

# MODELO DE SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS DE UMA VIA URBANA INTEGRADO A UM SISTEMA DE CONTROLE AUTOMATIZADO

**Rodrigo César Teixeira Baptista**

Instituto Federal Fluminense (IFF)

Rua Doutor Siqueira, 273 - Campos dos Goytacazes / RJ - 28030-130

e-mail: rodbap80@gmail.com

**João José De Assis Rangel**

Universidade Candido Mendes (Ucam-Campos)

Rua Anita Pessanha, 100 - Campos dos Goytacazes / RJ, 28030-335

e-mail: joao@ucam-campos.br

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo abordar a integração entre um modelo de simulação a eventos discretos e um sistema de controle automatizado para análise de um cruzamento viário hipotético, em tempo real, segundo os estados do trânsito. Para isso, foi construído um modelo de simulação em Arena, com sensores de presença de veículos e integrado a um controlador lógico programável (CLP). O modelo foi testado e depois de validado pôde responder aos comandos do controlador. Os resultados mostraram que foi possível analisar o comportamento do fluxo de veículos no cruzamento, conforme a habilitação e a desabilitação dos sensores de detecção de veículos, instalados nos semáforos do modelo computacional.

**PALAVRAS CHAVE: simulação a eventos discretos; sistema de controle; trânsito.**

## ABSTRACT

This study aimed to address the integration between a model of discrete event simulation and an automated control system for analysis of a hypothetical crossroad, in real time, according to the states of the traffic. For this, it was constructed a simulation model in Arena, with sensors of presence of vehicles, and integrated with a programmable logic controller (PLC). The model was tested and, after validated, could respond to commands from the controller. The results showed that it was possible to analyze the vehicles flow behavior at the crossroad, according to the enabling and disabling of vehicle detection sensors, installed in the traffic lights of the computer model.

**KEYWORDS: discrete event simulation, control system; traffic.**

## **1. INTRODUÇÃO**

Em recente trabalho [1], foi demonstrada a integração entre um modelo de simulação a eventos discretos (SED) de uma via urbana semaforizada e um sistema de controle automatizado. Através do modelo apresentado, foi possível acompanhar em tempo real o comportamento do fluxo de veículos em situações distintas de tráfego. Durante a avaliação do sistema, puderam-se acompanhar, no modelo de simulação, os diferentes estímulos das variáveis relativas à dinâmica das operações do trânsito. O modelo permitiu avaliar o comportamento de cada uma das vias semaforizadas e a atuação dos comandos de ativação e desativação dos semáforos, oriundos do controlador. Os autores propuseram que, de forma semelhante, situações comuns em indústrias, como por exemplo, de sistemas de transporte de produtos em esteiras em linhas de montagem, também possam ser analisadas e testadas com a abordagem apresentada.

Vale ressaltar que ao longo da década 1990 muitos trabalhos sobre integração e comunicação de simulação e sistema de controle automático foram desenvolvidos, como os trabalhos de [2], [3] e [4]. O mesmo ocorrera durante a primeira década do século XXI com os trabalhos de [5], [6], [7], [8] e [9], e continuam sendo elaborados até hoje, conforme os trabalhos de [1], [10] e [11]. A integração entre SED e sistema de controle permite avaliar não só o comportamento dinâmico e estocástico do ambiente simulado, mas também a tecnologia e a lógica aplicada no sistema de controle.

Por outro lado, a analogia que pode ser obtida entre as vias de trânsito urbano e as linhas de montagem industrial traz como a principal vantagem a possibilidade de se analisar sistemas reais semelhantes, com grande quantidade de dados, sem a necessidade de acesso ao ambiente fabril. Ou seja, pode-se modelar e, conseqüentemente, simular sistemas com dados reais de comportamento dinâmico e estocástico, integrados a sistemas de controle, sem a necessidade de acessar sistemas do interior de uma indústria.

Portanto, este trabalho tem como objetivo abordar a integração entre um modelo de simulação e um sistema de controle automático para análise de desempenho de um cruzamento viário hipotético, em tempo real, segundo o estado de trânsito congestionado. Sensores de detecção de veículos, instalados hipoteticamente junto ao solo de uma das vias do modelo permitiu ajustar, automaticamente, o tempo de operação de um semáforo, conforme a demanda de veículos.

## **2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA**

### **2.1 O CRUZAMENTO SEMAFORIZADO**

O sistema computacional desenvolvido neste trabalho é hipotético e representa um trecho urbano semaforizado, composto por duas vias de mão única, onde cada uma possui duas pistas. Um esboço detalhado do trecho urbano semaforizado é mostrado na Figura 1.

Na via 1 estão instalados dois semáforos (SEM1 e SEM3) e na via 2, apenas um semáforo (SEM2). Sendo que os semáforos SEM1 e SEM2 encontram-se instalados no ponto de interseção entre as duas vias do modelo. Além disso, no trecho da via 1, compreendido entre SEM 1 e SEM 3, encontram-se instalados quatro sensores de detecção de veículos: V11E, V11S, V12E e V12S. Quando habilitados estes sensores tem por função atuar automaticamente no tempo de verde do SEM 3. Para, com isso, influenciar a desobstrução do trânsito no pós-semáforo do SEM 1.

