

SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS DE UMA VIA SEMAFORIZADA COM CONTROLE AUTOMATIZADO EM TEMPO REAL¹

DISCRETE EVENTS SIMULATION OF A ROUTE WITH TRAFFIC LIGHTS THROUGH AUTOMATED CONTROL IN REAL TIME

Rodrigo César Teixeira Baptista* E-mail: rbaptista@iff.edu.br

João José de Assis Rangel* E-mail: joao@ucam-campos.br

*Universidade Candido Mendes, Campos dos Goytacazes, RJ

Resumo: Este trabalho apresenta a integração e comunicação em tempo real de um modelo de simulação a eventos discretos com um sistema de controle automático. O modelo de simulação de um cruzamento com vias semaforizadas foi construído no ambiente Arena. A integração e a comunicação foram feitas via rede e o sistema de controle foi operado por um controlador lógico programável. Foram simulados cenários para as situações de trânsito livre, regular e congestionado. Os resultados apresentaram a média total de veículos que entraram no sistema e que ficaram retidos e também o tempo médio total de passagem dos veículos na via. De uma forma geral, o modelo permitiu avaliar o comportamento do trânsito em cada uma das vias e os comandos oriundos do controlador para ativação e desativação dos semáforos.

Palavras-chave: Simulação. Controle Automático. Trânsito.

Abstract: This paper presents the integration and communication in real-time of a discrete event simulation model with an automatic control system. The simulation model of an intersection with roads having traffic lights was built in the Arena environment. The integration and communication have been made via network, and the control system was operated by a programmable logic controller. Scenarios were simulated for the free, regular and congested traffic situations. The results showed the average number of vehicles that entered in the system and that were retained and also the total average time of the crossing of the vehicles on the road. In general, the model allowed evaluating the behavior of the traffic in each of the ways and the commands from the controller to activation and deactivation of the traffic lights.

Keywords: Simulation. Automatic Control. Transit.

1 INTRODUÇÃO

Estudos abordando a integração e comunicação entre simulação e sistema de controle automático existem desde o início da década de 90, como os trabalhos de Smith et al. (1994), Wysk et al. (1995), Davis et al. (1996), Dougall (1998) e Auinger et al. (1999). Mais recentes, trabalhos como os de Chwif (2002), Bullock et al. (2004), Inukay (2007), Smith e Cho (2008), Bubicz e Sellitto (2009), Oliveira, Sabbadini e Chamowitz (2009), Koflanovich e Hartman (2010) e Rangel et al. (2012) continuam

investigando tal aplicação, e buscando compreender melhor os aspectos construtivos e operacionais.

Segundo Rock (2011), a integração entre simulação discreta e sistema de controle permite considerar não só o comportamento dinâmico e estocástico do ambiente real simulado, mas também a tecnologia aplicada no sistema de controle. Em um estudo integrado, o ambiente real (aquele que se pretende controlar) pode ser representado por um modelo de simulação, com comportamento similar ao de um sistema real. Assim, um teste de um controlador lógico programável (CLP) pode ser efetuado, considerando os efeitos de tempo de execução, sem que o ambiente real seja utilizado. Com isso, conforme Zhang (2010), podem-se avaliar as melhores condições operacionais de um sistema sem que os instrumentos do processo sejam manipulados. Tal abordagem pode reduzir custos e riscos, além de poder reutilizar um modelo de simulação previamente construído para uma análise de cenários de um determinado sistema.

Ressalta-se que a técnica de integração analisada neste trabalho pode servir de base para o estudo e treinamento de controle automático da produção nos diferentes tipos de indústria. Conforme estudo de Vanderlei et al. (2009) e Lied e Sellitto (2009), esta abordagem também contribui para a análise em sistemas de controle, podendo auxiliar na tomada de decisão e no tratamento de dados de produção oriundos do chão de fábrica. Com este ponto de vista, o modelo de simulação pode tratar basicamente de três elementos em uma análise. Primeiro, a via, que se assemelha a uma esteira, movimentando todos os carros com igual velocidade do começo ao fim do segmento. Segundo, o cruzamento, que se assemelha a um nó onde os carros são distribuídos de acordo com a operação dos semáforos. Terceiro, o carro, que é a entidade que flui dinamicamente pelo modelo.

Rangel e Júnior (2011) destacam ainda que os ambientes de simulação a eventos discretos (SED) são fáceis de programar e apresentam uma série de recursos, onde o modelo de simulação pode ser elaborado de forma rápida e com alto grau de detalhes do sistema abordado. Por outro lado, desenvolver um modelo de simulação com uma linguagem de propósito geral demanda tempo e programadores experientes.

Portanto, o objetivo deste trabalho é integrar e comunicar via rede um modelo de SED de duas vias semaforizadas a um sistema de controle automático operado

em tempo real por um CLP. A construção de tal ambiente permite avaliar o funcionamento automatizado do sistema dinâmico composto pelo fluxo de veículos nas vias, onde a regra operacional de acionamento dos semáforos pode ser testada.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição do Sistema

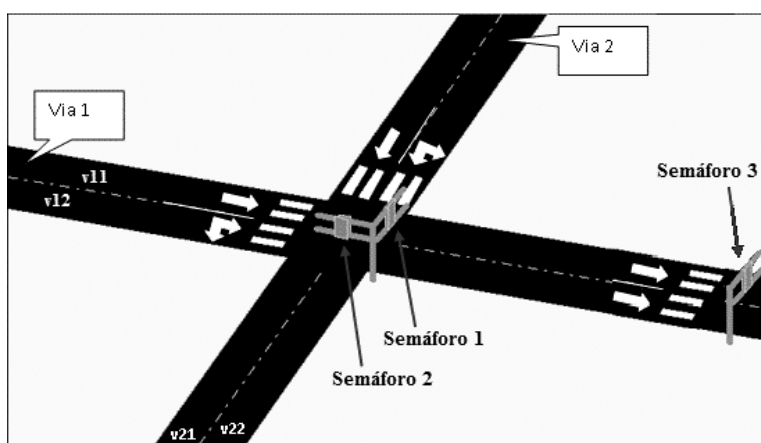
O sistema computacional desenvolvido neste trabalho é hipotético e teve como base os dados utilizados por Baptista e Rangel (2011). Os autores desenvolveram um modelo de simulação para estudar o comportamento do fluxo de veículos de um cruzamento viário. A partir deste modelo, foram realizados ajustes nos tempos verde, amarelo e vermelho dos semáforos instalados nas vias do cruzamento simulado. Os elementos da modelagem são os seguintes:

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

A Figura 1 mostra um esboço detalhado do ambiente de simulação das Vias 1 e 2 do cruzamento semaforizado, onde são aplicados os dados coletados. São três semáforos, dois instalados na Via 1 (Semáforos 1 e 3) e um na Via 2 (Semáforo 2). As duas vias são de mão única, com duas pistas cada. Assim, ao se aproximarem da interseção semaforizada, os veículos das Vias 1 e 2 podem ser conduzidos da seguinte forma:

- Se o motorista da Via 1 desejar se manter nesta mesma Via, ele deve manter/conduzir o automóvel sobre a pista da esquerda, aqui definida como v11, ou sobre a pista da direita, aqui definida como v12;
- quando o motorista da Via 1 desejar converter para a Via 2, ele deve manter/conduzir o automóvel sobre a pista v12;
- se o motorista que está na Via 2 desejar se manter nesta mesma Via, ele deve manter/conduzir o automóvel sobre a pista da direita, aqui definida como v21, ou sobre a pista da esquerda, definida como v22; e
- quando o motorista da Via 2 desejar converter para a Via 1, ele deve manter/conduzir o automóvel sobre a pista v22.

Figura 1 – Esboço detalhado das Vias 1 e 2

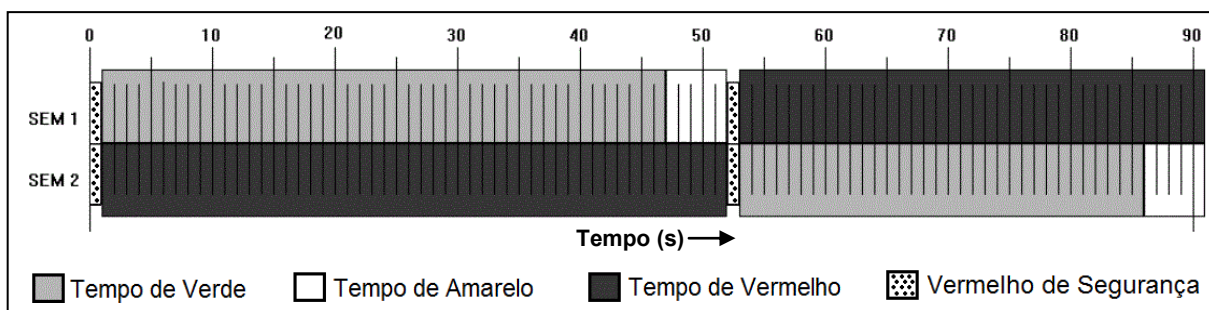


Fonte: Elaborado pelos autores

2.1.1 Ciclo de temporização dos semáforos

No que tange à interseção semaforizada (Figura 1), a sincronização dos semáforos das Vias 1 e 2 segue um padrão que se baseia em um ciclo de temporização de 91 segundos cada. A Figura 2 mostra então o período do ciclo de temporização dos semáforos das Vias 1 e 2.

