

MODELO EM REDES DE PETRI PARA TRATAMENTO DE RESTRIÇÕES EM MALHA DE TRENS

FREDDY M. YAMASHIRO, MARILZA A. DE LEMOS, MARCIO A. MARQUES, GALDENORO BOTURA JR.

Laboratório NATEL, Engenharia de Controle e Automação, UNESP
Avenida Três de Março, 511 – 18087-180 Sorocaba, SP
freddy@grad.sorocaba.unesp.br marilza@sorocaba.unesp.br
marciomq@sorocaba.unesp.br galdenoro@sorocaba.unesp.br

Abstract— This paper proposes a Petri Nets model to treat constraints for rail traffic control in a train network. The developed model should treat safe conditions for a controller that operates in handling operations of trains movements in a railway domain of Universal Dash topology, field defined specifically for this paper, with features that and operational flexibility in order to provide reliability operation in an automatic way. Operational requirements and security restrictions used in the model construction are based on ABNT norm and widely recognized and used by the technical subway community. States, transitions and relationships were identified in the domain and embedded in the model. Graphic simulations and matricial analysis demonstrated correctness in the model at domain studied.

Keywords— Railway Signaling, Railway Network Conflicts, Petri Nets, Discrete Event Systems

Resumo— O trabalho descrito propõe um modelo em Redes de Petri para tratar restrições para controle de tráfego ferroviário em uma malha de trens. O modelo desenvolvido embute as condições de segurança para que um controlador atue nas operações de movimentação de trens em um domínio ferroviário de topologia Travessão Universal, a fim de viabilizar a operação ferroviária de forma automática com segurança. Os requisitos operacionais e as restrições de segurança utilizadas na construção do modelo são baseados nas normas ABNT e amplamente reconhecidos pela comunidade técnica metroviária. Os estados, transições e seus relacionamentos foram identificados no domínio e embutidos no modelo. Simulações gráficas e análise matricial do modelo demonstraram a corretude da especificação no domínio estudado.

Palavras-chave— Sinalização Ferroviária, Conflitos em Malhas de Trens, Redes de Petri, Sistemas a Eventos Discretos

1 Introdução

A sobrecarga no sistema viário de grandes cidades reduz a mobilidade do transporte coletivo e eleva os tempos de viagem da população ativa, afetando a produtividade dos usuários que utilizam esse meio de transporte para locomoção ao trabalho. O transporte sobre trilhos, de passageiros ou cargas, tem sido a melhor alternativa para contornar ou amenizar essa situação (ANTT, 2011). Segundo a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), a proporção dos modais de transporte no Brasil é distribuída de forma irregular: 60,49% (rodoviário), 20,86% (ferroviário), 13,86% (aquaviário), 4,46% (dutoviário) e 0,33% (aéreo). Atualmente no Brasil e no mundo, várias operadoras de metrô e ferrovias têm se deparado com novas expectativas e exigências dos meios de transporte, tais como: maior conforto nos trens, melhoria nas condições de acesso às estações, menor tempo de percurso, qualidade na prestação de serviços, facilidades de comunicação, entre outras. Estes fatores, associados à crescente demanda no setor, justificam a automação e modernização do sistema metroferroviário (STM, 2013).

1.1 Controle Automático de Trens

Os sistemas de sinalização utilizam como filosofia básica a divisão da via em segmentos (blocos), chamados **Circuito de Via** (CDV). O conceito de CDV como parte de um circuito elétrico foi desenvolvido

na década de 70 e ainda permanece em uso, porém os sistemas eletrônicos que o constituem evoluíram em muito. Um sistema de controle de trens utiliza o circuito de via para identificar se existe ou não um trem ocupando aquele trecho e, através de informações de diversos circuitos de via adjacentes, garante o distanciamento seguro entre os trens (Teague, 1976). Tal distanciamento implica em estabelecer faixas máximas de velocidade permitidas para os trens conforme a situação dos blocos que fazem parte de sua rota (Missikof, 1998). A figura 1 mostra um exemplo da subdivisão da via em segmentos, onde o bloco mais à direita está ocupado, proibindo o tráfego de um segundo trem para aquele CDV.