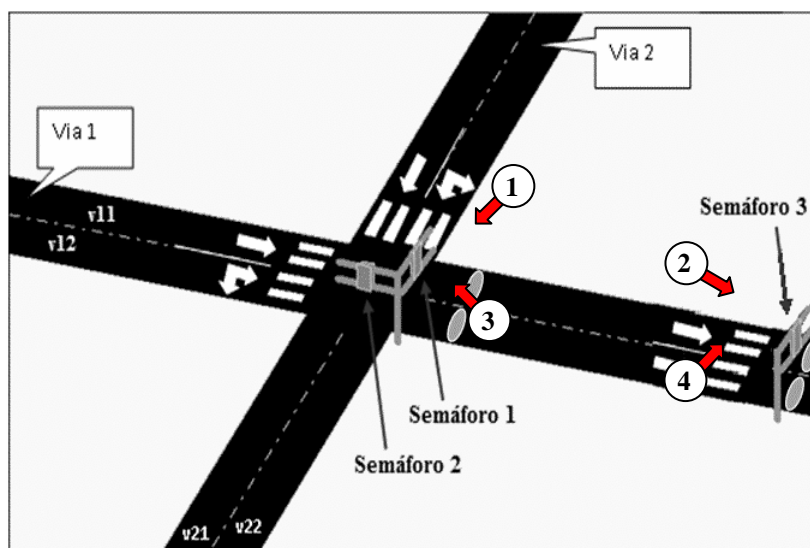


Figura 1: Esboço detalhado das Vias 1 e 2. (1) sensor V11E, (2) sensor V11S, (3) sensor V12E, (4) sensor V12S.

Logo, para a elaboração do modelo de simulação do sistema semaforizado, adotou-se como base os dados utilizados por [12]. Assim, para a elaboração e o estudo do modelo de simulação deste artigo, tomaram-se como referência os seguintes dados:

- ciclo de temporização dos semáforos das vias 1 e 2;
- tempo entre chegada de veículos de cada via;
- demanda de automóveis por via após semáforo;

A sincronização dos semáforos das Vias 1 e 2 segue um padrão que se baseia em um ciclo de temporização, com cada ciclo medindo 91 segundos. Os tempos de verde, amarelo e vermelho dos sinalizadores luminosos do semáforo SEM 1 são, respectivamente, iguais a 46 segundos, 5 segundos e 40 segundos. Já os tempos de vermelho, verde e amarelo dos sinalizadores luminosos do semáforo SEM 2 são, respectivamente, iguais a 53 segundos, 5 segundos e 33 segundos. De modo que o resultado do somatório dos tempos de vermelho, verde e amarelo do SEM 2 ou o resultado do somatório dos tempos de vermelho, verde e amarelo do SEM 1 são iguais ao tamanho do ciclo destes semáforos, isto é, 91 segundos.

No que tange a lógica de temporização do SEM 3, localizado na saída da Via 1, a priori, os tempos de verde, vermelho e amarelo, assim como seu ciclo de temporização, seguem a mesma configuração do SEM 1. Porém, caso o tamanho da fila de automóveis seja superior ao comportado pelo trecho compreendido entre SEM 1 e SEM 3, o tempo de verde do SEM 3 é ajustado, automaticamente, pelos sensores de detecção de veículos.

Tendo como suporte a lógica do ciclo de temporização dos semáforos SEM 1 e SEM 2, sendo cada ciclo igual a 91 segundos, a fim de se analisar o comportamento do fluxo de automóveis ao longo das vias 1 e 2, é simulado junto ao modelo de simulação um período equivalente a 3 ciclos de temporização (273 segundos). De modo que um estado de padrão de fluxo de trânsito possa ser analisado, neste caso, o estado de trânsito congestionado. Para tal, é proposto um (1) cenário, onde o mesmo influencia o tempo entre chegadas (TEC) de veículos em cada uma das vias do cruzamento. Logo, para representar as funções correspondentes às TECs dos automóveis que entram no sistema pelas pistas 1 e 2 (v11 e v12) da Via 1 (V1) e pelas pistas 1 e 2 (v21 e v22) da Via 2 (V2), em situação de trânsito “livre”, foi elaborada a Tabela 1. Onde as funções de TEC foram adaptadas de [12].

Tabela 1. Funções de TEC das Vias 1 e 2 com “trânsito livre”

Via	Pista	Função de TEC (segundos)
V1	v11	$5.2 + \text{LOGN}(2.97, 2.75)$
	v12	$4.95 + \text{LOGN}(1.17, 0.755)$
V2	v21	$6.08 + \text{GAMM}(0.456, 3.49)$
	v22	$6.7 + \text{WEIB}(1.78, 1.96)$

Assim, no modelo computacional, as pistas 1 (v11) e 2 (v12) da Via 1 são representadas por uma função Lognormal e as pistas 1 (v21) e 2 (v22) da Via 2 são representadas, respectivamente, por uma função Gamma e por uma função Weibull. Visto que o estado de fluxo “trânsito congestionado” representa a TEC de veículos das pistas das vias 1 e 2 quando o estado de fluxo “trânsito livre” sofre um ajuste de TEC de mais 60%.

Por fim, para representar a demanda de automóveis por via após semáforo, isto é, o caminho que o automóvel segue assim que o sinalizador verde dos semáforos do cruzamento é ativado, os dados originais obtidos de [12] foram adaptados para o modelo de simulação e o resultado desta adaptação encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2. Porcentagem da demanda de automóveis no pós-semáforo.

