

## DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE DESEMPENHO E TEMPO DE PARADA DE TRENS METRO-FERROVIÁRIOS UTILIZANDO TEORIA DIFUSA

**Sandro A. Santos**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

**Roberto M. Sales**

Departamento de Engenharia Elétrica

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

### Resumo

Sistemas de transporte metro-ferroviários operando próximo de sua capacidade, como é o caso nos grandes centros urbanos, são particularmente vulneráveis a desvios na sua programação horária de viagens. Parâmetros que atuam como ajustes nesta programação são necessários para manter a operação em níveis aceitáveis. Este trabalho estuda uma a viabilidade do emprego de Teoria Difusa para a implementação de um sistema de controle de nível de desempenho e de tempo de parada nas plataformas, aplicado a trens metropolitanos. Estes parâmetros são determinados pelo Centro de Controle Operacional e visam atuar como um dos elementos responsáveis pela regulação das linhas metro-ferroviárias. A partir da definição de nível de desempenho e do seu papel na operação, é apresentado um método alternativo de cálculo, cuja proposta é controlar as variáveis de saída, Nível de Desempenho e Tempo de Parada, a partir de três variáveis de entrada: horário de operação, fluxo de passageiros e atraso nas partidas dos trens da estação. A modelagem das variáveis lingüísticas e a construção da base de regras nebulosas são baseadas no conhecimento especialista de operação. Um estudo comparativo com o sistema em operação na Linha 5 da CMSP é realizado no final do trabalho. Os modelos foram implementados por meio da ferramenta de simulação Matlab.

### Abstract

Metro lines operating near to capability are particularly vulnerable to disruption in the scheduling time. Parameters used as setpoint in the scheduling are necessary to keep good operation levels. This paper studies the viability of employment of Fuzzy Theory for the implementation of a control system for the variables Performance Level and Stop Time in the platforms, for metropolitan trains. Such variables are computed by the Operational Control Center with regulation purposes for metro lines. In this paper, it is presented an alternative method of load in the trains, whose proposal is to control the two output variables, Performance Level and Stop Time, through the input control variables: time of operation, passengers' flow and trains departure delay in the station. The modeling of the linguistic variables and the construction of the fuzzy rules set were based on the expert knowledge of the operation system. The models were implemented through the simulation tool Matlab.

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de transporte metro-ferroviários no Brasil apresentam regimes de operação muito próximos daqueles observados na situação de capacidade (D'Agosto *et al.*, 2000). O volume de passageiros crescente, aliado à escassez de investimentos em novas linhas de metrô tenderiam a agravar o problema, caso mecanismos de controle operacionais não fossem adotados pelas empresas operadoras. Um destes mecanismos é a chamada regulação da linha.

Sem uma regulação eficiente, os transtornos causados por falhas operacionais ou de manutenção do sistema inviabilizariam a situação dos transportes públicos no plano global de uma cidade.

O Centro de Controle Operacional (CCO) precisa dispor de sistemas que controlem a movimentação dos trens de forma a atender os objetivos propostos através dos recursos oferecidos. Estes recursos são:

- *Trens* chegando nas estações em *intervalos de tempo adequados* a demanda de passageiros;
- *Tempos de Parada* nas estações adequados ao *fluxo de entrada e saída de passageiros*;
- *Duração de Viagem* compatível com as *expectativas dos passageiros*.

Considere, por exemplo, um trem atrasado em relação ao horário nominal da linha. Estando atrasado, o intervalo em relação ao trem anterior é naturalmente maior. Como consequência, as plataformas de embarque também terão mais passageiros à espera do próximo trem. Ou ainda, considere um abrupto volume de passageiros entrando numa determinada estação num período que estatisticamente, costuma ser muito menor. Uma série de eventos não programados estão sujeitos a ocorrerem freqüentemente durante um dia normal na operação comercial de uma linha de metrô (Van Breseugem *et al.*, 1991).

Assim, a regulação se faz necessária para manter os trens circulando dentro de intervalos planejados, onde as estratégias mais básicas consistem em seguir tabelas horárias de viagem fornecidas por um subsistema do CCO, buscando recuperar atrasos através da aplicação de tempos de parada adequados e alteração nos perfis de velocidade nas viagens entre estações.

