRoad.interim imply xMinor > 30`

## 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.

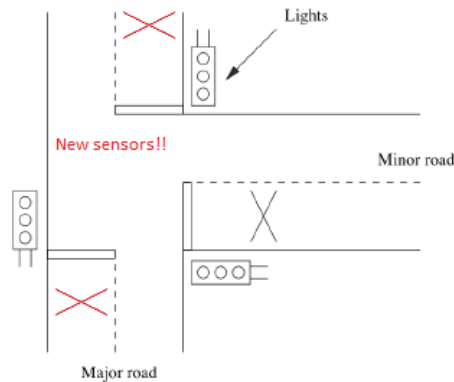


Fig. 3: Novo cenário em estudo

## 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:

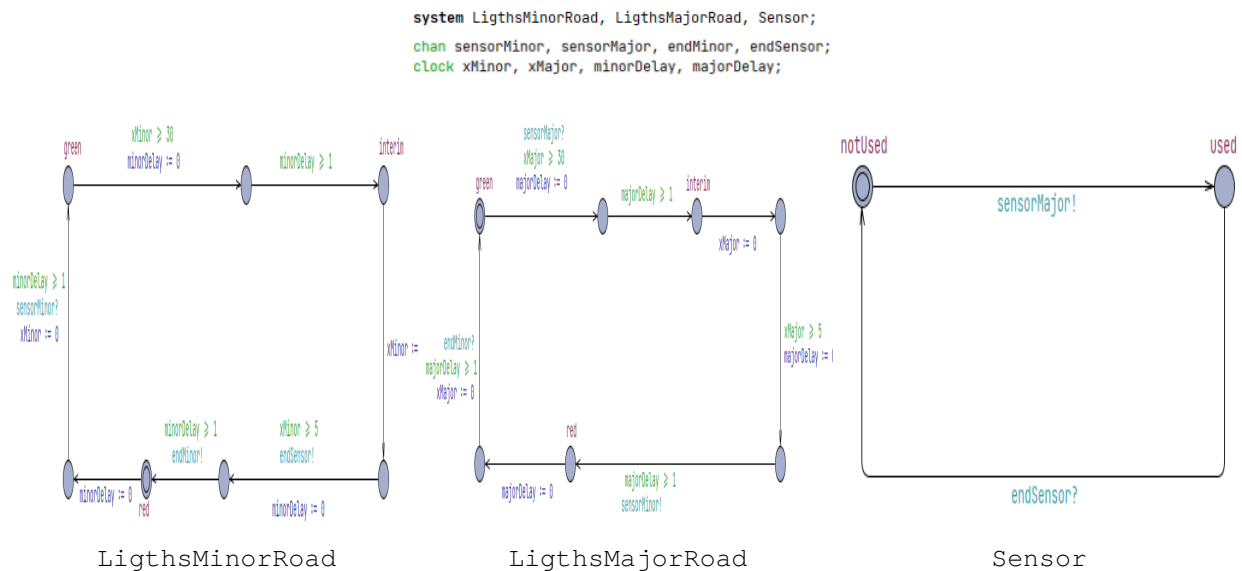


Fig. 4: Novo modelo desenvolvido

### 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".

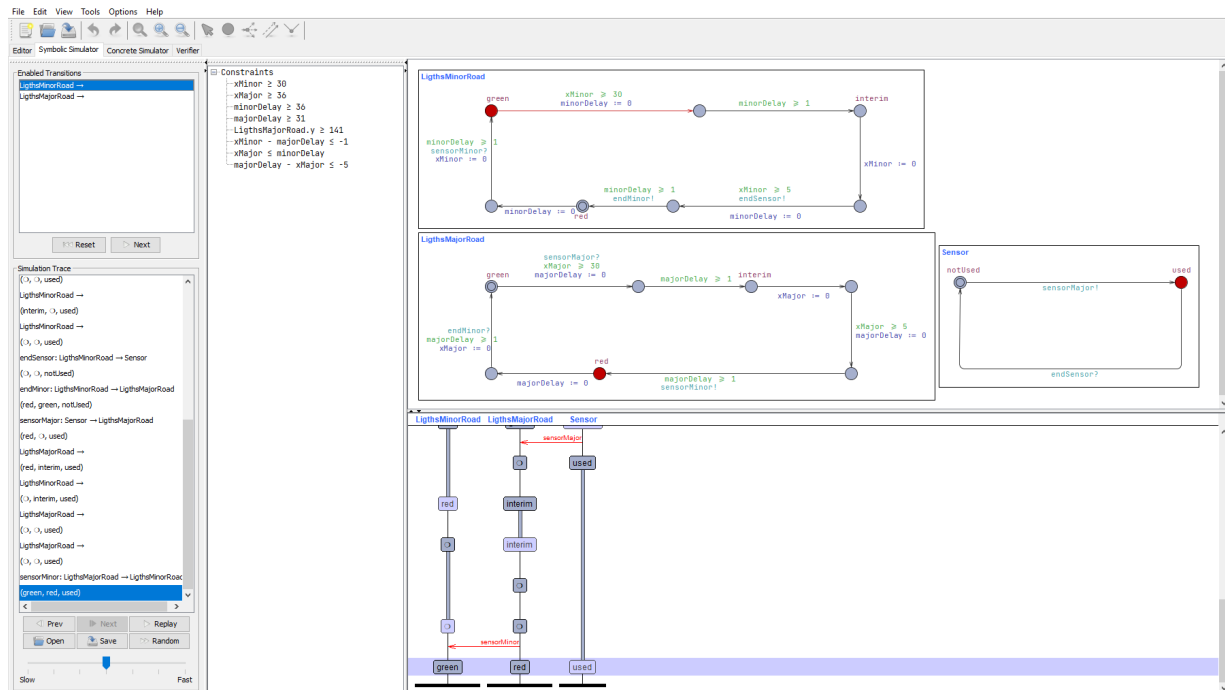
Sendo assim, para efeitos de valorização, propomos as seguintes propriedades ...

## 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 $\Diamond$ LigthsMinorRoad.green			●
E $\Diamond$ LigthsMajorRoad.red			●
A[] not deadlock			●
A[] !(LigthsMajorRoad.green and LigthsMinorRoad.green)			●
Sensor.used and LigthsMinorRoad.red $\rightarrow$ LigthsMinorRoad.green			●
E $\Diamond$ LigthsMajorRoad.red and LigthsMinorRoad.green			●
A[] LigthsMinorRoad.interim imply xMinor > 30			●

## REFERENCES

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