Cruzam a interseção pela Via	Cruzam a interseção pela Pista	Saem do sistema por v11 (%)	Saem do sistema por v12 (%)	Saem do sistema por v21 (%)	Saem do sistema por v22 (%)
V1	v11	100	0,0	0,0	0,0
	v12	0,0	56,8	42,2	1,0
V2	v21	0,0	0,0	100	0,0
	v22	39,7	28,7	0,0	31,6

Segundo a Tabela 2, 56,8% dos automóveis que cruzam a interseção semaforizada pela pista 2 (v12) da Via 1 (V1) saem do sistema pela mesma via na qual se encontravam antes de cruzar a interseção. Os outros 42,2% saem do sistema pela Via 2 (V2). Na pista 2 (v22) de V2, 68,4% dos automóveis que atravessam a interseção semaforizado saem do sistema por V1 e apenas 31,6% saem do sistema por V2. O veículo que atravessa o cruzamento pela pista 1 (v11) de V1 ou pela pista 1 (v21) de V2 sai do sistema pela mesma via na qual se encontrava antes de cruzar a interseção semaforizada. Logo, a Tabela 2 representa a possibilidade (em porcentagem) de um automóvel manter sua trajetória (permanecer na mesma via e pista na qual se encontrava antes de cruzar a interseção) ou converter para a outra via. Isto é, um automóvel que se encontra na pista v12 de V1 pode continuar sua trajetória seguindo por esta via até o pós-semáforo da interseção de V1 com V2 ou converter para uma das duas pista de V2 (v21 ou v22). Assim como um automóvel que se encontra na pista v22 de V2 pode continuar sua trajetória, seguindo por esta via até o pós-semáforo de V2 com V1, ou converter para uma das duas pistas de V1 (v11 ou v12).

## 2.2 O MODELO COMPUTACIONAL

Foi elaborado, inicialmente, um modelo conceitual segundo a linguagem IDEF-SIM, proposta por [13]. Sendo possível, com isso, imprimir maior qualidade ao modelo de simulação e reduzir o tempo de elaboração do mesmo. Enfim, após a verificação e validação, o modelo conceitual foi traduzido para o software Arena versão 12.0, conforme [14].

Para a elaboração do modelo de simulação foi utilizada a metodologia proposta por [15], com os seguintes passos: formulação de análise do problema, formulação do modelo conceitual, tradução do modelo conceitual para o software Ururau e Arena, verificação e validação, experimentação, interpretação e análise estatística dos resultados, comparação e apresentação dos resultados.

É importante enfatizar que a animação do modelo ocorre em consonância com a lógica de controle instalada no controlador lógico programável (CLP). Sendo que para o tempo de animação, foi adotado um tamanho de 273 segundos para cada rodada de simulação. Isto é, cada situação de trânsito simulada tem 5 minutos de simulação.

### 2.3 O SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle utilizado para comandar os três semáforos (SEM1, SEM2 e SEM3) do modelo de simulação é composto por um conjunto de dispositivos. São eles:

- botão L/D;
- botão SA/SD;
- quatro sensores de detecção de automóveis (V11E, V11S, V12E e V12S);
- três semáforos
- um CLP.

A Figura 2 mostra a localização dos dispositivos tangíveis instalados junto ao módulo didático, isto é, o botão L/D (1), o botão SA/SD (2) e o CLP (3).

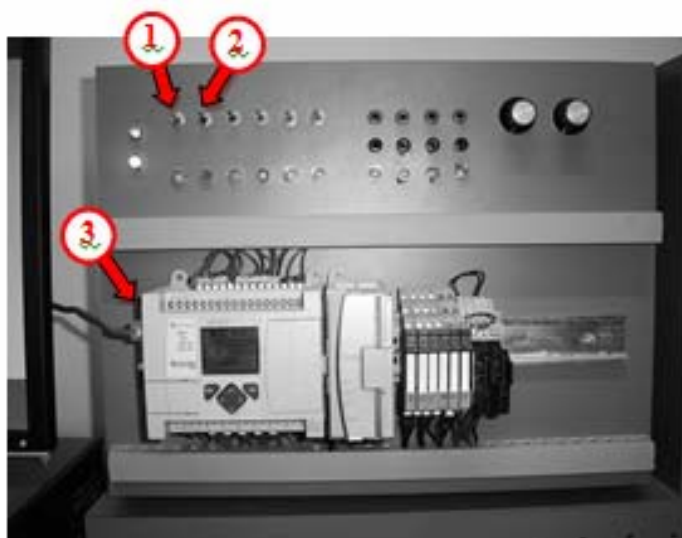


Figura 2: Dispositivos do módulo didático: (1) botão L/D, (2) botão SA/SD, (3) CLP

O botão L/D é uma botoeira elétrica (tipo trava) que permite ativar ou desativar a lógica de comando dos sinalizadores dos semáforos. Quando na posição “normal fechada”, o botão L/D ativa a linha de alimentação dos semáforos, permitindo que os temporizadores de ativação dos sinalizadores de luminosidade dos mesmos sejam habilitados. Porém, quando o botão L/D está na posição “normal aberta”, a linha de alimentação dos semáforos é desabilitada, o mesmo ocorrendo com os temporizadores de ativação dos sinalizadores.

Já o botão SA/SD é uma botoeira (tipo trava) cuja função é habilitar ou desabilitar a linha de alimentação dos contadores de veículos e dos temporizadores intermediários do SEM 3. Assim, o instante de acionamento dos sinalizadores luminosos verde, vermelho e amarelo dos semáforos 1 e 3 são os mesmos enquanto o botão SA/SD permanece desabilitado. No entanto, quando o botão SA/SD está habilitado, os semáforos SEM1 e SEM3 não trabalham mais em sincronia. Pois, com isso, habilita-se a linha de alimentação dos quatro sensores de detecção de automóveis (V11E, V11S, V12E e V12S), instalados no intervalo compreendido entre SEM1 e SEM3. Isto é, caso o trecho da Via 1, compreendido entre os SEM1 e SEM3, apresente um número de automóveis superior ou igual a oito nas pista 1 ou 2 daquela via, automaticamente, o sinalizador luminoso verde do SEM3 é ativado, independente do SEM1.