O mecanismo utilizado pelo Metrô de São Paulo (CMSP) para atuar nos perfis de velocidade nas viagens entre estações recebe o nome de Nível de Desempenho. O nível de desempenho (ND) é um parâmetro de regulação que atua como uma ação de controle do CCO, fornecendo ao equipamento ATO (da sigla em inglês *Automatic Train Operation*) novas taxas de aceleração e frenagem, sempre restritos pelo sistema vital de controle de trens ATP (da sigla em inglês *Automatic Train Protection*).

No CCO do Metro de São Paulo, o Subsistema de Programação de Ofertas (SPO) disponibiliza uma programação horária de eventos que ocorrerão ao longo do dia. Dentre estes eventos, estão: entradas e saídas de trens na linha, comandos de mudanças de modo de operação de equipamentos sob seu controle, limites de lotação e alterações nas listas de tempo de parada e nível de desempenho a serem aplicadas aos trens.

É sob os dois últimos parâmetros citados, nível de desempenho e tempo de parada, que este trabalho pretende atuar, uma vez que as características não-lineares destes parâmetros, possibilitam o estudo do emprego de novas técnicas de controle.

Outras abordagens têm sido também empregadas para o problema da regulação. Como exemplo, no trabalho de Córrea e Milani (2001), os autores consideram o uso de técnicas de controle robusto para o tratamento da questão da regulação de linhas metroviárias.

Neste contexto, o advento da Teoria Difusa, caracterizada por expressar de uma maneira sistemática, quantidades imprecisas, vagas ou mal definidas (Zadeh, 1973), mostrou ser adequada para o estudo do comportamento do tráfego de trens em linhas metro-ferroviárias, como foi proposto no trabalho de Chang (1996).

Neste trabalho propomos a implementação de um controlador nebuloso (Lee, 1990) que calcula os valores de ND e tempo de parada (TP) a serem enviados pelo CCO, baseado em regras implementadas através do conhecimento de operadores especialistas.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 discute o conceito de ND, como é formado e transmitido para os trens. A Seção 3 apresenta uma breve descrição de como funciona o atual sistema de regulação de oferta. Na seção 4, apresentamos uma proposta de implementação de um método alternativo para a determinação de valores on-line de ND e TP convenientes. Um modelo nebuloso do conhecimento especialista, e um conjunto de regras traduzindo este conhecimento do sistema é apresentado na Seção 5 e 6, respectivamente. Um exemplo de aplicação de regras é apresentado na Seção 7 e uma conclusão apontando os principais resultados obtidos é feita na Seção 8.

## 2 PARÂMETROS ND E TP

Os parâmetros ND e TP aqui utilizados correspondem a níveis de desempenho e tempos de parada adotados para a operação comercial em todas as linhas comerciais da CMSP.

O parâmetro TP é fixado em função das características de cada estação, principalmente do fluxo de passageiros, e varia entre 10 e 30 segundos.

A simulação de desempenho vale-se das características físicas e operacionais de cada trecho entre estações para calcular os valores possíveis de ND num trecho entre estações. Dentre os vários fatores envolvidos, podemos citar:

- Comprimento dos circuitos de via, que são divisões da via em blocos, para detecção de ocupação pelo sistema ATP;
- Trem cheio/vazio;
- Gradiente (rampa) do trecho de percurso;
- Perfil de velocidade fornecido pelo sistema ATP no trecho de percurso.

O ND é um parâmetro de regulação do sistema e será enviado pelo ATO ao trem no instante em que ele estiver parado nas plataformas de embarque. O ND que o ATO recebe, seja do CCO ou de qualquer outra sala técnica de controle, representa o tempo de atraso em relação ao tempo mínimo de percurso entre as respectivas estações adjacentes. O ND que o ATO transmite ao trem é uma combinação de 3 parâmetros: *taxa de aceleração, limite de velocidade e taxa de desaceleração para parada na plataforma*.

A transmissão dos parâmetros ND e TP se dá por meio de antenas transmissoras instaladas ao longo das plataformas de embarque, a qual transmite a informação que corresponde ao novo ND.