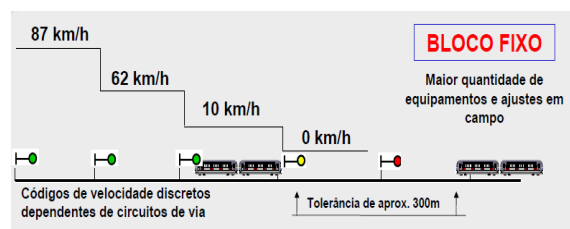


Figura 1. Representação de trens ocupando CDV (STM, 2013)

Uma característica desta implementação está relacionada a associar o estado do sinaleiro com um valor de velocidade autorizado, ou seja, o estado verde possibilita o tráfego de trens com a máxima velocidade autorizada na via, o amarelo com velocidade limitada e o vermelho indica que o trem deve parar diante do sinal. Numa arquitetura padrão de controle de sistemas ferroviários, o subsistema ATP (*Automatic Train Protection*) realiza a proteção automática de trens, garantindo a sua movimentação

com a máxima segurança, prevenindo colisões e descarrilamentos (Teague, 1976). Para monitorar as condições de tráfego ferroviário e permitir a sinalização eletrônica, é necessária a instalação de equipamentos ao longo da ferrovia. O ATP possui equipamentos nas estações mestras, ao longo da via e embarcados no trem, sendo monitorado pelo **Sistema de Controle Central** (SCC). Essa característica faz com que a planta ferroviária seja definida como um Sistema a Eventos Discretos (SED) (Mendes, 2009).

A função de controle de tráfego realizada pelo ATP estabelece os limites seguros de proximidade e sentido de movimentação dos trens, impedindo que haja movimentos opostos concorrentes de dois trens para a mesma seção de via, permitindo que os trens possam seguir uns aos outros de forma segura (Gueiral, 2008). O software empregado nos equipamentos de sinalização utiliza, em sua maioria, a linguagem de programação ladder, sendo constituído por equações lógicas que comandam o estado das variáveis do sistema com base nas condições da via (Teixeira, 2012).

O desenvolvimento de sistemas de controle de movimentação de trens torna-se complexo com o aumento de tecnologias que permitem a inserção de mais trens em uma determinada linha. Em domínios desse tipo, em que existe um número elevado de restrições para o movimento de trens, faz-se útil o emprego de ferramentas de modelagem para auxiliar no desenvolvimento dos softwares de controle e supervisão da planta. Uma poderosa ferramenta para modelar problemas dessa natureza são as Redes de Petri (Fanti et al., 2003).

1.2 Redes de Petri

Redes de Petri é uma técnica de especificação de sistemas que possibilita modelagem gráfica e representação matemática, com mecanismos para verificação de propriedades e correteza do sistema especificado. A técnica tem sido utilizada para especificar ou analisar o comportamento lógico de sistemas a eventos discretos, bem como avaliar seu desempenho (Cardoso, 1997). Fichas são utilizadas nas redes para simular o dinamismo e atividades concorrentes de sistemas (Cheng & Young, 2008). Os elementos básicos de uma Rede de Petri ordinária são (figura 2):

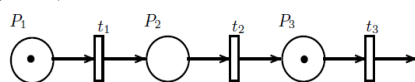


Figura 2. Componentes de uma rede de Petri

Lugar: simbolizado pelo círculo, representa um estado ou uma condição (P).

Transição: simbolizado pelo retângulo, representa algum evento do sistema (t).

Ficha: também chamada de *Token*, representa um objeto ou uma quantidade corrente em determinado lugar.

Arco: simbolizado pela seta, representa uma ligação entre um lugar e uma transição.

Como ferramenta matemática, as redes de Petri podem ser utilizadas para estabelecer equações de estado e equações algébricas empregadas no processo descritivo de um sistema (Cheng and Young, 2008).

Uma rede de Petri é definida, matematicamente, como uma quádrupla:

$$N = (P, T, F, W)$$

onde

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$$

é um conjunto finito de lugares;

$$T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}, n \geq 1$$

representa as transições;

$$F \subset (P \times T) \cup (T \times P)$$

é o conjunto de arcos;

$$W: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$$

é a marcação inicial dos lugares.

Algebricamente, a Rede de Petri pode ser representada de forma matricial. A partir dessas representações e variáveis adicionais como tempo, restrições, probabilidades, etc, os modelos podem ser validados por meio de simulações, em que são verificadas algumas propriedades da Rede de Petri. Uma Rede de Petri temporal pode ser obtida ao se incluir no modelo um atraso de sensibilização na transição de interesse ($\theta_{\min}, \theta_{\max}$) (Cardoso, 1997). A duração da sensibilização deve ser maior que θ_{\min} e menor que θ_{\max} para que ocorra o disparo e o lugar destino possa ser marcado. Outro critério para checar a consistência da rede é a vivacidade. Uma rede é viva se, segundo qualquer marcação, uma transição está disponível para disparar. Uma rede que não atende a este requisito está em bloqueio fatal (*deadlock*) (Palomino, 1995).