Conforme mostrado na Figura 1 do tópico 3.1., os sensores V11E e V11S estão instalados na pista 1 da Via 1. O sensor V11E é uma das variáveis do modelo de simulação que está associada a um bit de memória do CLP. Ele detecta os automóveis que “entram” (daí

a letra “E” do código do sensor “V11E”) no trecho da Via 1, compreendido entre o semáforo 1 (SEM1) e o semáforo 3 (SEM3), pela pista 1 desta via. O sensor V11S também é uma variável do modelo de simulação que está associada a outro bit de memória auxiliar do CLP. Porém, ele detecta os automóveis que saem pela pista 1 da Via 1, ou seja, detecta àqueles automóveis que cruzam o semáforo 1 pela pista 1 da Via 1 e saem do sistema por esta mesma pista e via cruzando o SEM 3.

Os sensores V12E e V12S também correspondem as variáveis do modelo de simulação associadas a bits de memória auxiliar do CLP. E, assim como ocorre com os sensores da pista 1 da via 1, os sensores V12E e V12S também detectam, respectivamente, os automóveis que entram e saem do trecho compreendido entre SEM 1 e SEM 3 da Via 1. Estes sensores encontram-se instalados na pista 2 da Via 1. Um próximo ao SEM 1 e o outro no ponto de saída, junto ao SEM 3.

Deste modo, uma vez definido o sistema de controle, o próximo passo é a elaboração da lógica de controle (responsável pela interação entre os elementos de controle). A Figura 3 mostra parte de uma página de programação da lógica de controle, desenvolvida no software RSLogix 500 versão 7.3 e instalada no CLP Micrologix 1100 da Allen-Bradley, responsável pelo comando dos semáforos SEM1, SEM2 e SEM3 do cruzamento semaforizado do modelo computacional.

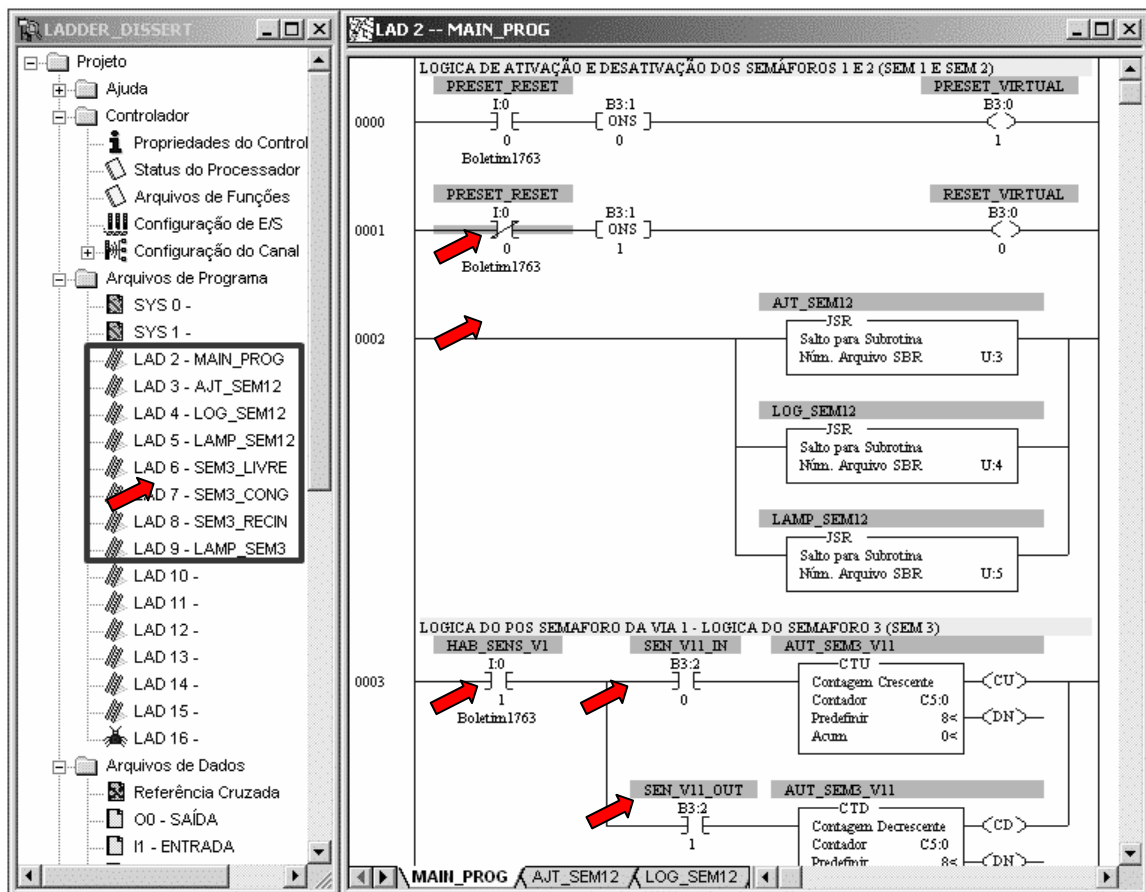


Figura 3: Parte da lógica de controle instalada no CLP Micrologix 1100 – Allen-Bradley.

A lógica de controle completa está dividida em oito páginas de programação (LAD 2, LAD 3, LAD 4, LAD 5, LAD 6, LAD 7, LAD 8 e LAD 9), conforme indicado pela seta no lado esquerdo da Figura 3. Nesta mesma figura, no lado direito, é indicado nas duas primeiras linhas do ladder o bit de memória representativo do botão L/D, “I:0/0”, cuja função é ativar ou desativar as cargas do sistema semaforizado (os sinalizadores dos semáforos, os temporizadores e os contadores de veículos). Também é possível notar na quarta linha do

ladder o bit de memória relativo ao botão SA/SD (“I:0/1”), cuja função é habilitar ou desabilitar os sensores detectores de veículos. Sendo que nesta mesma linha, encontram-se dois dos quatro bits de memória do CLP referentes aos sensores detectores de veículos, isto é, “B3:2/0” (V11E) e “B3:2/1” (V11S).