No software do ATO de cada estação da Linha 5 do Metrô de São Paulo, das 256 combinações possíveis, conforme ilustrado na Tabela 1, estão carregadas 8 combinações de ND, sendo que cada uma representa um tempo de atraso de 3 segundos, em relação ao ND posterior. O ND 0

refere-se a uma viagem sem tempo de atraso, enquanto que uma viagem com ND 7 equivale a uma viagem entre estações com um tempo de atraso de 21 segundos. O *byte* de comando de Modificação do ND tem a seguinte estrutura:

BYTE 1 - Preâmbulo

ST	TA	TA	PP	PP	LV	LV	LV	LV	P	SP
----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	----

onde:

ST: *Start Bit* = 0, no caso de nova mensagem e 1, caso contrário;

SP: *Stop Bit* = 1, no caso de nova mensagem e 0, caso contrário;

P: bit de paridade;

LV: limite de velocidade (em m/s);

PP: taxa de desaceleração na parada programada (em  $m/s^2$ );

TA: taxa de aceleração (em  $m/s^2$ ).

Na Tabela 1 são indicadas as informações codificadas no byte de ND.

**Tabela 1:** Informações codificadas no byte de ND

BIT's 3,2,1,0	LV – Limite de Velocidade (Km/h)
0000	47,5
0001	51,0
0010	54,5
0011	58,0
0100	61,5
0101	65,0
0110	68,5
0111	72,0
1000	75,5
1001	79,0
1010	82,5
1011	86,0
1100	89,5
1101	93,0
1110	96,5
1111	100,0

BIT's 5,4	PP – Taxa de Desaceleração em PP ( $m/s^2$ )
00	0,67
01	0,75
10	0,85
11	-

BIT's 7,6	TA – Taxa de Aceleração (m/s <sup>2</sup> )
00	0,55
01	0,75
10	1,11
11	Propulsão Limitada

Como exemplo, observando a Tabela 1, um trem parado na plataforma que carrega um ND 0 de valor hexadecimal 0xAB, significa que este fará a viagem no tempo de percurso mínimo (de acordo com os limites impostos pelo sistema ATP), com uma taxa de aceleração de 1,11 m/s<sup>2</sup>, limite de velocidade de 86 m/s, e uma taxa de desaceleração na parada de 0,85 m/s<sup>2</sup>.

### 3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

No CCO, o Sistema de Programação de Ofertas (SPO) trabalha hoje com uma programação horária de eventos que ocorrerão ao longo do dia. Dentre estes eventos estão entradas e saídas de trens na linha, comandos de mudanças de modo de operação de equipamentos sob seu controle, limites de lotação e alterações nas listas de tempo de parada e nível de desempenho a serem aplicadas aos trens. Estes parâmetros são calculados de forma off-line, para posterior inserção no sistema de controle de trens.

Apesar de existirem situações operacionais que exijam a intervenção do operador para a mudança dos parâmetros vigentes de ND e TP (ou através de mudança de tabela ou por meio de comandos cujo destino é o ATO de Estação), na maior parte das situações de operação diária, o estado “default” poderia ser modificado dinamicamente, ou com o objetivo de atender a demanda de passageiros ou para atuar no consumo de energia da estação.

O ND, como já mencionado, impõe ao trem um perfil de velocidade com específicas taxas de aceleração e frenagem para este percorrer um trecho entre estações. Na situação de operação comercial, um ND intermediário equivale a um valor próximo de 8.

Dispondo da tabela horária de viagem de cada trem em circulação, é possível estimar o tempo de atraso dos trens. Baseado nas informações de fluxo de passageiros naquele instante (portanto, vinculado ao horário de operação), o CCO aplica para um determinado trem um valor de ND e um TP.

O objetivo do trabalho é propor um modelo nebuloso das variáveis envolvidas (horário de operação, fluxo de passageiros e atraso na partida dos trens, ND e TP) para controle do nível de desempenho e tempo de parada nas plataformas, através de um controlador nebuloso.