1.3 Objetivos

Este trabalho propõe um modelo em Redes de Petri para tratar das especificações operacionais e restrições de segurança das operações de movimentações de trens em uma malha ferroviária com topologia Travessão Universal. O modelo é proposto a fim de se equacionar, previamente à fase de codificação, uma solução para controle de trens na malha evitando-se rotas conflitantes. Uma vez que as restrições e especificações modeladas são baseadas nas normas ABNT (NBR11764, 2011) (NBR7635, 2010), o modelo poderá ser utilizado como base para o desenvolvimento de softwares de controle de tráfego ferroviário, que em sua maioria utilizam linguagens de programação ladder. A implementação desse tipo de software pode ser simplificada por ferramentas, disponíveis na literatura, que realizam a conversão automática de modelos em Redes de Petri para linguagem Ladder (Silvestre, 2010).

2 Materiais e Métodos

Os modelos foram desenvolvidos na ferramenta HPSIM (Anschuetz, 2013), distribuída gratuitamente para fins acadêmicos e educacionais. Este software possui interface gráfica para a construção e simulação direta da rede. Permite ainda a criação de um banco de dados, no formato de arquivo .CSV, com os resultados obtidos na simulação, e seu posterior tratamento em softwares como o Microsoft Excel, uma característica essencial para a análise de consistências no modelo desenvolvido (Freitas et al., 2007). Devido ao número de lugares e transições que envolvem o domínio modelado, estes foram agrupados funcionalmente dando origem a três tipos de modelos de Redes de Petri. São eles: (a) **Rotas Conflitantes**; (b) **Requisição e Alinhamento** e (c) **Comando de Máquinas de Chave**.

2.1 Definição do Cenário

Para a elaboração das regras que restringem o tráfego ferroviário foi adotada uma topologia comumente encontrada nas linhas ferroviárias brasileiras, principalmente naquelas destinadas ao transporte de cargas, em que existem duas linhas paralelas e desvios entre elas, como esquematizado na figura 3.

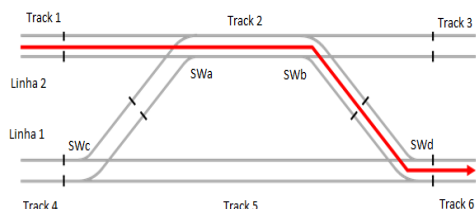


Figura 3. Topologia "Travessão Universal"

Esta arquitetura de via é chamada de **Travessão Universal**, e possui oito possíveis rotas a serem seguidas por uma composição ferroviária. Em vermelho está traçada a rota 1-6, que tem origem no *track 1* (Circuito de Via 1) e término no *track 6* (Circuito de Via 6). A estrutura que torna possível a mudança de direção de um trem da linha 1 para a 2, por exemplo, é chamada de **Aparelho de Mudança de Via** (AMV). Este aparelho é constituído de uma parte móvel de trilhos e um motor elétrico, como mostrado na figura 4.

O que define a direção a ser seguida pelo trem é o posicionamento das "pontas de agulha" (número 1 da figura 4). Existem dois posicionamentos possíveis: **normal** e **reverso**. No primeiro, o trem continua seu caminho pela mesma linha em que se encontra e, no segundo, o trem é desviado para a linha adjacente. Controlar a posição da ponta de agulha significa controlar o motor elétrico que faz a movimentação. O conjunto do motor e das partes mecânicas de acionamento é chamado *Switch Machine* (Máquina de Chave), número 2 na figura 4 e representada por SW na figura 5.



Figura 4. Aparelho de mudança de via (IG, 2013)

2.2 Requisitos Funcionais

O conjunto de regras para o controle do tráfego ferroviário foi moldado em função da topologia Travessão Universal, especificada na figura 5. Por questões de espaço e devido à similaridade de controle, os modelos em Redes de Petri focaram a rota 1-6. As regras de segurança aplicadas estão baseadas em procedimentos comuns adotados por diversas operadoras de sistemas metroferroviários, como o Metrô de São Paulo.