### **3. INTEGRAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO AO CLP**

Para integrar o modelo de simulação ao CLP, foram seguidos os passos propostos por [9]. Assim, para que a integração entre o CLP e o modelo de simulação ocorra são necessários basicamente três softwares:

- Ambiente de simulação Arena versão 12.0.0.45 (para a elaboração e animação do modelo de simulação);
- RSLinx Classic versão 2.55.15.0 (para a comunicação entre aplicativos Rockwell Software);
- Factory Talk Administration Console versão 2.10.2.24 (para criar um cliente servidor de dados OPC);

Para que o CLP Micrologix 1100 e o software de simulação Arena interajam entre si, é necessário criar uma conexão que permita a "conversa" entre a lógica de controle instalada no CLP e o algoritmo do modelo de simulação desenvolvido no ambiente Arena. Ao método de conexão que permite a interação entre o ambiente Arena e o CLP, denomina-se mapeamento. Para que o mapeamento ocorra é necessário criar uma conexão que permita acessar os dados registrados em um servidor OPC, onde os softwares Factory Talk Administration Console e RSLinx Classic servem de interface junto ao servidor OPC. A metodologia para a configuração dos elementos do ambiente Arena necessários à construção da respectiva conexão, encontra-se em [9].

Assim, através da conexão criada entre o ambiente de simulação e o servidor de dados OPC, é possível conectar as variáveis do modelo de simulação com as variáveis virtuais da lógica de controle do CLP. Cada *tag* definido na lógica de controle do CLP faz menção aos respectivos I/O (Inputs/Outputs) ou variáveis virtuais localizados na memória deste instrumento. Igualmente, cada variável do modelo de simulação é integrada a um *tag* da lógica de programação do CLP, fazendo com que as informações sejam trocadas por ambos os softwares, o que permite ao CLP controlar os sinalizadores dos semáforos do modelo de simulação.

Diante do exposto, é importante enfatizar que o algoritmo da solução não está no software de simulação Arena. Ele está no CLP e corresponde à lógica de controle que comanda os sinalizadores luminosos dos semáforos, animados no modelo de simulação do software Arena, ficando a cargo deste software coletar e permitir elaborar relatórios e gráficos estatísticos, conforme o comportamento do fluxo de veículos no modelo simulação.

Também é importante ressaltar que na ausência do sistema de controle real, pode-se utilizar, integrado ao modelo de simulação, o sistema de controle emulado. Esta técnica é conhecida como Simulação Off-line, onde um CLP emulado, com as mesmas características de um CLP real, é quem passa a trocar informações com o modelo de simulação. Assim, cada variável do modelo passa a ser integrada a um *tag* da lógica do CLP emulado, o que permite a troca de informações entre ambos os softwares.

### **4. TESTES E AVALIAÇÃO DA INTEGRAÇÃO**

#### **4.1 TESTES DA INTEGRAÇÃO**

Para testar e avaliar a integração foram propostos dois cenários:

- Cenário 1: Trânsito congestionado com botão SA/SD desabilitado;
- Cenário 2: Trânsito congestionado com botão SA/SD habilitado;

Ambos os cenários representam o mesmo estado de trânsito, o estado de trânsito

congestionado. E o critério utilizado para definir o estado de trânsito foi a quantidade de veículos retida nas vias semaforizadas do modelo de simulação e o tamanho das filas de veículos formadas a partir dos pontos de sinalização. O objetivo disto é mostrar o comportamento do trânsito com os sensores detectores de veículos desabilitados e habilitados segundo o mesmo estado de trânsito. As Figuras 4 e 5 mostram o instante de animação do modelo de simulação, integrado ao sistema de controle, conforme os dois cenários propostos. Sendo o instante de captação da animação de cada cenário o mesmo, ou seja, 90,5 segundos.

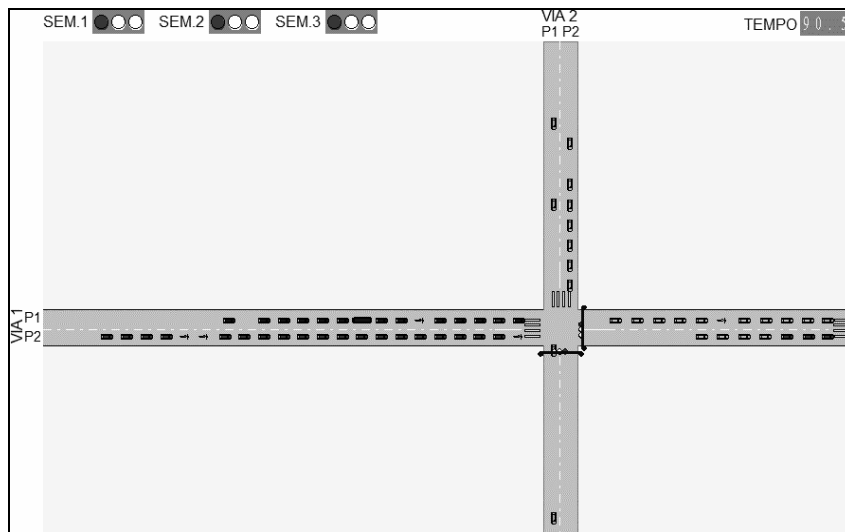


Figura 4: Instante de simulação do modelo em estado de trânsito congestionado com botão SA/SD desabilitado.