As faixas de valores que propomos para os parâmetros de saída são:

- Nível de Desempenho (ND): 0 à 16;
- Tempo de Parada (TP): 10 à 30 segundos.

Nota-se que o número de combinações possíveis de valores de nível de desempenho foi aumentado de 8 para 17, das 256 possíveis, com o intuito de dar maior flexibilidade para o modelo.

## 4 MODELO FUZZY DO CONHECIMENTO ESPECIALISTA

Buscou-se conhecimento especialista através do estudo da especificação técnica do funcionamento da regulação de linhas da CMSP, bem como da pesquisa junto a profissionais ligados ao desenvolvimento do CCO (ALSTOM, 1998a, 1998b). Para isto, foram levantadas algumas situações nas quais as entradas propostas poderiam assumir, bem como seu reflexo nas variáveis de saída, a saber, ND e TP.

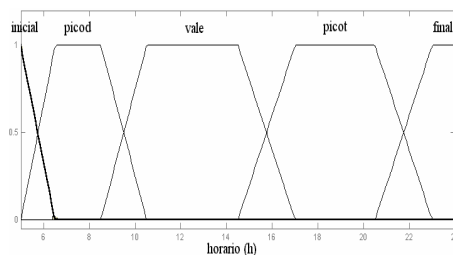
A partir dessas informações, foi possível modelar as variáveis envolvidas, criar a base de regras nebulosas e gerar simulações satisfatórias no Matlab.

### 4.1 Modelo de implementação das Variáveis Lingüísticas

#### 4.1.1 Entradas

O conjunto nebuloso da variável lingüística *horário* é ilustrado na Figura 1, observando-se que a variável representa a divisão do período de operação ao longo do dia dos trens metropolitanos.

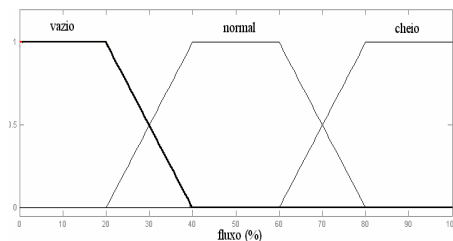
- Variável lingüística: *horário*;
- Universo de discurso: 5-24;
- Valores lingüísticos: *inicial*, *picod* (*pico\_dia*), *vale*, *picot* (*pico\_tarde*), *final*.



**Figura 1:** Função de pertinência da variável lingüística “*horário*”

O conjunto nebuloso da variável lingüística *fluxo* é ilustrado na Figura 2, observando-se que a variável representa o fluxo de passageiros na estação durante um período.

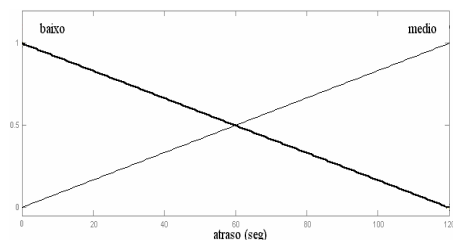
- Variável lingüística: *fluxo*;
- Universo de discurso: 0-100;
- Valores lingüísticos: *vazio*, *normal*, *cheio*.



**Figura 2:** Função de pertinência da variável linguística “fluxo”

O conjunto nebuloso da variável linguística *atraso* é ilustrado na Figura 3, observando-se que a variável representa o histórico de atrasos nas partidas dos trens numa determinada estação durante um período.

- Variável linguística: *atraso*;
- Universo de discurso: 0-120;
- Valores linguísticos: *baixo*, *médio*.

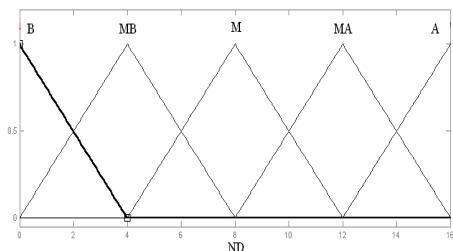


**Figura 3:** Função de pertinência da variável linguística “atraso”

#### 4.1.2 Saídas

O conjunto nebuloso da variável linguística *ND* é ilustrado na Figura 4, observando-se que a variável representa o nível de desempenho determinado pelo CCO a ser enviado para o equipamento ATO de Estação, imposto ao trem para um determinado trecho de via.