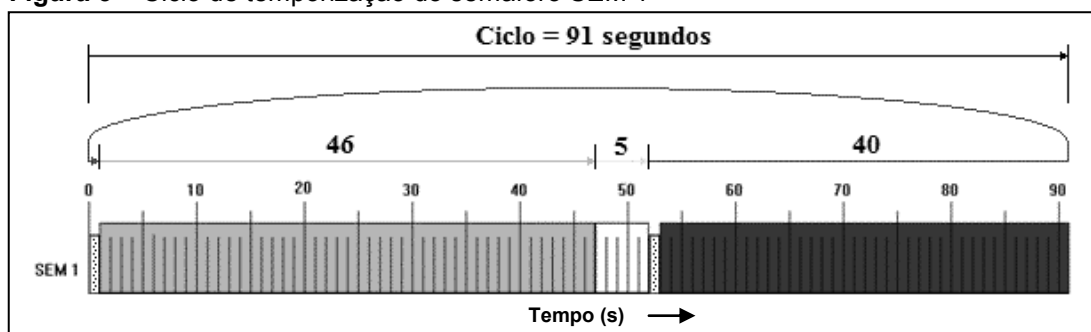
Figura 2 – Ciclo de temporização dos semáforos SEM 1 e SEM 2



Fonte: Elaborado pelos autores

As colorações em tom de cinza médio, branco e cinza escuro (Figura 2) indicam, respectivamente, os períodos de ativação dos sinalizadores verde, amarelo e vermelho de cada semáforo. Os períodos hachurados indicam os pontos de transição entre a ativação do sinalizador verde de um semáforo e a ativação do sinalizador vermelho do outro semáforo. Esses pontos de transição são conhecidos como vermelho de segurança. A Figura 3 mostra em detalhe o período do SEM 1.

Figura 3 – Ciclo de temporização do semáforo SEM 1



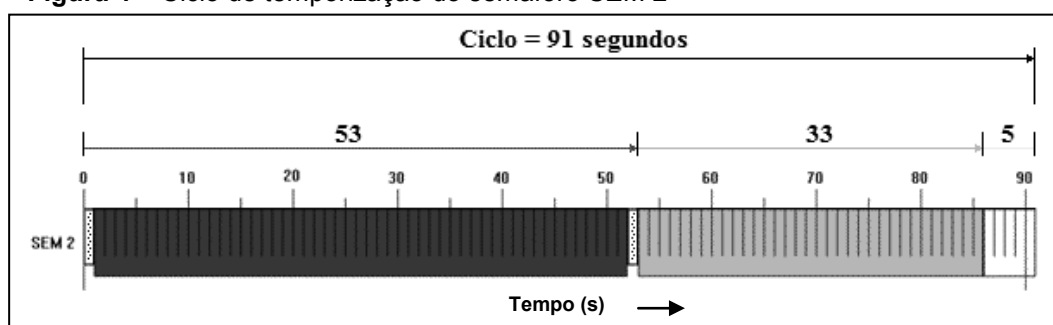
Fonte: Elaborado pelos autores

Constata-se que os tempos de verde, amarelo e vermelho dos sinalizadores luminosos do SEM 1 são, respectivamente, iguais a 46 segundos, 5 segundos e 40 segundos, sendo os dois segundos de vermelho de segurança parte integrante do tempo de vermelho do SEM 1. O resultado do somatório dos tempos de verde, amarelo e vermelho corresponde ao tamanho do ciclo do SEM 1, neste caso, 91 segundos.

Em relação à lógica de temporização do SEM 3, localizado na saída da Via 1 os tempos de verde, amarelo e vermelho, assim como seu ciclo de temporização, seguem a mesma configuração adotada no SEM 1. Porém, caso o tamanho da fila de automóveis seja superior ao comportado pelo trecho compreendido entre SEM 1 e SEM 3, automaticamente, o tempo de verde do SEM 3 será aumentado. Isto será possível devido aos sensores de presença que estão instalados junto às pistas 1 e 2 da Via 1 no trecho mencionado. Com isso, será possível desobstruir, automaticamente, o trânsito de veículos no pós-semáforo, principalmente, no horário de congestionamento.

Assim, seguindo o mesmo raciocínio de interpretação do ciclo de temporização do SEM 1, tem-se a lógica do ciclo do SEM 2, mostrado na Figura 4. Observa-se que os tempos de vermelho, amarelo e verde dos sinalizadores luminosos do semáforo SEM 2 são, respectivamente, iguais a 53 segundos, 5 segundos e 33 segundos. Portanto, tal como ocorrera no ciclo do SEM 1, os dois segundos de vermelho de segurança também estão incluídos no tempo de vermelho do SEM 2. O resultado do somatório dos tempos de vermelho, amarelo e verde do SEM 2 é igual ao tamanho do ciclo do SEM 1, isto é, 91 segundos.

Figura 4 – Ciclo de temporização do semáforo SEM 2



Fonte: Elaborado pelos autores

2.1.2 Tempo entre chegada (TEC) de veículos em cada via

Para representar as funções correspondentes às variáveis TEC 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. As funções de TEC foram retiradas dos estudos de Baptista e Rangel (2011), onde o modelo de simulação também possui duas vias e quatro pistas.

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 | $6.7 + \text{WEIB}(1.78, 1.96)$ |

Fonte: Elaborado pelos autores

A fim de considerar maior realismo ao modelo de simulação, são propostos quatro tipos de veículos, isto é, ônibus, caminhão, automóvel de passeio e motocicleta. Com isso, também é levada em consideração a possibilidade de os automóveis reverterem em direção à pista adjacente, isto é, mudar de faixa. Deste modo, os automóveis oriundos de cada via poderão reverter para a pista adjacente ou permanecer na mesma faixa, sendo a pista v11 adjacente à pista v12 e a pista v21 adjacente à pista v22.

2.1.3 Demanda de automóveis por via após semáforo

Os dados originais obtidos em Baptista e Rangel (2011) foram ajustados ao modelo de simulação para simbolizar a demanda de automóveis por via, isto é, para representar o caminho que o automóvel seguirá assim que o sinalizador verde do semáforo for ativado. Este resultado é apresentado 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 |

Fonte: Elaborado pelos autores

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 onde se encontravam antes de cruzar a interseção. Porém, os outros 42,2% saem do sistema pela outra via, a Via 2 (V2). Na pista 2 (v22) da Via 2, 68,4% dos automóveis que atravessam o cruzamento semaforizado saem do sistema pela Via 1 e apenas 31,6% saem do sistema por aquela Via. O veículo que atravessa o cruzamento pela pista 1 (v11) da Via 1 ou pela pista 1 (v21) da Via 2 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 semaforizada) ou reverter para a outra via. Isto é, um automóvel que se encontra na pista v12 da Via 1 pode continuar sua trajetória seguindo por esta via até o pós-semáforo da interseção da Via 1 com a Via 2 ou reverter para uma das duas pistas da Via 2 (v21 ou v22). Assim como um automóvel que se encontra na pista v22 da Via 2 pode continuar sua trajetória seguindo por esta via até o pós-semáforo da Via 2 com a Via 1 ou reverter para uma das duas pistas da Via 1 (v11 ou v12).

Portanto, observa-se que os veículos que entram no sistema pelas pistas 1 ou 2 das Vias 1 e 2 podem sair ou não do mesmo pelas suas respectivas Vias. Com isso, prima-se à aleatoriedade característica de um trânsito urbano.

2.2 Ambiente de Simulação da Via Semaforizada

O modelo de simulação foi desenvolvido orientado pela metodologia proposta por Banks et al. (2009), seguindo os seguintes passos específicos para este trabalho. São eles: formulação e análise do problema; planejamento do projeto; modelo conceitual; tradução do modelo conceitual; verificação e validação; experimentação; interpretação e análise de resultados; documentação e apresentação dos resultados testes.

O modelo conceitual do sistema foi traduzido para o software Arena[®]12 para construção do modelo de simulação (KELTON, SADOWSKI e STURROCK, 2007). As simulações somente foram iniciadas após a verificação e validação por completo do modelo, garantindo que os pressupostos e as hipóteses estavam corretamente implementados no modelo computacional (SARGENT, 2007).

2.2.1 Modelo conceitual

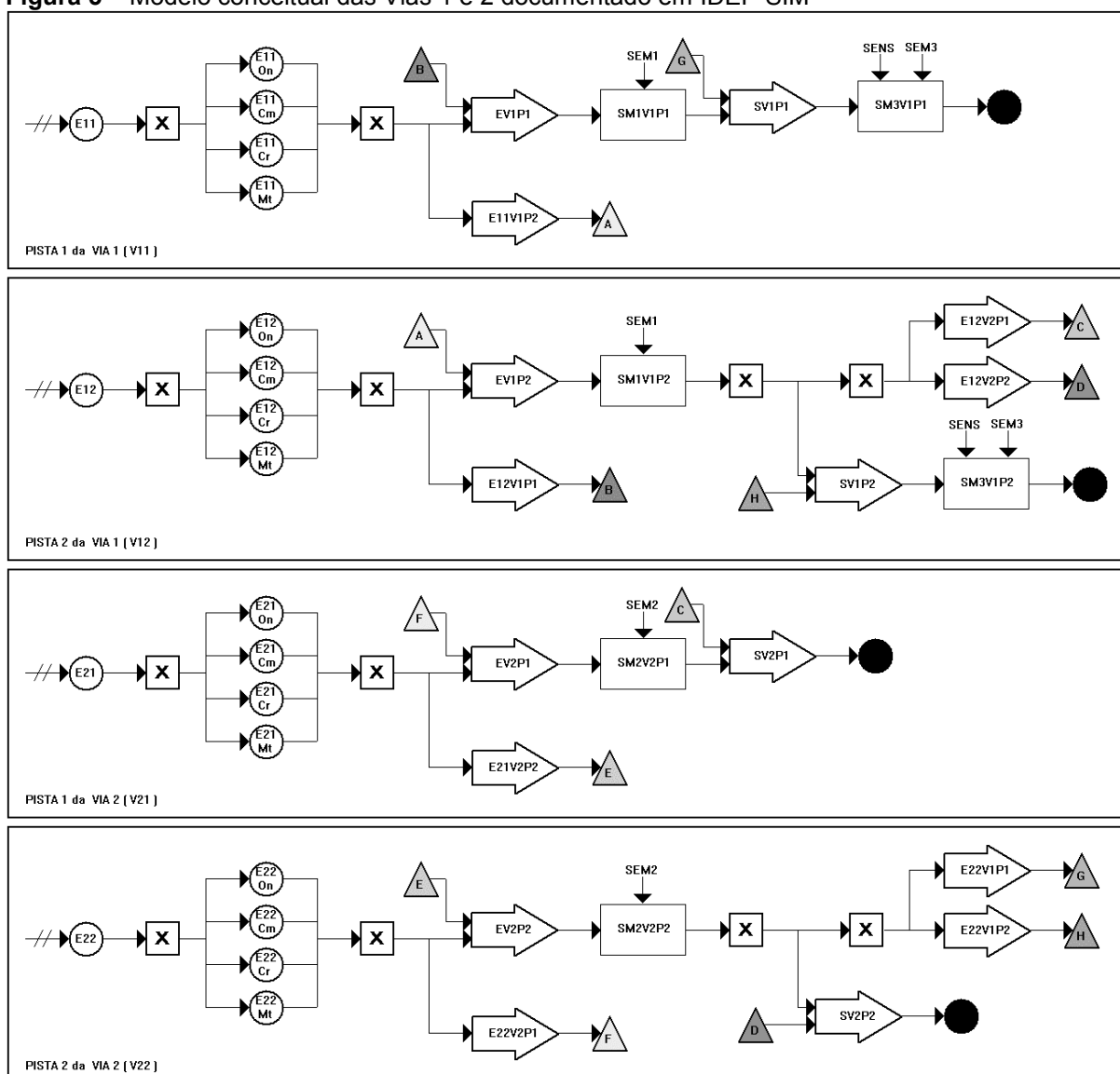
A fim de agilizar e minimizar os erros junto à elaboração do modelo de simulação, foi elaborado, a priori, um modelo conceitual segundo a técnica IDEF-SIM. Conforme ressaltado por Montevechi et al. (2010), o IDEF-SIM é uma técnica que permite a documentação de modelos computacionais independente de software de simulação. Assim, torna-se possível alcançar maior qualidade aos modelos de simulação e reduzir o tempo de elaboração dos mesmos.

