

Tráfego urbano controlado por computador: uma visão lógico-matemática

RUDOLF SKANDERA *
e LARRY KERSCHBERG **

1. Introdução; 2. Caso geral; 3. Tráfego de rua; 4. Tráfego de túnel e ponte; 5. Conclusão.

1. Introdução

Há 10 anos que cidades americanas, canadenses e européias tais como San José (Califórnia), Fort Lauderdale (Flórida), Nova Iorque, Toronto ou Londres são beneficiadas por um controle de processos na administração do tráfego ou transporte, baseado em computadores eletrônicos, o que ultimamente também foi estendido a muitas outras tarefas da administração urbana. Durante a década de setenta, será instalado o controle eletrônico do tráfego em muitas outras cidades da América e da Europa.

Tem-se levado em consideração a possibilidade do controle dos sinais luminosos de tráfego para cidades brasileiras como o Rio de Janeiro e São Paulo. Durante os últimos anos este assunto tem sido freqüente-

* Assessor da coordenação de assistência técnica para a Reforma Administrativa da EBAP.

** Professor do Departamento de Processamento de Dados da PUC/GB.

mente debatido através da imprensa. Não se discute se a eletrônica finalmente chegará à Baía de Guanabara, e sim quando. Ao chegar, será baseada num conjunto de proposições lógico-matemáticas conhecido de forma geral pelo nome de controle de processos. A intenção deste artigo é explorar os principais argumentos desta lógica e de maneira particular suas implicações com a administração das áreas urbanas. Desta forma esperamos que sirva como um ponto de partida para engenheiros e administradores, permitindo um estudo mais profundo do assunto, quando finalmente se virem face a face com o problema.

2. Caso geral¹

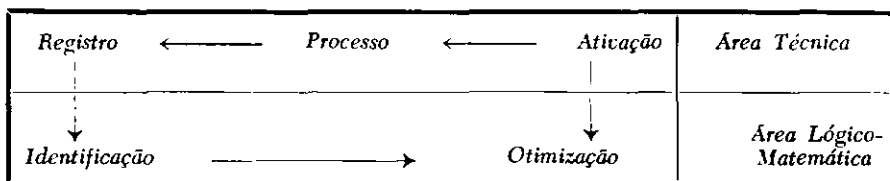
Como uma proposição geral, o controle de processos visa a regular, com o auxílio de computadores eletrônicos e em tempo real, todas as variáveis e interações de processos dinâmicos de diferentes espécies. Seu princípio operacional é um circuito fechado: retroalimentação do sistema de dados registrados por instrumentos de medição e alimentação de dados captados que ainda não afetaram o sistema.

Os dados registrados são *identificados* em termos de parâmetros de variáveis dos processos, e os parâmetros observados são comparados com os valores desejados (ideais ou teóricos) do modelo relevante: a diferença entre eles inicia ajustamentos da variável ou variáveis controladas, de forma que os atuadores físicos podem comunicar estes ajustamentos ao processo em andamento.

Em termos simplificados, portanto, controle de processos dentro de qualquer sistema (produção ou tráfego) consiste em dois tipos de proposições lógico-matemáticas correspondentes a dois tipos de esquemas técnicos: identificação e otimização, de um lado, e registro e ativação do outro. Esta idéia geral está ilustrada no gráfico 1.

Gráfico 1

DOIS ASPECTOS DO CONTROLE DE PROCESSO



Este artigo se refere, em termos genéricos, apenas à parte da otimização do aspecto lógico-matemático.

¹ Cf., Skandera, Rudolf. Process control and interactive computing: emergent style of business and industrial management, *Internacional Review for Management and Material Science*, 9, 1969-6, 57-70; ver também do mesmo autor Process control in petroleum industry. *Revista Brasileira de Economia*, 25, 2, Abr./jun., 159-229.