Duas regras principais são: (i) só é permitido movimento ao trem que possui uma rota alinhada associada a ele. Ter uma rota alinhada significa que todos os **Aparelhos de Mudança de Via** do percurso a ser percorrido estão posicionados e travados eletricamente, cada um, em sua posição correta; (ii) os **Circuitos de Via** pertencentes à rota devem estar livres e desocupados. As posições de cada AMV, dadas pelo estado das máquinas de chave (SW), para as possíveis rotas existentes em um Travessão Universal são mostradas na tabela 1.

Tabela 1. Posições de AMV segundo rotas estabelecidas

Rotas	Posição SW (N – normal; R – Reverso)
1-3	SW _a = N; SW _b = N
1-6	SW _a = N; SW _b = R; SW _d = R
4-3	SW _c = R; SW _a = R; SW _b = N
4-6	SW _c = N; SW _d = N
3-1	SW _a = N; SW _b = N
3-4	SW _c = R; SW _a = R; SW _b = N
6-1	SW _a = N; SW _b = R; SW _d = R
6-4	SW _c = N; SW _d = N

As únicas rotas não conflitantes entre si são os pares (1-3, 4-6). Para todas as demais deve haver restrição de requisição de rota. O intertravamento estabelecido não permite que rotas conflitantes sejam requisitadas pelo sistema.

2.3 Regras de Intertravamentos

A requisição é parte inicial do processo de alinhamento de uma rota. Para ocorrer o processo de requisição não deve haver tráfego ou ocupação nos circuitos de via que possuem AMVs ligados à rota. As máquinas de chave pertencentes à rota devem estar destravadas, ou seja, devem estar livres para poderem se movimentar. No processo de alinhamento, as máquinas de chave devem ser

comandadas de forma a propiciar a posição correta dos AMVs da rota. Os lugares considerados e as regras para o intertravamento de requisição e alinhamento da rota 1-6 encontram-se na tabela 2.

Tabela 2. Regras para Requisição e Alinhamento da rota 1-6

Lugares	Descrição
Requisição	Indica que é possível requisitar a rota
Track 2	Circuito dos AMVs SWa e SWb livre
Track 5	Circuito do AMV SWd livre
SWa	Máquina de Chave SWa travada ou livre
SWb	Máquina de Chave SWb travada ou livre
SWd	Máquina de Chave SWd travada ou livre
Requisição 1-6	Condições suficientes para a requisição
Comando SW 1-6	Acionamento das Máquinas de Chave
Correspondência SW	SW posicionadas corretamente
Indicação SW	SW posicionada corretamente e travada
Alinhamento 1-6	Rota 1-6 está alinhada

Alguns lugares que são entradas da rede **Requisição e Alinhamento**, da rota 1-6, provém de redes auxiliares, ou seja, são saídas de outras redes; o primeiro caso é o lugar “Requisição” (saída da rede do tipo **Rotas Conflitantes**). Para que esse lugar seja marcado é necessário impedir que rotas conflitantes sejam alinhadas simultaneamente. As regras usadas para prevenir essa condição são listadas na tabela 3.

Tabela 3. Regras para Rotas Conflitantes

Lugares	Descrição
Rota Req	A rota está em processo de requisição
Rota locking	A rota está em processo de cancelamento
Rota não Req	Cancelamento da requisição da rota
Requisição	Não há rotas conflitantes requisitadas, pode ser iniciado o processo de requisição

Os lugares “Rota Req”, “Rota Locking” e “Rota não Req” são aplicados às oito rotas existentes, portanto a apresentação resumida da tabela 3 expande-se para 24 lugares.

Ao ser cancelada, a rota entra em um estado chamado *time locking*, em que deve-se aguardar o tempo de 7 segundos para que a rota perca o status de “alinhada” e novas rotas possam ser requisitadas pelo sistema. Essa é uma restrição de segurança para que não seja permitida a requisição de novas rotas para o trajeto e para que as Máquinas de Chave permaneçam travadas em sua posição.

Outro lugar que é uma entrada na rede **Requisição e Alinhamento** e saída de uma rede auxiliar é o lugar “Correspondência SW” (saída da rede tipo **Comando de Máquinas de Chave**). Esse estado é obtido através do correto acionamento das máquinas de chave pertencentes à rota.