A Figura 5 representa o modelo conceitual das vias semaforizadas deste trabalho (Via 1 e Via 2) em IDEF-SIM. O modelo conceitual está dividido em quatro partes: Pista 1 da Via 1 (V11), Pista 2 da Via 1 (V12), Pista 1 da Via 2 (V21) e Pista 2 da Via 2 (V22). Cada uma destas partes representa a programação correspondente ao caminho que cada tipo de entidade (veículo) pode seguir assim que entra em uma das pistas do sistema semaforizado. Logo, cada parte é responsável pela origem de um único tipo de entidade. Isto é, uma entidade do tipo E11 entra no sistema computacional somente por meio de V11, uma entidade do

tipo E12 somente por meio de V12, uma entidade do tipo E21 somente por meio de V21 e uma entidade do tipo E22 somente por meio de V22.

Cabe lembrar que cada Via é composta por duas pistas (ou partes) onde há dois semáforos instalados na Via 1, um no cruzamento com a Via 2 (SEM 1) e outro na saída daquela via (SEM 3). E na Via 2 há apenas um semáforo (SEM 2) instalado no cruzamento com a Via 1. Para maiores detalhes, a descrição de todos os itens destacados no modelo conceitual (Figura 5) encontra-se no Apêndice 1.

Figura 5 – Modelo conceitual das Vias 1 e 2 documentado em IDEF-SIM



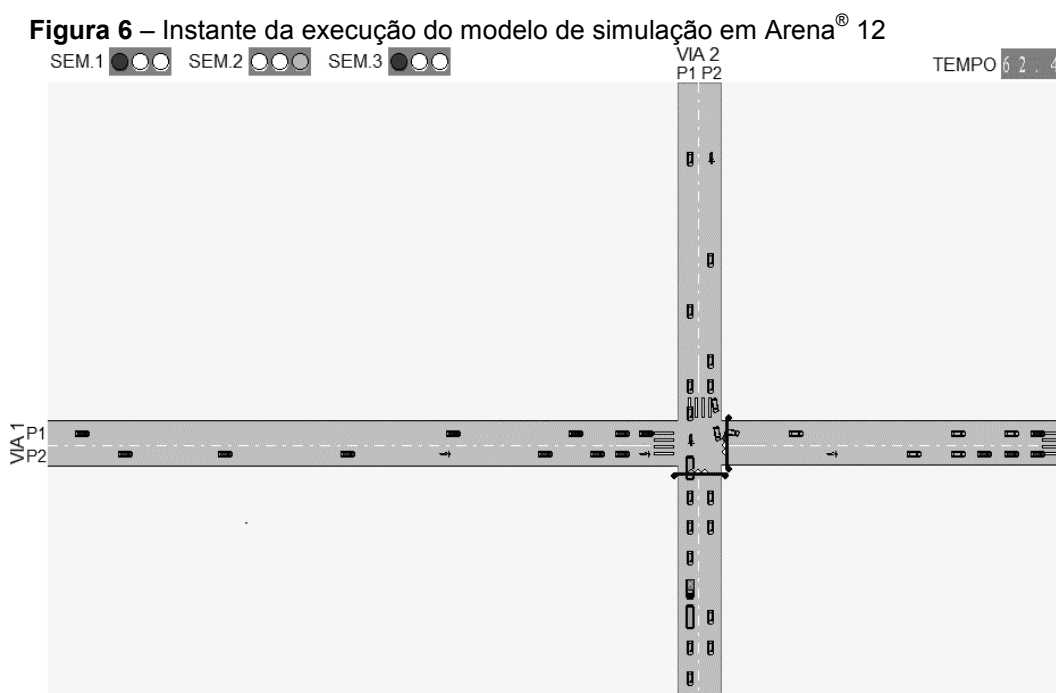
Fonte: Elaborado pelos autores

2.2.2 Modelo de simulação

A Figura 6 mostra um instante durante a execução do modelo de simulação. Observe as vias e o fluxo de veículos que trafegam nas mesmas.

A execução do modelo ocorre em sincronia com a lógica de controle instalada no CLP. Assim, para que a comunicação entre o modelo computacional e o software do CLP ocorra em tempo real, é necessário configurar junto ao ambiente de simulação, na janela “*Run Setup*” (aba “*Run Speed*”), os seguintes itens:

- *Animation Speed Factor (Time Units Per Frame)*;
- selecionar o item “*Adjust Animation Speed Factor When Changing View*”;
- *Animation Frame Delay (Seconds per Frame)*.



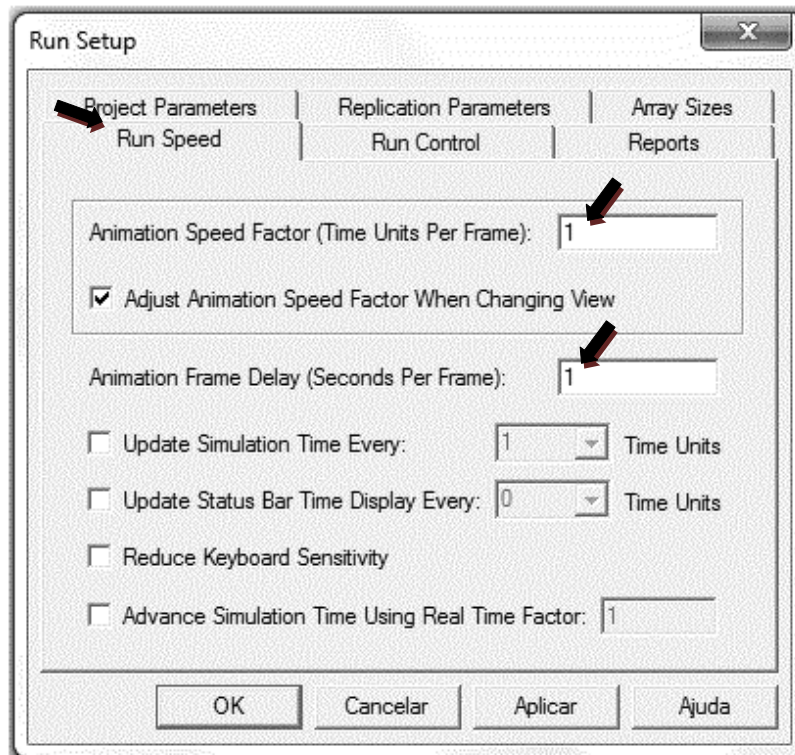
Fonte: Elaborado pelos autores

A Figura 7 mostra a aba “*Run Speed*” da janela “*Run Setup*” do software de simulação com os itens já configurados.

No que tange ao tempo de simulação, foi adotado um tamanho de 273 segundos para cada rodada de simulação. Isto é, cada situação de trânsito simulada tem aproximadamente 5 minutos de simulação. A máquina utilizada para executar o modelo apresenta a seguinte configuração:

- Processador: AMD Athlon(tm) 64 X2 Dual Core Processor 4200+, 2.20 GHz;
- memória: 1,93 GB de RAM (DDR2); e
- placa de Vídeo: NVIDIA Quadro NVS 210S.