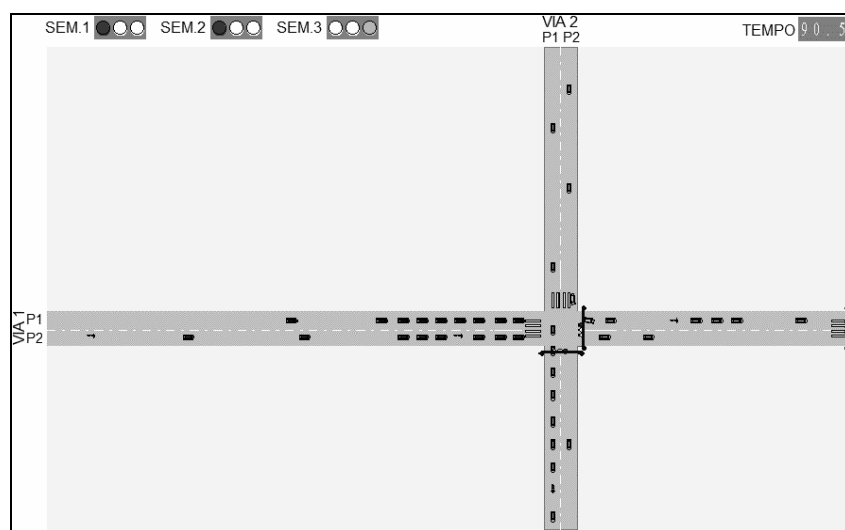


Figura 5: Instante de simulação do modelo em estado de trânsito congestionado com botão SA/SD habilitado.

Ao comparar as imagens das Figuras 4 e 5, nota-se que as filas e o número de veículos retidos no modelo de simulação diminuem com a habilitação do botão SA/SD. Isto mostra que a ativação dos sensores V11E, V11S, V12E e V12S influencia o fluxo de veículos na saída da via principal do modelo. Pois, as variáveis do modelo, integradas aos bits de memória do CLP, que representam os sensores, influenciam o reajuste do tempo de verde do semáforo 3 (SEM3) a fim de “desafogar” o trânsito no intervalo compreendido entre o semáforo 1 (SEM1) e o SEM3, conforme mostrado na Figura 5. Onde o sinalizador verde do SEM3 e o sinalizador vermelho do SEM 1 se encontram ativados. Lembrando que a via



principal do modelo de simulação é a Via 1, onde 56,8% dos veículos da pista 2 da Via 1 e 68,4% dos veículos da pista 2 da Via 2 saem do sistema pela Via 1. Logo, o tempo de permanência destes veículos no sistema sofre a influência do SEM3.

Também é importante ressaltar que para obter as animações das Figuras 4 e 5 foi ajustado junto ao ambiente de simulação o mesmo tamanho de ciclo de temporização para cada um dos cenários propostos. Isto é, uma rodada de 273 segundos, equivalente a 3 ciclos de temporização de 91 segundos (tamanho do ciclo dos semáforos). Bem como, os dados referentes ao comportamento das vias semaforizadas que servem de base para a análise dos resultados, decorrem de 20 replicações de 273 segundos de rodada cada. Aonde cada replicação é iniciada manualmente, fazendo com que o controle dos sinalizadores dos semáforos ocorra em tempo real.

#### 4.2 AVALIAÇÃO DA INTEGRAÇÃO

Os dados que servem de base para a avaliação da integração dos cenários propostos (oriundos de cada replicação e armazenados em tempo real em um arquivo do Excel), são:

- Média total de veículos que entram e saem do sistema;
- Média total de veículos que ficam retidos no sistema;
- Tempo médio total de atravessamento dos veículos.

A Tabela 3 mostra o comportamento do modelo de simulação durante o período de trânsito congestionado com o botão SA/SD desabilitado e habilitado.

Tabela 3. Comparação entre os estados de trânsito congestionado com botão SA/SD desabilitado e habilitado.

ESTADO DO BOTÃO SA/SD	MÉDIA TOTAL DE VEÍCULOS		TEMPO MÉDIO DE ATRAVESSAMENTO DOS VEÍCULOS (segundos)				MÉDIA DE AUTOMÓVEIS QUE FICAM RETIDOS NO SISTEMA			
	Entram no sistema	Saem do sistema	E11	E12	E21	E22	E11	E12	E21	E22
Desabilitado	358,2	288,1	30,46	28,99	29,39	57,06	8,11	11,77	9,04	17,37
Habilitado	358,5	313,3	28,53	28,0	29,49	30,79	7,51	11,65	9,31	9,05
Diferença	0,30	25,20	1,93	0,99	0,10	26,27	0,60	0,12	0,27	8,32

Na Tabela 3, nota-se que a quantidade de veículos que entram no sistema é praticamente a mesma com ou sem a habilitação do botão SA/SD. O que comprova a consistência do modelo de simulação a cerca do total de veículos que entram no sistema no período de 273 segundos de simulação. Porém, o mesmo paradigma de veículos que entram no sistema não se repete na quantidade de veículos que saem. De acordo com a Tabela 3, a média total de veículos que consegue sair do sistema, com os sensores de detecção de veículos desabilitados, é de 288. Enquanto com os sensores habilitados, cerca de 313 veículos saem do sistema. Isto é, com o botão SA/SD habilitado, cerca de 25 veículos a menos ficam retidos no sistema frente ao botão SA/SD desabilitado.

Com relação ao "tempo médio de atravessamento dos veículos" e a "média de automóveis que ficam retidos no sistema", a diferença entre as médias de veículos do tipo E11, E12 e E21 é irrisória quando comparada à dos veículos do tipo E22. Isto acontece porque os veículos mais afetados pelo estado de trânsito congestionado são os do tipo E22. Na Tabela 3, segundo o comportamento do trânsito com o botão SA/SD desabilitado, o tempo médio de atravessamento de um veículo do tipo E22 é de 57,06 segundos. Enquanto que a média de automóveis retidos no sistema é de 17,37 veículos.