A Máquina de Chave possui um circuito de comando e um de indicação. A correspondência da posição do AMV é obtida pela combinação do último comando de movimentação recebido com a indicação de sua posição atual. As regras utilizadas na rede **Comando de Máquinas de Chave** estão dispostas na tabela 4. Nela, o lugar “Comando SW 1-6” é uma saída da rede **Requisição e Alinhamento** e entrada na rede **Comando de Máquina de Chave**.

Tabela 4. Regras para Comando de Máquina de Chave

Lugares	Descrição
Comando SW 1-6	Comando para movimentação SW
Track 2	Circuito dos AMVs SWa e SWb livre
Track 5	Circuito do AMV SWd livre
Ind SWa - N	SWa está na posição Normal
Ind SWa - R	SWa está na posição Reverso
Ind SWb - N	SWb está na posição Normal
Ind SWb - R	SWb está na posição Reverso
Ind SWd - N	SWd está na posição Normal
Ind SWd - R	SWd está na posição Reverso
SWa livre	SWa pode ser movimentada
SWb livre	SWb pode ser movimentada
SWd livre	SWd pode ser movimentada
SWa - N	SWa foi movida para posição Normal
SWb - R	SWb foi movida para posição Reverso
SWd - R	SWd foi movida para posição Reverso
Correspondência SW	Posicionamento correto das SW

A saída desta última rede, lugar “Correspondência SW”, é uma entrada da rede **Requisição e Alinhamento**. Esse estado representa a correta configuração dos AMVs pertencentes à rota 1-6. A figura 5 mostra a relação entre as redes de Petri.

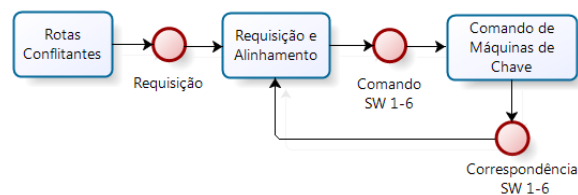


Figura 5 – Relações entre as Redes de Petri

3 Resultados e Discussões

Baseando-se nas restrições da tabela 3 (subseção 2.3) foi elaborada a Rede de Petri para **Rotas Conflitantes**, apresentada na figura 6. Além dos pedidos de requisição de rotas conflitantes, foi modelado o comportamento de *time locking* de uma rota, que diz respeito ao seu cancelamento. A transição para esse lugar é temporizada, com um tempo de espera de 7 segundos para que a rota perca o *status* de requisição. Esse é um requisito comum em especificações técnicas de sistemas de controle metroviário, que permite ao operador alterar o percurso dos trens para realização de manobras ou otimização do tráfego. Em processo de cancelamento de rotas, as Máquinas de Chave devem permanecer travadas e nenhuma rota pode ser requisitada. O lugar de saída desta rede, “Requisição”, é uma das entradas da rede **Requisição e Alinhamento**, e não há ocorrência de *deadlock* até a rede atingir a configuração final. Esta rede deve ser reinicializada após o trem terminar de completar a rota em questão, permitindo novas requisições pelo sistema.

Baseando-se nas restrições da tabela 2 (subseção 2.3) foi elaborada a Rede de Petri para a **Requisição e Alinhamento** da rota 1-6, apresentada na figura 7. Nesta rede, os lugares “Track 2” e “Track 5” são dados provenientes de campo, por isso há uma transi-

O intertravamento foi dividido em três módulos: Alinhamento e Requisição, Rotas Conflitantes e Comando de Máquina de Chave, sendo que estes trabalham em conjunto no controle geral do processo. Essa divisão foi necessária, primeiramente, para diminuir o tamanho das redes e tornar possível sua visualização de forma organizada, sem detrimento de informações. Segundo, as matrizes de Incidência e de marcação dos lugares tomariam dimensões muito elevadas para a apresentação e análise de resultados. Para a rede de Rotas Conflitantes, por exemplo, são geradas matrizes da ordem 25x50. A análise matemática das redes identificou ocorrência de *deadlock* ao final de cada processo, porém essa situação é esperada devido à divisão adotada no intertravamento. Para que a rede se mantivesse viva seria necessária a realimentação de *tokens* após o controle ter sido realizado.

O software utilizado para a criação das redes foi o HPSIM, de distribuição gratuita, que utiliza o formalismo da Rede de Petri Lugar-Transição, Redes de Petri Estocásticas e Redes de Petri Temporizadas. A extração dos dados gerados durante a simulação é limitada, sendo possível obter apenas dados referentes à sequência de disparos realizados e verificar a existência de *deadlocks*. Apesar dessa limitação, o software mostrou-se suficiente para a realização das análises de desempenho propostas neste trabalho.