Figura 7 – Configuração do “Run Speed” junto ao “Run Setup” do software Arena® 12.0



Fonte: Elaborado pelos autores

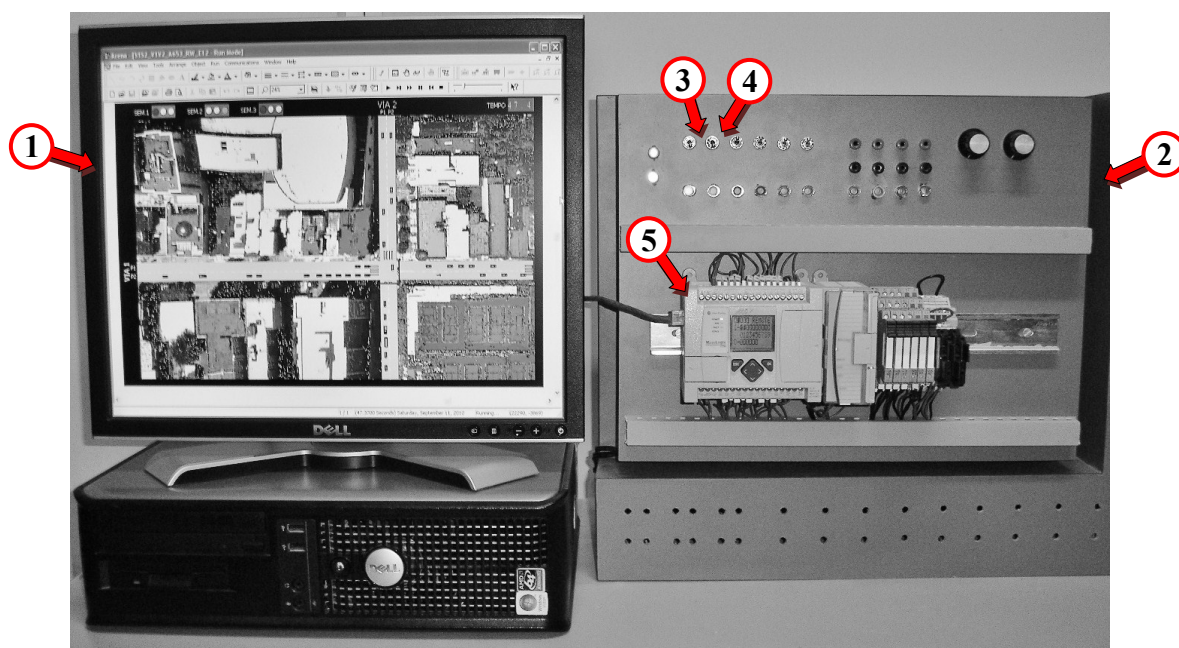
2.3 Sistema de Controle e Lógica de Controle para o Problema

Conforme Ogata (2003), um sistema de controle consiste em componentes interligados entre si com o objetivo de alcançar um propósito desejado. Assim, o sistema de controle utilizado para comandar os semáforos do modelo de simulação é composto pelos seguintes dispositivos:

- Botão L/D;
- botão SA/SD;
- quatro sensores de detecção de automóveis;
- três semáforos (cada um com três sinalizadores luminosos); e
- um controlador lógico programável (CLP).

A Figura 8 mostra, então, o modelo de simulação (1), o painel de controle (2) e a localização dos dispositivos instalados junto ao painel, isto é, o botão L/D (3), o botão SA/SD (4) e o CLP (5). Observe em (1) o detalhe da parte superior dos prédios do trecho urbano e as vias de passagem de veículos do modelo.

Figura 8 – Ambiente de teste. Modelo de simulação (1), painel de controle (2) e localização dos dispositivos instalados junto ao painel de controle: (3) botão L/D, (4) botão SA/SD, (5) CLP



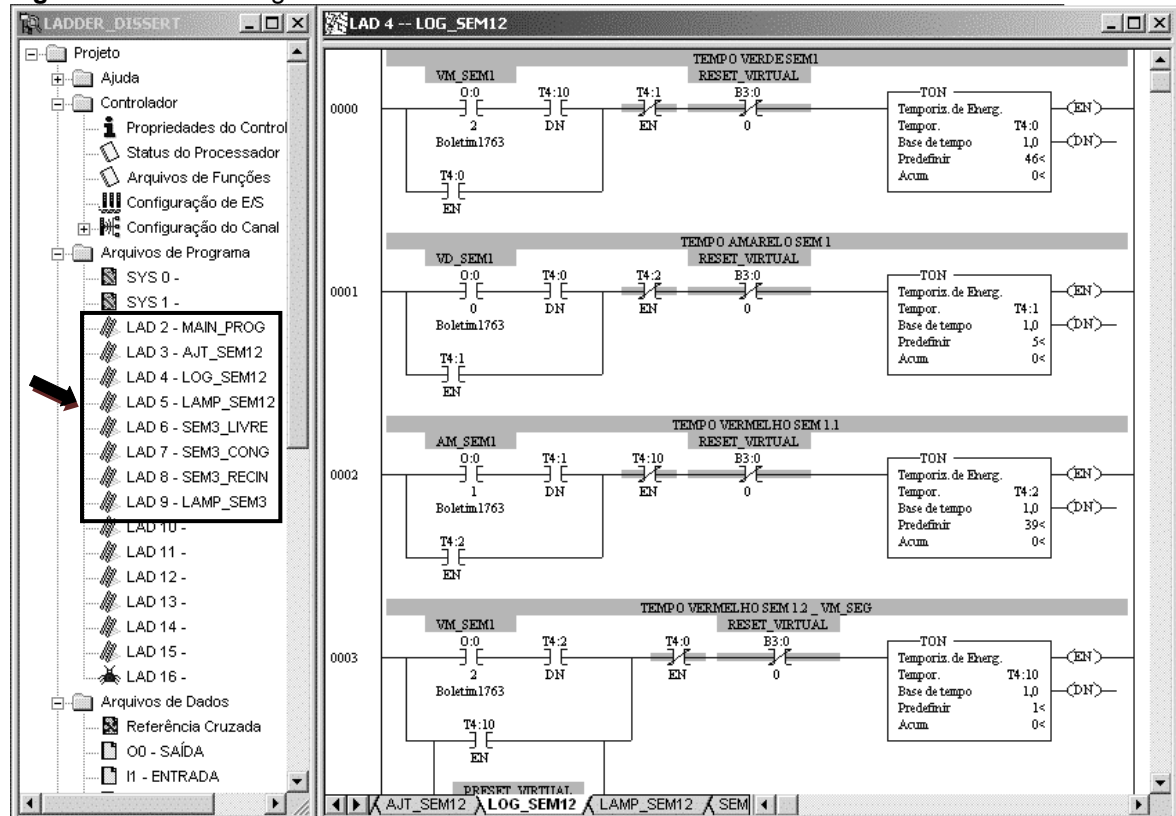
Fonte: Elaborado pelos autores

O botão L/D é uma botoeira elétrica que corresponde ao elemento que ativa ou desativa 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 liga/desliga se encontra 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 (Figura 8) é uma botoeira tipo trava, cuja função é habilitar ou desabilitar a linha de alimentação dos temporizadores intermediários do semáforo 3. 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 semáforo 1. É importante ressaltar que, neste trabalho, o instante de acionamento dos sinalizadores luminosos verde, amarelo e vermelho dos SEM1 e SEM3 serão os

mesmos. 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 9 mostra parte de uma página de programação da lógica de controle, instalada no CLP, responsável pela sincronia entre os semáforos do cruzamento semaforizado, SEM1 e SEM2.

Figura 9 – Parte da lógica do sistema de controle instalada no CLP



Fonte: Elaborado pelos autores

A lógica de controle completa está dividida em oito páginas de programação (LAD 2, LAD 3, LAD 4, ..., LAD 9), conforme indicado na janela da esquerda (LADDER DISSERT) (Figura 9). O conteúdo das outras páginas de programação é semelhante ao descrito acima.

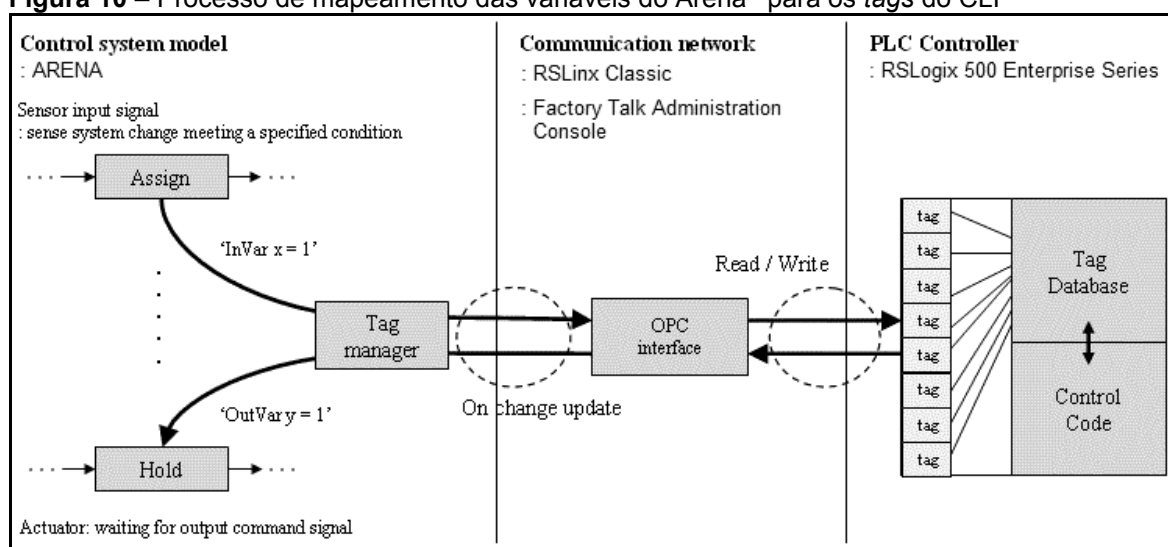
2.4 Integração entre Modelo de Simulação e Sistema de Controle

Para integrar e comunicar o modelo de simulação com o sistema de controle, foram seguidos os passos propostos por Bastos et al. (2010). Assim, para que a integração entre o CLP e o modelo de simulação seja possível, são necessários basicamente cinco softwares:

- Ambiente de simulação Arena®;
- *RSLogix 500 Enterprise Series* (para a programação da lógica no CLP);
- *RSLinx Classic* (para a comunicação entre aplicativos *Rockwell Software*);
- *Factory Talk Administration Console* (para criar um servidor de dados OPC); e
- *Boot-DHCP* (para renomear o IP do CLP).

Na Figura 10, pode ser visto o método de conexão do modelo computacional com o CLP, que é denominado mapeamento.