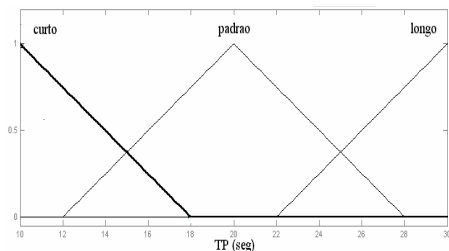
- Variável linguística: *ND*;
- Universo de discurso: 0-16;
- Valores linguísticos: *baixo (B)*, *médio-baixo (MB)*, *médio (M)*, *médio-alto (MA)* e *alto (A)*.



**Figura 4:** Função de pertinência da variável linguística “ND”

O conjunto nebuloso da variável linguística *TP* é ilustrado na Figura 5, observando-se que a variável representa o tempo de parada estipulado pelo CCO para o trem permanecer com as portas abertas na plataforma.

- Variável linguística: *TP*;
- Universo de discurso: 10 - 30;
- Valores lingüísticos: *curto*, *padrão*, *longo*.



**Figura 5:** Função de pertinência da variável linguística “TP”

## 5 BASE DE REGRAS NEBULOSA

O conhecimento especialista que relaciona as diversas variáveis e seus respectivos valores foi resumido na Tabela 2, a qual deu origem à base de regras nebulosas no formato **if-then**.

**Tabela 2:** Base de Regras Nebulosa

atraso	horário	inicial	picod	vale	picot	final
	fluxo					
B	Vazio	N=MA T=L	N=MA T=P	N=A T=L	N=MA T=P	N=MA T=L
	Normal	N=MA T=C	N=M T=P	N=MA T=P	N=M T=P	N=M T=P



	Cheio	N=MA T=P	N=MB T=P	N=M T=P	N=MB T=P	N=MB T=P
M	Vazio	N=MA T=C	N=MA T=C	N=A T=C	N=MA T=C	N=MA T=P
	Normal	N=MA T=P	N=MB T=P	N=MA T=C	N=MB T=P	N=M T=C
	Cheio	N=MB T=P	N=B T=P	N=MB T=P	N=B T=P	N=M T=P

Onde:

A = ALTO                      B = BAIXO  
 C = CURTO                  L = LONGO  
 M = MÉDIO                MA = MÉDIO-ALTO  
 MB = MÉDIO-BAIXO    N = ND  
 P = PADRÃO              T = TP

## 6 UM EXEMPLO DE APLICAÇÃO DAS REGRAS

Para exemplificar a aplicação de controle, simulamos distintas condições operacionais durante o horário comercial.

A etapa inicial do processo é a *fuzzificação* das variáveis de entrada, onde atribuímos a cada uma das entradas (variáveis lingüísticas) conjuntos nebulosos definidos dentro do universo de discurso.

No primeiro exemplo, temos os seguintes valores de entrada para as variáveis modeladas:

- *horário* = 9:30 hs  $\Rightarrow$  é picod com grau de pertinência 0,75 e vale com grau 0,25
- *atraso* = 24s  $\Rightarrow$  é baixo com grau de pertinência 0,8 e médio com grau 0,2
- *fluxo* = 75%  $\Rightarrow$  é cheio com grau de pertinência 0,75 e baixa com grau 0,25

Após essa classificação, o procedimento de inferência verifica na base de regras quais delas são aplicáveis. Na Tabela 3 está indicado o resultado da inferência nas regras envolvidas no exemplo proposto.