Estes valores elevados de tempo de atravessamento e de veículos do tipo E22 retidos no sistema ocorrem devido ao tempo de verde ajustado no semáforo SEM3, localizado na

saída da Via1. Pois, 64,8% dos veículos do tipo E22 convertem para a Via 1 quando o sinalizador verde do semáforo SEM2, instalado no cruzamento da Via 1 com a Via 2, fica habilitado. Como o sinalizador vermelho do SEM 3 também fica habilitado quando o sinalizador verde do SEM 2 está habilitado, a maior parte dos veículos do tipo E22 avançam para a Via 1 e ficam retidos no trecho compreendido entre os semáforos SEM1 e SEM3. O que acaba influenciando o surgimento do congestionamento no pós-semáforo da Via 1.

A Figura 6 mostra o trecho compreendido entre o cruzamento semaforizado (local de instalação de SEM1 e SEM2) e o SEM3. Lembrando que a Figura 6 representa o trânsito do modelo no estado congestionado, com o sensor SA/SD desabilitado.

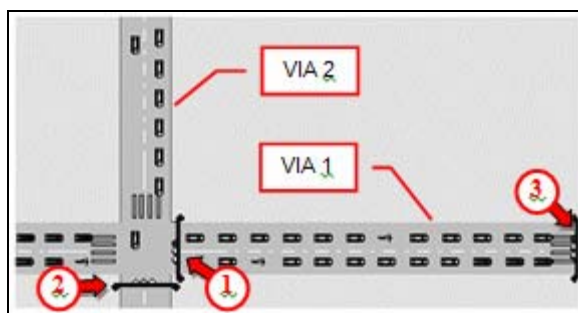


Figura 6: Trecho compreendido entre o cruzamento semaforizado e o semáforo 3 do modelo computacional: (1) SEM1, (2) SEM2, (3) SEM3.

Na Figura 6 a via horizontal equivale a Via 1 e a via vertical, a Via 2. Assim, é possível entender porque veículos do tipo E22 tendem a ficar mais retidos a cada novo ciclo de temporização. Conforme explicado, a maior parte dos veículos do tipo E22 convertem para a Via 1 quando o sinalizador verde do SEM 2 se encontra acionado. Todavia, as pistas da Via 1, compreendidas entre os itens 1 e 3 da Figura 6, comportam no máximo 12 veículos cada uma. Com isso, o excedente de veículos do tipo E22 (os seis veículos localizados à direita, na via vertical), tem que esperar o próximo ciclo de verde do SEM 2 para converter para a Via 1.

Com a habilitação do botão SA/SD, resolve-se o problema do excedente de veículos da Via 2. Pois, os sensores detectores de veículos instalados entre SEM 1 e SEM 3 ajustam automaticamente no CLP o tempo de verde do SEM 3 quando o número de veículos é maior ou igual a 8. Por isso, conforme a Tabela 3, mais automóveis conseguem sair do sistema (25,2 veículos). Bem como o tempo de atravessamento dos veículos do tipo E22 cai de 57,06 para 30,79 segundos. Do mesmo modo, a média de automóveis retidos desce de 17,37 para 9,05 veículos. Uma diferença de 8,32 veículos de média.

O gráfico da Figura 7 também mostra, durante 273 segundos de simulação de trânsito congestionado, a influência dos sensores de detecção de veículos junto aos veículos do tipo E22, quando o botão SA/SD está desabilitado ou habilitado.

Quando o botão SA/SD encontra-se desabilitado, a retenção de veículos no sistema computacional tende a aumentar a cada novo ciclo de temporização, conforme pode ser visto nos finais dos ciclos 1 (21 a 24 veículos), 2 (30 a 33 veículos) e 3 (39 veículos). No entanto, quando o botão SA/SD encontra-se habilitado, retêm-se menos veículos e o padrão de detenção de veículos do tipo E22, ao final de cada ciclo, tende a ser o mesmo.

No final do ciclo 1, como pode ser visto no instante 91 segundos da Figura 7, a quantidade de veículos do tipo E22 retidos fica em torno de 3 a 6 veículos. No final do ciclo 2 (182 segundos), repete-se a mesma quantidade de veículos retida no primeiro ciclo, ou seja, 3 a 6 veículos. E no final do último ciclo (273 segundos), o mesmo paradigma observado nos ciclos anteriores se mantém, isto é, 3 a 6 veículos retidos. Portanto, conclui-se que a habilitação dos sensores de detecção de veículos permite melhorar o fluxo de veículos do modelo de simulação quando o trânsito se encontra congestionado.