Figura 10 – Processo de mapeamento das variáveis do Arena® para os *tags* do CLP



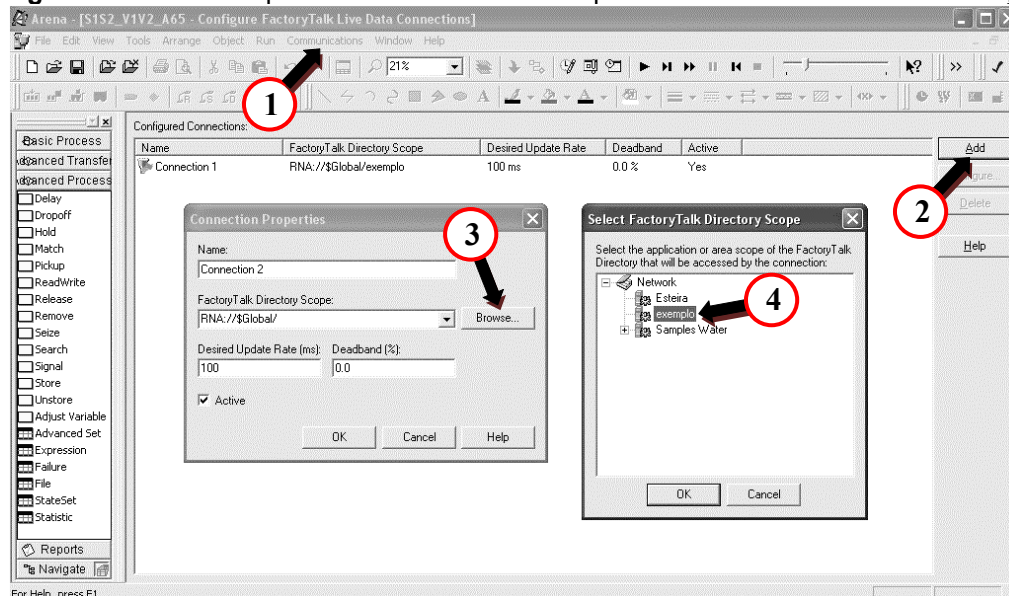
Fonte: SMITH e CHO (2008)

Para que o mapeamento ocorra, é necessário criar-se uma conexão que permita acessar os dados registrados no servidor OPC, gerado a partir do software *Factory Talk Administration Console*. A Figura 11 apresenta os elementos do ambiente Arena® necessários à construção da respectiva conexão. 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 os *tags* da lógica de controle do CLP. Esses *tags* definidos no software de programação do CLP fazem referência aos I/O (Inputs/Outputs) localizados na memória deste controlador.

Na Figura 12, pode-se verificar que cada variável do modelo de simulação é integrada a um *tag* da programação do CLP, fazendo com que as informações sejam trocadas por ambos os softwares. Isto permite ao CLP controlar os sinalizadores dos semáforos do modelo de simulação, como se fosse um sistema real. Observa-se então o exemplo da integração de uma variável do Arena® com um canal de I/O do

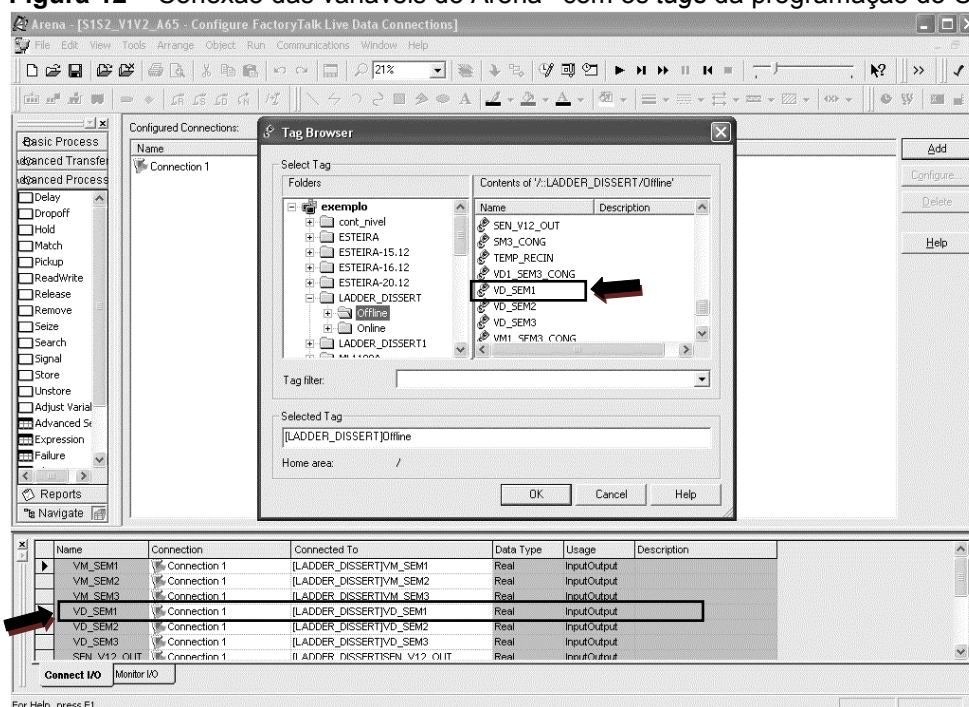
CLP. A variável do Arena® “VD_SEM1”, por exemplo, é conectada através do canal específico *Connection 1* ao endereço de memória do CLP (também identificada como “VD_SEM1”), que representa o ponto de I/O do CLP correspondente à saída do sinalizador luminoso verde do SEM1 no sistema real. Com isso, após a construção do modelo de simulação em ambiente Arena®, da lógica de controle instalada no CLP e do mapeamento dos canais de I/O deste instrumento, obtêm-se a integração e comunicação entre o modelo de simulação e o sistema de controle.

Figura 11 – Conexão para acessar os elementos para controle no modelo de simulação



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 12 – Conexão das variáveis do Arena® com os tags da programação do CLP



Fonte: Elaborado pelos autores

Desta forma, criou-se um ambiente virtual em laboratório semelhante a um sistema viário real, o que permite testar e avaliar o comportamento de um trânsito urbano a qualquer instante durante o período de simulação. Isto é, pode-se bloquear ou desbloquear o fluxo de veículos, em um ou vários pontos específicos do trecho urbano simulado, com o modelo em plena execução. Assim, é possível, por exemplo, avaliar em tempo real o fluxo de automóveis em um ponto específico da via urbana a fim de analisar o comportamento do trânsito em situações específicas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Experimentos propostos

Foram propostos três cenários, onde cada um representou um estado de trânsito da seguinte forma:

- Trânsito Livre;
- trânsito Regular; e
- trânsito Congestionado.

A fim de simular os estados de trânsito regular e congestionado, ajustou-se, junto às funções de tempo entre chegadas (TECs) da Tabela 1, um aumento de 30%

quando o trânsito encontra-se regular e 60% quando o mesmo se encontra congestionado. Acaba-se, assim, por influenciar a demanda de automóveis junto às vias do modelo computacional, lembrando que, na Tabela 1, apresentam-se os dados referentes às variáveis TEC de trânsito no estado livre.

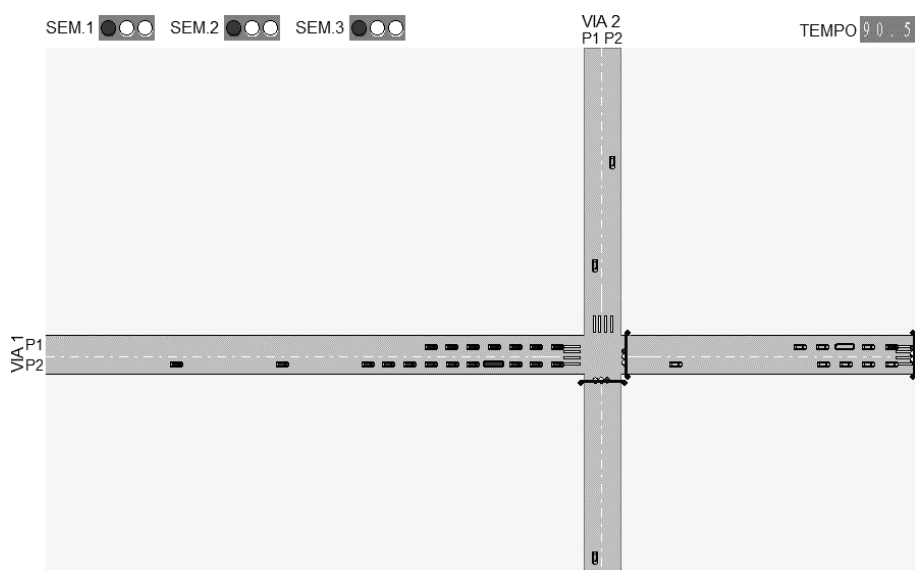
As Figuras 13, 14 e 15 mostram instantes de execução do modelo de simulação integrado ao sistema de controle, conforme os três estados de trânsito propostos. O instante de captura de cada estado de trânsito foi o mesmo, ou seja, 90,5 segundos. Os sinalizadores vermelhos dos semáforos 1, 2, 3 (SEM.1, SEM.2, SEM.3) também se ativaram no mesmo instante.

Visualmente, é possível perceber a diferença de comportamento da demanda de veículos junto às vias semaforizadas quando o estado de trânsito muda de livre (Figura 13) para regular (Figura 14) e de regular para congestionado (Figura 15). É importante ressaltar que, para obter os diferentes cenários do modelo, os tamanhos de ciclo de temporização para cada um dos estados de trânsito propostos foi ajustado junto ao ambiente de simulação. Isto é, uma rodada de aproximadamente 5 minutos (273 segundos), o equivalente a 3 ciclos de temporização de 91 segundos (tamanho do ciclo dos semáforos).