**Tabela 3:** Exemplo de aplicação das regras

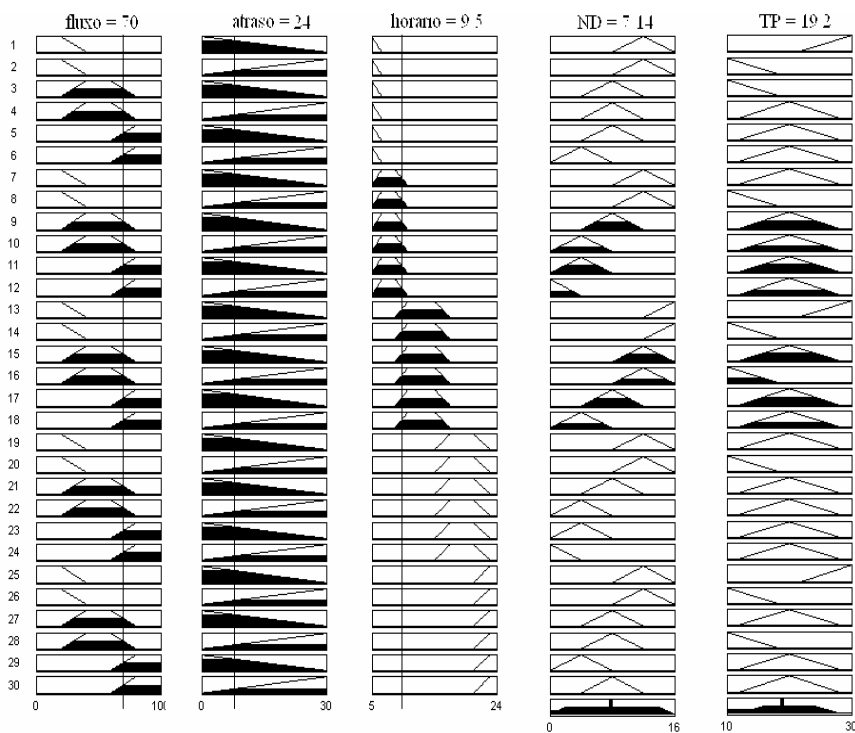
atraso	horário	picod	vale
	fluxo		
B	Vazio	N=MA T=P	N=A T=L
	Normal	N=M T=P	N=MA T=P
	Cheio	N=MB T=P	N=M T=P
M	Vazio	N=MA T=C	N=A T=C
	Normal	N=MB T=P	N=MA T=C
	Cheio	N=B T=P	N=MB T=P

Na aplicação, todas as regras têm 2 antecedentes, os quais estão relacionados com o conectivo **and**, para posterior *interseção* (operador mínimo), tomando-se o valor mínimo entre os dois antecedentes. Para cada regra, o grau de ativação da ação de controle é calculada de acordo com o resultado da combinação de antecedentes.

Terminada a inferência, a ação final de controle é calculada a partir da *união* (operador máximo) das contribuições de cada regra ativada, gerando uma única e nova função.

Apesar de terem sido feitas simulações com outros operadores nebulosos, obteve-se poucas alterações nos resultados obtidos. Assim, optou-se por utilizar os operadores mais comumente utilizados nas aplicações envolvendo controladores nebulosos.

Neste exemplo, utilizou-se o método de centro de área (CDA), que calcula o centro de área da função inferida. A Figura 6 mostra o resultado dos processos descritos neste exemplo.



**Figura 6:** Exemplo de aplicação das regras nas variáveis de saída

Finalmente, no processo de *defuzzificação*, foram determinados os sinais de controle de ND e TP a serem enviados para o equipamento ATO de Estação:

ND = 7.14

TP = 19.2 seg

, que são valores bastante coerentes quando comparados com aqueles fornecidos pelo sistema atual.

Esses valores podem ser interpretados como ações graduais do sistema na tentativa de ajustar a regulação, face ao reduzido, porém existente, atraso na chegada de um determinado trem na estação. As ações a serem tomadas caracterizam-se por uma sutil redução do tempo de parada nas plataformas, em conjunto com uma leve redução do valor do nível de desempenho, diminuindo o tempo de percurso na viagem deste trem até a estação seguinte.

## 7 RESULTADOS E CONCLUSÕES

A modelagem apresentada neste trabalho teve o objetivo de avaliar a viabilidade do uso da Teoria Difusa com o objetivo de atuar na regulação de linhas metro-ferroviárias, do sistema de controle de trens utilizados pelo Metrô de São Paulo.