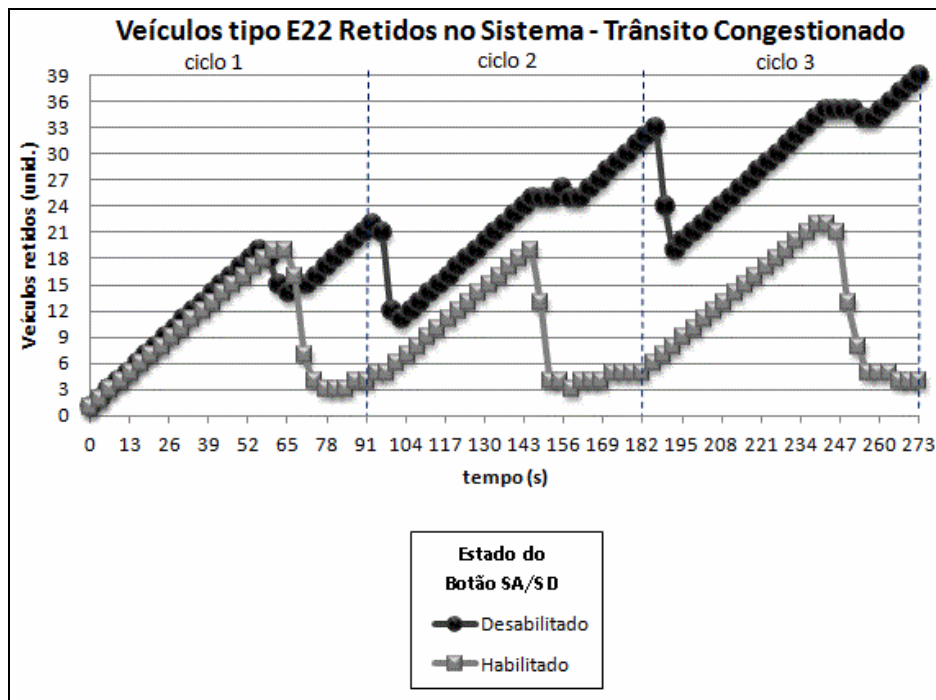


Figura 7: Comparativo entre o número de veículos do tipo E22 retidos no sistema com o botão SA/SD desabilitado e habilitado.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, através da integração entre um modelo de SED e um sistema de controle automático foi possível acompanhar em tempo real o comportamento do fluxo veicular de um cruzamento semaforizado hipotético segundo um estado de trânsito especificado.

Foi possível analisar o comportamento do fluxo veicular no cruzamento semaforizado, conforme a habilitação e a desabilitação dos sensores de detecção de veículos, instalados entre os semáforos do modelo computacional. Assim, pôde-se comparar o comportamento do trânsito com os sensores habilitados e desabilitados. Isto influenciou o tamanho das filas dos veículos junto a um dos semáforos e, conseqüentemente, o tráfego no cruzamento.

Desta forma, criou-se um ambiente virtual em computador semelhante a um sistema viário real, com a vantagem de se poder coletar em tempo real os dados oriundos da integração entre o modelo de simulação e o CLP. Além disso, através de tabelas e gráficos, criados a partir dos dados coletados do modelo, constatou-se que o sistema atendeu aos diferentes estímulos de tempo entre chegadas de veículos em cada uma das vias e aos comandos de advindos do CLP.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo suporte financeiro para esta pesquisa.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BAPTISTA, R. C. T. ; RANGEL, J. J. A. . Simulação a Eventos Discretos de uma Via Semaforizada com Controle Automatizado em Tempo Real. **Revista Produção Online**, v. 13, p. 290-317, 2013.
- [2] WYSK, R. A.; PETERS, B. A. and SMITH, J. S. A Formal Process Planning Schema for Shop Floor Control. **Engineering Design and Automation Journal**, Vol. 1, N° 1, pp. 3-19, 1995.
- [3] DOUGALL, D. J. Applications and benefits of real-time I/O simulation for PLC and PC control systems. **ISA Transactions**. Vol. 36. N° 4, pp. 305-311, 1998.
- [4] AUINGER, F.; VORDEWINKLER, M. and BUCHTELA, G. Interface drive domain-independent modeling architecture for “soft-comissioning” and “reality in the loop”. **Winter Simulation Conference**, Phoenix, Arizona, USA, pp. 798-805, 1999.
- [5] CHWIF, L. Utilizando a Simulação de Eventos Discretos em Projetos de Sistemas Automatizados de Manufatura. Anais do 10º Congresso e Exposição Internacioal de Automação, **CONAI**, São Paulo, SP, 2002.
- [6] BULLOCK, D.; JOHNSON, B.; WELLS, R. B.; KYTE, M. and LI, Z. Hardware-in-the-loop Simulation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.12, N°. 1, pp. 73-89, 2004.
- [7] INUKAY, T.; HIBINO, H.; FUKUDA, Y. Simulation Environment Synchronizing Real Equipment for Manufacturing Cell - J. **Adv. Mec. Design, Systems and Manufacturing**, Vol.1, N° 2, pp. 238-249, 2007.
- [8] SMITH, J. S. and CHO, Y. Offline commissioning of a PLC-based Control System using Arena. In: **Winter Simulation Conference**, Miami, FL, USA. pp. 1802-1810, 2008.
- [9] BASTOS, P. J. T.; JÚNIOR, E. C.; CARDOSO, L. DAS D.; RANGEL, J. J. DE A. and TAVARES, L. O. Simulação a eventos discretos para comissionamento de sistemas de controle. **Anais do XVII Simpósio de Engenharia de Produção**, SIMPEP, Bauru, SP, 2010.
- [10] RANGEL, J. J. A. ; SOUZA, A. A. ; BASTOS, P. J. T. and BAPTISTA, R. C. T. Simulação a Eventos Discretos para Treinamento em Sistemas de Controle. **Revista Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, Vol. 4, pp. 97-111, 2012.
- [11] ROCK, S. Hardware in the loop simulation of production systems dynamics. *Production Engineering - Research and Development*, Vol. 5, N° 3, pp. 329-337, 2011.
- [12] BAPTISTA, R. C. T and RANGEL, J.J.A. Modelo de Simulação para Análise de Desempenho de um Cruzamento Viário Semaforizado. **VII Encontro Mineiro de Engenharia de Produção**, EMEPRO, São João del-Rei, MG, 2011.
- [13] MONTEVECHI, J. A. B.; SILVA, A. L. F.; LEAL, F.; PINHO, A. F.; COSTA, R. F. DA S. and OLIVEIRA, M. L. M. Conceptual Modeling in Simulation Projects by Mean Adapted IDEF: An Application in a Brazilian Tech Company. **Winter Simulation Conference**, Baltimore, MD, USA, pp. 1624-1635, 2010.
- [14] KELTON, D.W.; SADOWSKI, R. P. AND STURROCK, D.T. **Simulation With Arena**. Mc Graw Hill, New York, 2007.
- [15] BANKS, J. Simulation in the future. **Winter Simulation Conference**, Orlando, USA. P. 1568-1576, 2000.