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 14 – Instante de execução do modelo de simulação em trânsito regular

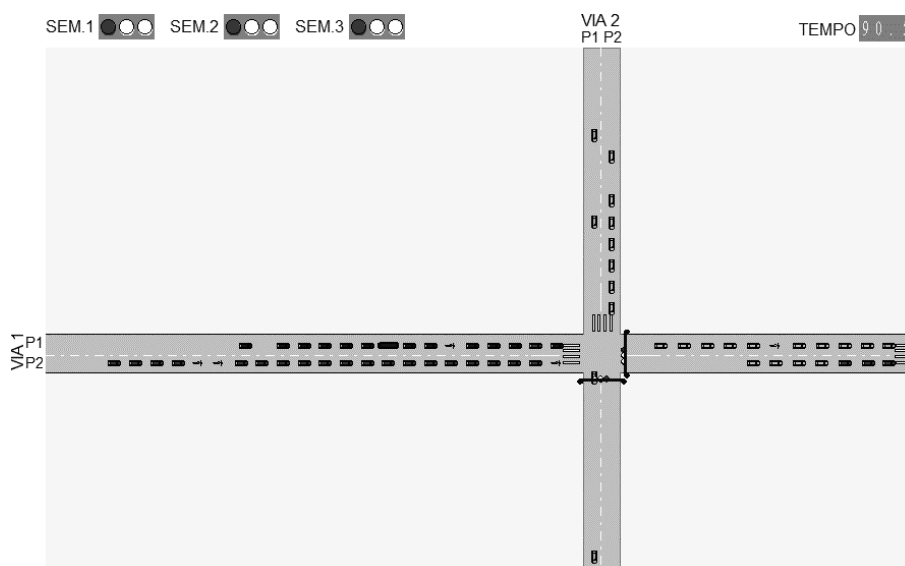


Fonte: Elaborado pelos autores

Os dados correspondentes ao comportamento das vias semaforizadas, que servem de base para a análise dos resultados, decorrem de 20 replicações de 273 segundos de rodada cada. Cada replicação é iniciada de forma manual, fazendo com que o controle dos sinalizadores dos semáforos, assim como o tempo de ativação/desativação dos mesmos, ocorra em tempo real. A ativação da integração do modelo de simulação com o CLP é efetuada ao mesmo tempo de forma manual.

Deste modo, o modelo de simulação pôde atender aos diferentes estímulos de tempo entre chegada de veículos em cada uma das vias semaforizadas e os comandos de ativação/desativação advindos do CLP. Isto permitiu analisar, em tempo real, o comportamento do sistema conforme a mudança de estado de trânsito.

Figura 15 – Instante de execução do modelo em trânsito congestionado



Fonte: Elaborado pelos autores

3.2 Análise dos Resultados

Os dados que serviram de base para a análise dos resultados, oriundos de cada replicação e armazenados em tempo real em um arquivo Excel, foram:

- Média total de veículos que entram no sistema;
- média total de veículos que ficam retidos no sistema; e
- tempo médio total de atravessamento dos veículos.

A Tabela 3 mostra, conforme os estados de trânsito propostos, o resultado da média total dos dados obtidos de 20 replicações oriundas do modelo computacional.

Tabela 3 – Média total das replicações oriundas das animações obtidas em tempo real.

| Estado de Trânsito | Média Total de Veículos que entram no Sistema | Média Total de Veículos que ficam retidos no Sistema | | | | Tempo Médio Total de Atravessamento dos Veículos (segundos) | | | |
|--------------------|---|--|-------|------|-------|---|-------|-------|-------|
| | | E11 | E12 | E21 | E22 | E11 | E12 | E21 | E22 |
| LIVRE | 149 | 3,66 | 4,63 | 3,60 | 5,55 | 30,32 | 28,08 | 28,04 | 48,08 |
| REGULAR | 209,8 | 5,16 | 6,46 | 5,14 | 7,58 | 30,72 | 28,01 | 27,86 | 45,70 |
| CONGESTIONADO | 358,2 | 8,11 | 11,77 | 9,04 | 17,37 | 30,46 | 28,99 | 29,39 | 57,06 |

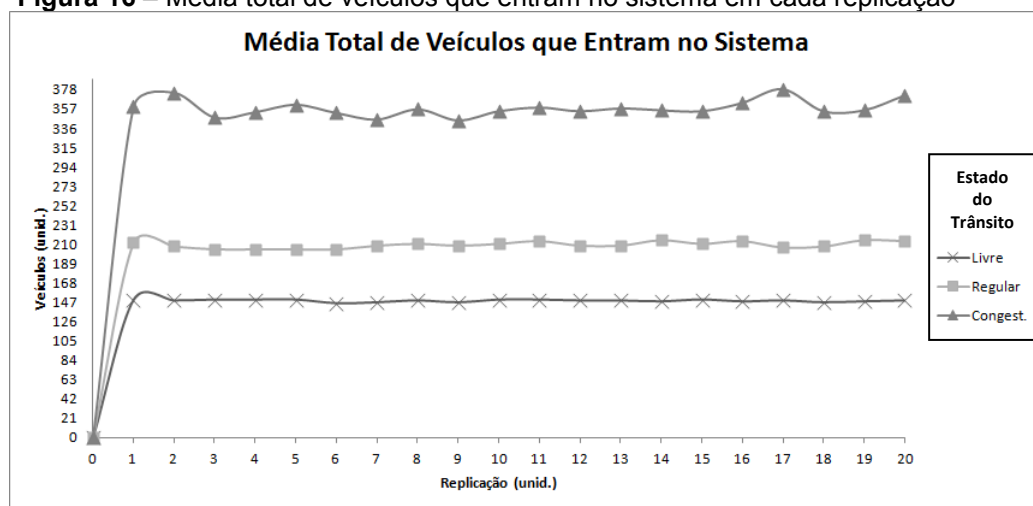
Fonte: Elaborado pelos autores

Analisando a coluna “Média Total de Veículos que entram no Sistema” da Tabela 3, lembrando que cada replicação equivale a um período de 273 segundos de simulação, percebe-se a diferença da demanda de automóveis no modelo de

simulação quando há mudança no estado de trânsito. Quando o trânsito se encontra no estado livre, a quantidade total de entidades (veículos) do tipo E11, E12, E21 e E22 que entram no sistema fica em torno de 149 veículos. Quando o mesmo se encontra no estado de trânsito regular, a quantidade de veículos sobe para 209,8 veículos. E no estado de trânsito congestionado, a demanda aumenta para 358,2 veículos, o que equivale a 41,6% de veículos a mais quando comparado ao estado de trânsito livre. Isto em apenas 5 minutos de simulação.

O gráfico da Figura 16 mostra a diferença de comportamento dos três estados de trânsito simulados no que tange à demanda de entrada de veículos ao longo das 20 replicações analisadas.

Figura 16 – Média total de veículos que entram no sistema em cada replicação



Fonte: Elaborado pelos autores

Ao analisar o comportamento do gráfico (Figura 16), é possível notar que a integração entre o ambiente urbano simulado e o sistema de controle automático se mostra sensível aos diferentes estados de trânsito propostos. Onde, conforme os dados apresentados na Tabela 3, uma média de 149 veículos (resultado da média das 20 replicações) entram no ambiente urbano simulado durante o período de trânsito Livre. Uma média de 209,8 veículos entra no ambiente urbano simulado durante o período de trânsito Regular. E uma média de 358,2 veículos entra no ambiente urbano simulado durante o período de trânsito Congestionado.

Deste modo, observa-se, nas curvas do gráfico (Figura 16), que a média total de veículos que entram no sistema em cada replicação durante cada estado de trânsito se mostra próxima uma da outra, desde a primeira replicação (1) até a última

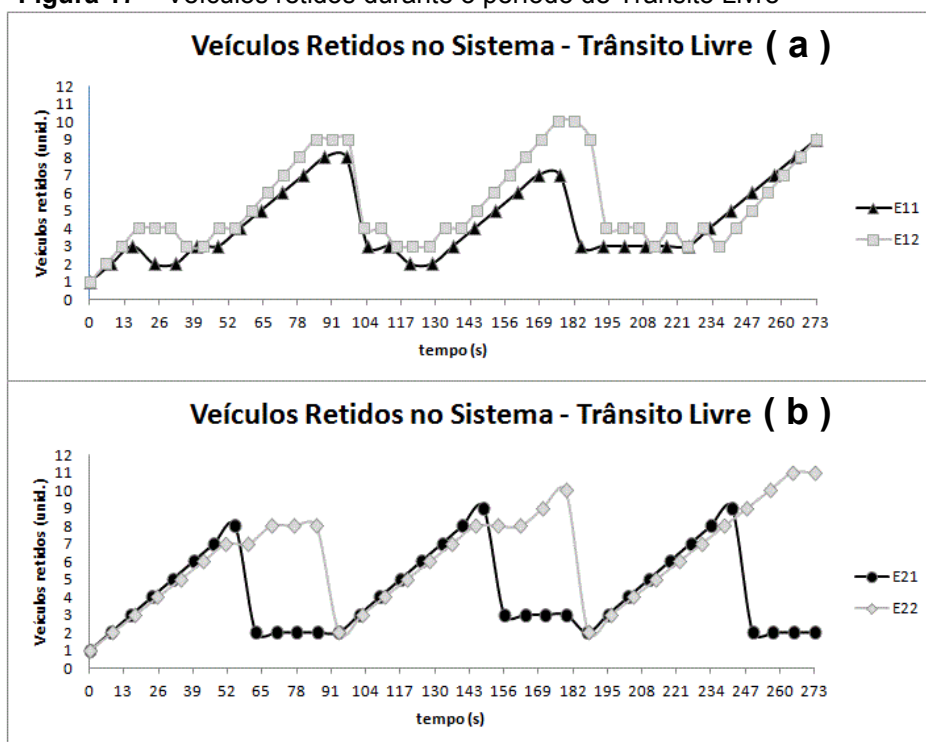
(20). Isto comprova a estabilidade e a consistência do modelo de simulação, em conjunto com o sistema de controle, no que tange aos dados obtidos em cada replicação a cada estado de trânsito analisado, durante cada período simulado.

Acerca das colunas “Média Total de Veículos que ficam Retidos no Sistema” e “Tempo Médio Total de Atravessamento dos Veículos” (Tabela 3), encontram-se os dados relativos à quantidade média de veículos do tipo E11, E12, E21 e E22. Estes veículos ficam retidos nas vias semaforizadas do modelo e também ao tempo médio que levam para atravessar a via semaforizada. Isto é, o tempo que os veículos do tipo E11, E12, E21 e E22 levam da origem ao destino, onde os veículos do tipo E11 advêm da pista 1 da Via 1, os do tipo E12 da pista 2 da Via 1, os do tipo E21 da pista 1 da Via 2 e os do tipo E22 da pista 2 da Via 2.