Quando comparados a um sistema em operação, por exemplo, a Linha 5 da CMSP (ALSTOM, 2001), vemos que o sistema mantém uma tabela horária com lista de tempo de parada e de níveis de desempenho inalteradas durante o período das 07:01 Hs até às 12:01 Hs, em todas as estações do trecho entre Capão Redondo e Largo Treze. Esses valores são, considerando-se o mesmo universo de discurso do modelo proposto: TP de 20 segundos e ND de 2,3.

Pelo modelo, tais parâmetros ocorreriam numa situação de pico da manhã, com lotação máxima e um reduzido atraso na chegada do trem (em torno de 10s). Isto significa que o modelo considera razoável que níveis de desempenho menores sejam necessários para situações onde uma oferta grande se faz necessária, em função do horário de pico, ou também quando é preciso compensar atrasos significativos na tabela horária.

À medida que o horário de pico termina, os tempos de viagem podem se tornar ligeiramente maiores, trazendo como consequência direta, redução do consumo de energia, sem comprometer a operacionalidade do sistema.

Os resultados obtidos mostram a viabilidade de se encontrar dinamicamente os valores de TP e ND que cumprem o Programa Horário de Viagens.

Com relação as variáveis utilizadas, a idéia da variável “fluxo” proposta neste trabalho foi a de monitorar a diferença do número de passageiros que chegam nos trens e embarcam nas plataformas de uma determinada estação, com a quantidade de passageiros que saem desta. Isto é garantido pelo sistema atual do CCO de 2 maneiras: através do controle de arrecadação de passageiros nas catracas, e por meio de controle estatístico das linhas controladas.

Um levantamento estatístico das origens mais comuns dos atrasos e seus valores para cada situação operacional contribuiriam para a determinação da função de pertinência da variável

lingüística “atraso”, aumentando o grau de confiança no modelo proposto. Isto será implementado em modelos futuros.

O uso da ferramenta Matlab facilitou o trabalho de forma considerável, pois fornece um ambiente preparado, facilitando a realização de eventuais ajustes dos modelos nebulosos, bem como da observação do comportamento das variáveis de saída de acordo com a aplicação das regras nebulosas.

Um modelo nebuloso contemplando outros itens do programa de oferta, como Partida de Trens nas estações terminais e manobras serão objeto de estudo de trabalhos futuros. Para isso, muitos outros parâmetros são influentes no controle a ser desempenhado, como distribuição do intervalo de trens, folga de lotação, *headway* (intervalo médio entre trens numa estação), nível de conforto e outros.

#### Agradecimentos

O autor agradece a empresa Alstom do Brasil LTDA., por ceder as informações e documentos relevantes para a elaboração deste trabalho.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALSTOM (1998) Especificação Técnica do Equipamento ATO de Estação, São Paulo.
- ALSTOM (1998) Memorial Descritivo do Sistema de Movimentação de Trens, São Paulo.
- ALSTOM (2001) Especificação Técnica do Subsistema de Programação de Oferta, São Paulo.
- Chang, C. S. e Thia, B. S. (1996). Online Rescheduling of mass rapid transit systems: fuzzy expert system approach, *IEEE Proceeding Electrical*, v. 143, n. 4, p. 307-316.
- Côrrea, S. S. e Milani, B. E. (2001). Regulação Robusta de Tráfego em Linhas de Metrô, *Automação e Controle*, v. 12, n. 2.
- D’Agosto, M. A.; Gonçalves, A. F. M.; Campos, V. B. G. (2000). Uma aplicação comparativa para determinação do desempenho operacional de sistema de transporte ferroviário urbano considerando uma abordagem probabilística, *Anais do XIV Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, ANPET, Gramado*, v.1, p. 447-458.
- Lee, C. C. (1990). Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part II, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v. 20, n. 2.
- Zadeh, L. A. (1973). Outline of New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v. 3, n. 1.

---

Sandro A. Santos ([sandro.santos@transport.alstom.com](mailto:sandro.santos@transport.alstom.com), [sandro.aparecido@poli.usp.br](mailto:sandro.aparecido@poli.usp.br))

Roberto Moura Sales ([roberto@lac.usp.br](mailto:roberto@lac.usp.br))

Departamento de Automação e Controle (LAC) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Luciano Gualberto, Trav. 3, nº 380 – CEP: 05508-900 - São Paulo, SP, Brasil