O tratamento das restrições de segurança no tráfego ferroviário torna-se mais explícito na solução em Redes de Petri em comparação à abordagem direta com códigos de programação usuais, tal como *ladder*. O uso de grafos permite uma decomposição modular, hierárquica ou não, do problema de controle, diminuindo a complexidade na implementação e manutenção desse tipo de sistema. Apesar da linguagem *ladder* ser gráfica e adequada à implementação de intertravamentos, a quantidade de intertravamentos exigida em sistemas ferroviários é muito grande tornando a manipulação direta, em código de programação, uma tarefa árdua e suscetível à inserção de *bugs* pela equipe técnica. Redes de Petri fornecem uma descrição precisa e formal das sincronizações entre os estados, o que é essencial para analisar inconsistências no processo. Esse fator é ainda mais importante quando se trata da segurança em transportes sobre trilhos, onde uma falha de segurança pode ser vital para o usuário.

O próximo passo deste trabalho será estender o modelo para detecção de descarrilamento, interdição de circuitos de via e de máquinas de chave.

Referências Bibliográficas

- Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), 2013. Concessões rodoviárias/ apresentação. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br>>. Acesso em: jun. 2013.
- Anschuetz, H. HPSim, 2013. Software para simulação em Redes de Petri. Disponível em: <http://www.winpesim.de>. Acesso em 12/04/2013.
- Cardoso, J., Valette (1997), R. Redes de Petri. Florianópolis, Editora da UFSC, vol.1, pp. 30-49.
- Cheng, Y., Yang, L., (2008). A Fuzzy Petri Nets approach for railway traffic control in case of abnormality: Evidence from Taiwan railway system. Department of transportation, National Cheng Kung University. Taiwan, Roc.
- Fanti, M. P., Giua, A., & Seatzu, C., (2003). A deadlock prevention method for railway networks using monitors for colored Petri nets. IEEE international conference on systems, man and cybernetics. Washington, EUA.
- Freitas, R. ET AL., (2007) Ferramenta baseada em Rede de Petri para modelagem, simulação, programação e supervisão de sistemas de automação. Escola politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Gueiral, M., (2008) Sinalização ferroviária na Estrada de Ferro Vitória Minas. Cia Vale do Rio Doce, MG. Apostila para treinamento do corpo de engenheiros da Vale.
- Missikoff, M., (1998): An object-oriented approach to an information and decision support system for railway traffic control, Engineering Applications of Artificial Intelligence 11, 25-40.
- Mendes, W., (2009). Regulação de Trens em Sistemas Metroviários. Dissertação. Engenharia de Elétrica, Universidade Estadual de Campinas.
- NBR11764, (2011). Aparelho de mudança de via — Máquina de chave — Requisitos e Classificação. ABNT. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/>.
- NBR7635, (2010). Sinalização Ferroviária. ABNT. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/>.
- Palomino, R., (1995) Uma Abordagem para a Modelagem, Análise e Controle de Sistemas de Produção Utilizando Redes de Petri. 120 f. Dissertação. Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Porto, T., (2005) Transporte ferroviário e transporte aéreo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Aula ministrada no curso de Engenharia Elétrica. Disponível em <<http://www.poli.usp.br/d/ptr2501>>. Obtido em 06/04/2013.
- Schubert, A., (2003). Aplicativo para controle de ferrovia utilizando processamento em tempo real e redes de Petri. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências da Computação) - Centro de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau.
- Silvestre, R., (2010) Implementação em Ladder de Sistemas de Automação Descritos por Redes de Petri Interpretadas para Controle. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- STM, (2013). Secretaria de Transportes Metropolitanos. Governo do Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.stm.sp.gov.br/>. Acesso em: 20/06/2013.
- Teague, Olin E., (1976) Automatic Train Control in Rail Rapid Transit. United States Congress, Office of Technology Assessment. 148p.
- Teixeira, V., (2012). Redes de Petri em Intertravamentos de Segurança. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Sistemas de Automação), Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- IG, (2013). IG – Novas Soluções para Superestruturas Ferroviárias. Disponível em <<http://ig-material-ferroviario.blogspot.com.br/>>. Obtido em 04/05/2013.