As Figuras 17, 18 e 19 mostram os gráficos obtidos em tempo real de uma das 20 replicações relativa à média dos veículos retidos na via do sistema simulado. Com isso, é possível verificar o comportamento dos veículos do tipo E11, E12, E21 e E22, retidos ao longo dos 5 minutos de integração, durante os estados de trânsito livre, regular e congestionado, respectivamente.

Os gráficos (Figuras 17, 18 e 19) foram divididos em duas partes. A primeira (a) mostra as curvas de retenção dos veículos do tipo E11 e E12. A segunda (b) mostra as curvas dos veículos do tipo E21 e E22. Assim, estes gráficos mostram os períodos de retenção dos veículos do tipo E11, E12, E21 e E22 ao longo dos 273 segundos de simulação, durante o estado de trânsito livre. A quantidade de pontos nas curvas dos gráficos está diretamente relacionada à demanda de veículos nas vias do modelo. Cada ponto indica a quantidade de veículos retidos no sistema ao longo do período de simulação. Portanto, quanto maior a demanda de veículos, maior é a quantidade de pontos nas curvas dos gráficos. Assim, nota-se que os veículos do tipo E11, E12 e E21 tendem a seguir o mesmo padrão de retenção de veículos ao longo de cada ciclo de temporização (91, 182 e 273 segundos), repetindo-se o mesmo número aproximado de veículos em cada ciclo. No entanto, os veículos do tipo E22 não seguem o mesmo padrão de retenção e, ainda, podem influenciar o congestionamento das vias do sistema, conforme detectado nos instantes 91 segundos (8 veículos), 182 segundos (10 veículos) e 273 segundos (11 veículos). Denota-se, então, a tendência de retenção de veículos do tipo E22 a cada novo ciclo.

Figura 17 – Veículos retidos durante o período de Trânsito Livre



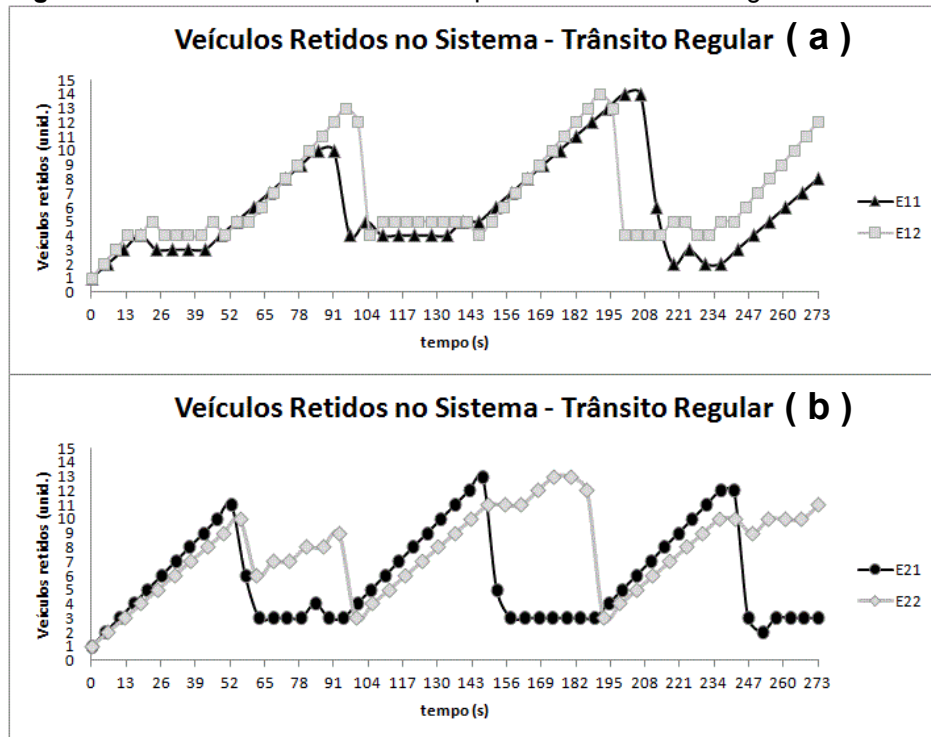
Fonte: Elaborado pelos autores

A Figura 18 mostra os veículos retidos durante o período de trânsito regular.

Tal como ocorrera na Figura 17, pode-se notar que os gráficos (a) e (b) (Figura 18) também são do tipo “dente de serra”. Isto mostra os picos de máximo e mínimo de veículos retidos no sistema por ciclo de temporização devido aos períodos de ativação e desativação dos sinalizadores vermelho e verde dos semáforos das vias 1 e 2 do modelo de simulação. Deste modo, os gráficos (a) e (b) (Figura 18) mostram que os picos de número de veículos retidos durante o período de trânsito regular aumentam quando comparados com a condição anterior. Porém, o sistema não mostra um nível de retenção de veículos ainda significativo, embora a demanda de automóveis junto às vias 1 e 2 do modelo de simulação (quantidade de pontos em cada linha do gráfico) tenha aumentado.

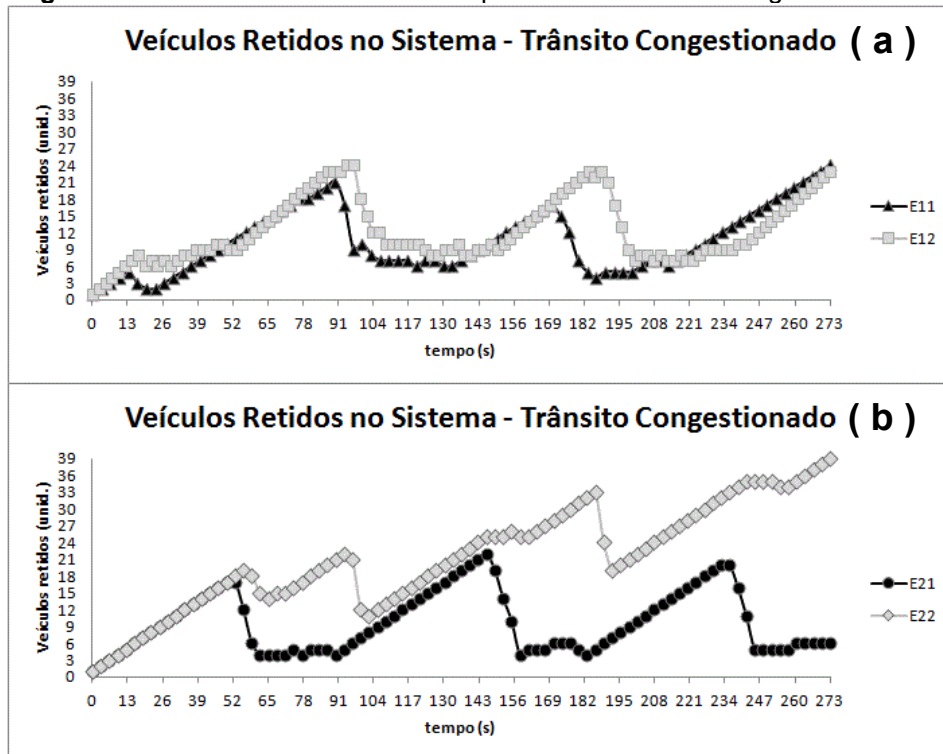
O gráfico da Figura 19 mostra o quão denso um trânsito pode ficar devido ao aumento de veículos retidos no sistema durante o período de congestionamento.

Figura 18 – Veículos retidos durante o período de Trânsito Regular



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 19 – Veículos retidos durante o período de Trânsito Congestionado



Fonte: Elaborado pelos autores

Nota-se, segundo os gráficos (a) e (b), que os picos de automóveis retidos por ciclo aumentaram quando comparados aos dois estados de trânsito anteriores. Isto é, a demanda de veículos do tipo E11, E12, E21 e E22 aumentaram junto às linhas de veículos dos gráficos durante o período de congestionamento. Os veículos E11, E12 e E21 mantêm um padrão de retenção aproximadamente regular ao longo dos três ciclos de temporização (91, 182 e 273 segundos). No entanto, tal como previsto, os veículos do tipo E22 tendem a ficar ainda mais retidos a cada novo ciclo de temporização.

Deste modo, ao longo dos 5 minutos de simulação, observa-se que no instante do primeiro ciclo de temporização (91 segundos), conforme o gráfico (Figura)19, cerca de 21 veículos do tipo E22 encontram-se retidos no sistema. Já no terceiro e último ciclo (273 segundos), o número de veículos retidos sobe ainda mais, ou seja, alcança o número de 39 veículos.

4 CONCLUSÃO

Como proposto, foi obtida a integração entre um modelo de simulação a eventos discretos no ambiente de desenvolvimento do software Arena de uma via urbana semaforizada e um sistema de controle automatizado. Através do modelo, foi possível acompanhar em tempo real o comportamento do fluxo de veículos em situações distintas de trânsito. Cada situação foi oriunda de demandas em horários específicos, onde a lógica de comando dos semáforos no modelo computacional foi acionada pelo controlador lógico programável.

Foi possível observar e coletar em tempo real os dados do modelo de simulação e do sistema de controle. Assim, através de tabelas e gráficos, pôde-se avaliar o sistema e constatar que o modelo de simulação atendeu aos diferentes estímulos das variáveis relativas à dinâmica do sistema. Da mesma forma, o modelo permitiu avaliar o comportamento de cada uma das vias semaforizadas e dos comandos de ativação/desativação oriundos do controlador.

Portanto, espera-se que a integração entre simulação a eventos discretos e sistemas de controle automático possam ser utilizados para análise de fluxo de veículos em áreas urbanas. De forma semelhante, espera-se que situações comuns em indústrias, como sistemas de transporte de produtos em esteiras em linhas de

montagem, também possam ser analisadas e testadas com a abordagem aqui apresentada.

Nota:

¹ Texto inédito resultado de dissertação de mestrado.

REFERÊNCIAS

- AUINGER, F.; VORDEWINKLER, M.; BUCHTELA, G. **Interface drive domain-independent modeling architecture for “soft-comissioning” and “reality in the loop”**. In: PROCEEDINGS OF THE WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1999.
- BANKS, J.; NELSON, L. B. **Discrete-event system simulation**. Prentice Hall, 2010.
- BAPTISTA, R. C. T.; RANGEL, J. J. A. Modelo de simulação para análise de desempenho de um cruzamento viário semaforizado. In: ENCONTRO MINEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 7., **Anais...** São João Del Rei, 2011.
- BASTOS, P. J. T.; et al. Simulação a eventos discretos para comissionamento de sistemas de controle. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. BAURU, 17., 2010. **Anais...** Bauru, 2010.
- BUBICZ, M.E.; SELBITTO, M.A. Qualidade em Serviço de Transporte de Passageiros: Um Estudo de Caso no Sistema Urbano de Porto Alegre. **Revista Produção Online**, v. 9, n.4, p. 704-726, 2009. Disponível em: <<http://www.producaoonline.org.br>>.
- BULLOCK, Darcy; et al. Hardware-in-the-loop simulation. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v.12, n. 1, p. 73-89, 2004.
- CHWIF, Leonardo. Utilizando a Simulação de Eventos Discretos em Projetos de Sistemas Automatizados de Manufatura. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL DE AUTOMAÇÃO, CONAI. São Paulo, 10,. 2002. **Anais...** São Paulo, 2002.
- DAVIS, W. J.; et al. **Developing a real-time emulation/simulation capability for the control architecture to the ramp fms**. In: PROCEEDINGS OF THE WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1996.
- DOUGALL, D. J. Applications and benefits of real-time I/O simulation for PLC and PC control systems. **ISA Transactions**, v. 36. n. 4, p. 305-311, 1998.
- GONZALES, Fernando G.; DAVIS, Wayne J. **A simulate based controller**. In: PROCEEDINGS OF THE WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1997.

INUKAY, Toshihiro; HIBINO, Hironori; FUKUDA, Yoshiro. Simulation environment synchronizing real equipment for manufacturing cell. **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing**, v.1, n. 2, p. 238-249, 2007.

KELTON, D.W.; SADOWSKI, R. P.; STURROCK, D.T. **Simulation with arena**. New York: Mc Graw Hill, 2007.

KOFLANOVICH, Nathan; HARTMAN, Peter. **Live modernizations of automated material handling systems**: bridging the gap between design and startup using emulation. In: PROCEEDINGS OF THE WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2010.

LIED, J.; SELLITTO, M.A. Aplicação da modelagem por redes de petri para avaliação ocupacional de trabalhadores. **Revista Produção Online**, v.9, n.3, p. 489-510, 2009. Disponível em: <<http://www.producaoonline.org.br>>.

MONTEVECHI, J. A. B.; et al. **Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted ideo**: an application in a brazilian tech company. In: PROCEEDINGS OF THE WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2010.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. Rio de Janeiro: Pearson/Prentice Hall, 2003.

OLIVEIRA, M.J.F.; SABBADINI, F.S.; CHAMOWITZ. Uma Plataforma de Simulação Visual em 3d Orientada para o Ciclo de Vida das Entidades. **Revista Produção Online**, v.9, n.2, 2009. Disponível em <<http://www.producaoonline.org.br>>.

RANGEL, J. J. A.; JÚNIOR, E. C. Avaliação de um mecanismo de teste de um sistema de controle com um modelo de simulação. In: SBPO - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 63, 2011. **Anais...** Ubatuba-SP, 2011. p. 1-12,.

RANGEL, J. J. A. et al. Simulação a eventos discretos para treinamento em sistemas de controle. **PODes - Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, v. 4, p. 97-111, 2012.

ROCK, Sascha. Hardware in the loop simulation of production systems dynamics. **Production Engineering - Research and Development**, v. 5, n. 3, p. 329-337, 2011.

SARGENT, Robert G. **Verification and validation of simulation models**. In: PROCEEDINGS OF THE WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2010.

SMITH, Jeffery S.; CHO, Yunchol. **Offline commissioning of a PLC-based control system using Arena**. In: PROCEEDINGS OF THE WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2008.

SMITH, J. S.; et al. **Discrete event simulation for shop floor control**. In: PROCEEDINGS OF THE WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1994.

VANDERLEI, Marcelo Leite et al. Implantação de controle baseado no sistema de execução da manufatura (MES): análise em empresa de usinagem no setor aeronáutico. **Revista Produção Online**, v.9, n.4, p. 727-746, dez. 2009. Disponível em <<http://www.producaoonline.org.br>>.

WYSK, Richard A.; PETERS, Brett A.; SMITH, Jeffrey S. A formal process planning schema for shop floor control. **Engineering Design and Automation Journal**, v. 1, n. 1, p. 3-19, 1995.

ZHANG, D. Z.; ANOSIKE, A. I. Modelling and simulation of dynamically integrated manufacturing systems. **Advances in Intelligent and Soft Computing**, v. 66, p. 865-876, 2010.



Artigo recebido em 10/11/2011 e aceito para publicação em 13/08/2012.

APÊNDICE 1

Quadro com Itens do modelo documentado em IDEF-SIM.

| Código | Significado | Parâmetro |
|---------------|--|---|
| E11 | Veículos oriundos da pista 1 da Via 1 | 5.2 + LOGN(2.97, 2.75) s; Início: 0; 1 por vez; infinito. |
| E12 | Veículos oriundos da pista 2 da Via 1 | 4.95 + LOGN(1.17, 0.755) s; Início: 0; 1 por vez; infinito. |
| E21 | Veículos oriundos da pista 1 da Via 2 | 6.08 + GAMM(0.456, 3.49) s; Início: 0; 1 por vez; infinito. |
| E22 | Veículos oriundos da pista 2 da Via 2 | 6.7 + WEIB(1.78, 1.96) s; Início: 0; 1 por vez; infinito. |
| SM1V1P1 | Bloquear veículos da pista 1 da Via 1 quando o sinal vermelho de SEM1 se encontra ativo. | Variável. |
| SM1V1P2 | Bloquear veículos da pista 2 da Via 1 quando o sinal vermelho de SEM1 se encontra ativo. | Variável. |
| SM2V2P1 | Bloquear veículos da pista 1 da Via 2 quando o sinal vermelho de SEM2 se encontra ativo. | Variável. |
| SM2V2P2 | Bloquear veículos da pista 2 da Via 2 quando o sinal vermelho de SEM2 se encontra ativo. | Variável. |
| SM3V1P1 | Bloquear veículos da pista 1 da Via 1 quando o sinal vermelho de SEM3 se encontra ativo. | Variável. |
| SM3V1P2 | Bloquear veículos da pista 2 da Via 1 quando o sinal vermelho de SEM3 se encontra ativo. | Variável. |
| EV1P1 | Trecho da pista 1 da Via 1 até o cruzamento com a Via 2. | Correia; Distância: 96m; Velocidade: 8m/s; Tamanho Célula: 4. |
| EV1P2 | Trecho da pista 2 da Via 1 até o cruzamento com a Via 2. | Correia; Distância: 96m; Velocidade: 8m/s; Tamanho Célula: 4. |
| EV2P1 | Trecho da pista 1 da Via 2 até o cruzamento com a Via 1. | Correia; Distância: 48m; Velocidade: 8m/s; Tamanho Célula: 4. |
| EV2P2 | Trecho da pista 2 da Via 2 até o cruzamento com a Via 1. | Correia; Distância: 48m; Velocidade: 8m/s; Tamanho Célula: 4. |
| SV1P1 | Trecho da pista 1 da Via 1 pós cruzamento. | Correia; Distância: 44m; Velocidade: 8m/s; Tamanho Célula: 4. |
| SV1P2 | Trecho da pista 2 da Via 1 pós cruzamento. | Correia; Distância: 44m; Velocidade: 8m/s; Tamanho Célula: 4. |
| SV2P1 | Trecho da pista 1 da Via 2 pós cruzamento. | Rota; Tempo: 3,5 segundos. |
| SV2P2 | Trecho da pista 2 da Via 2 pós cruzamento. | Rota; Tempo: 3,5 segundos. |
| E11V1P2 | Faixa de desvio da pista 1 da Via1 para pista 2 da Via 1 para entidades E11. | Rota; Tempo: 1,5 segundos. |
| E12V1P1 | Faixa de desvio da pista 2 da Via1 para pista 1 da Via 1 para entidades E12. | Rota; Tempo: 1,5 segundos. |
| E12V2P1 | Faixa de desvio da pista 2 da Via1 para pista 1 da Via 2 para entidades E12 ou E11. | Rota; Tempo: 1,75 segundos. |
| E12V2P2 | Faixa de desvio da pista 2 da Via1 para pista 2 da Via 2 para entidades E12 ou E11. | Rota; Tempo: 1,75 segundos. |
| E21V2P2 | Faixa de desvio da pista 1 da Via2 para pista 2 da Via 2 para entidades E21. | Rota; Tempo: 1,5 segundos. |
| E22V1P1 | Faixa de desvio da pista 2 da Via2 para pista 1 da Via 1 para entidades E22 ou E21. | Rota; Tempo: 1,75 segundos. |
| E22V1P2 | Faixa de desvio da pista 2 da Via2 para pista 2 da Via 1 para entidades E22 ou E21. | Rota; Tempo: 1,75 segundos. |
| E22V2P1 | Faixa de desvio da pista 2 da Via2 para pista 1 da Via 2 para entidades E22. | Rota; Tempo: 1,5 segundos. |
| SEM1 | Semáforo da Via 1 (instalado no cruzamento com a Via 2) | Verm.: 40 seg.; Verde: 46 seg.; Amar.: 4,8 seg. |
| SEM2 | Semáforo da Via 2 | Verde: 33 seg.; Amar.: 4,8 seg.; Verm.: 53 seg. |
| SEM3 | Semáforo da Via 1 (instalado na saída da Via 1) | Verde: 33 seg.; Amar.: 4,8 seg.; Verm.: 53 seg. |