Enfim o que se deseja é um sistema cibernético que seja auto-regulável de acordo com critérios preestabelecidos e no qual as leituras registradas controlem o curso futuro do processo, de forma totalmente automatizada. O objetivo geral de tal sistema pode ser enunciado como a otimização, maximização ou minimização de alguma função objetiva durante um determinado período de tempo: ²

$$\int_0^T f(u(t)) dt \quad / \quad \text{ótimo} \quad (1)$$

A quantidade otimizada é a integral da função de uma ou mais quantidades variáveis; e os ajustamentos surgem através das mudanças (ou são funções destas) na variável manipulada, Δm . Esta variável, m , é um parâmetro da lei de controle, Φ ; e seus ajustamentos são alguma função da diferença, Ψ , entre a medida observada da quantidade de saída, $a(t)$, e a medida desejada, $b(t)$. Então temos:

$$u(t) = \phi (\Delta m(t)), \quad (2)$$

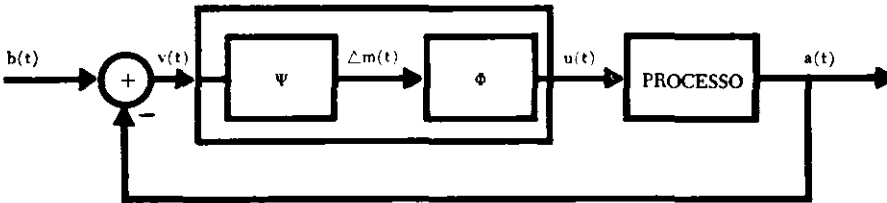
$$\Delta m(t) = \psi (v(t)), \quad e \quad (3)$$

$$v(t) = a(t) - b(t) \quad (4)$$

O *objetivo operacional* do sistema é manter esta diferença $v(t)$ tão próxima a zero quanto possível. O fluxograma deste sistema de controle é mostrado no gráfico 2.

Gráfico 2

UNIDADE DE RETROALIMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE



3. Tráfego de rua

O princípio do circuito fechado que tem sido aplicado com sucesso ao controle do fluxo de petróleo através de oleodutos foi estendido analogamente ao fluxo dos automóveis nas artérias de uma cidade. Várias téc-

² Naturalmente, tal otimização não deve ser entendida no sentido absoluto ou matemático. Em razão da complexidade do sistema controlado, sua descrição matemática não é possível, ou o tempo de computador para que se obtenha os valores de otimização pode ser muito longo para que tenha utilidade prática. Assim, é conseguida apenas uma subotimização de um sistema complexo, qualquer que seja o estágio de desenvolvimento tecnológico ou matemático.

nicas foram desenvolvidas, cada uma satisfazendo a certas metas ou critérios desejados. Serão discutidos dois enfoques às condições brasileiras.

Um deles é o caso em que os sinais são em uma única artéria, onde o objetivo é regular os mesmos de modo que um automóvel possa ir de um extremo da rua ao outro sem parar, desde que seu motorista mantenha uma determinada velocidade. A parte verde do ciclo verde-vermelho que permite que tal aconteça é chamada faixa livre (*bandwidth*) para aquela direção. O enfoque tradicional do controle de tráfego tem sido maximizar a duração da faixa livre em uma direção, mantendo a faixa livre na outra direção dentro de algum limite especificado. Este problema tem sido resolvido como um programa linear de integrais mistas, e tais técnicas têm dado bons resultados como na cidade de Fort Lauderdale, onde a concentração urbana não é excessiva.³

A julgar pelas notícias de jornais os técnicos de tráfego do Rio de Janeiro pensaram em usar o critério da maximização da faixa livre para a Av. Atlântica, proporcionando a um veículo o tráfego ininterrupto, desde que mantida uma determinada velocidade. Entretanto pesquisas têm demonstrado que se a rede de artérias de uma cidade for tratada de maneira arbitrária, será difícil obter, conseqüentemente, uma faixa livre não igual a zero para cada rua que intercepta uma determinada artéria. E mais, no Rio de Janeiro, onde o tráfego é pesado, adotado o critério de maximização da faixa livre, há uma tendência a aparecerem engarrafamentos mesmo nas artérias. Sendo assim, este critério tem utilidade limitada para cidades como Rio de Janeiro e São Paulo.⁴

Um outro critério seria o atraso total dos veículos na rede. O primeiro sistema desta espécie foi desenvolvido para a cidade de San José na Califórnia, pelos pesquisadores da IBM em cooperação com os técnicos de tráfego da cidade. A rede de San José, que tem dado bons resultados, encontra-se esquematizada no gráfico 3.

De acordo com a Chang, A. (*Synchronization of Traffic Signals in Grid Networks, IBM Journal of Research and Development, II, (4), Jul. p. 440, 1967*), o objetivo desta abordagem esquematizada é determinar o conjunto otimizador de sinais de tráfego, ou encontrar parâmetros dos sinais que minimizarão o atraso total no sistema. Assim a integral otimizada mencionada acima, (1), pode ser, agora, formulada da seguinte maneira:

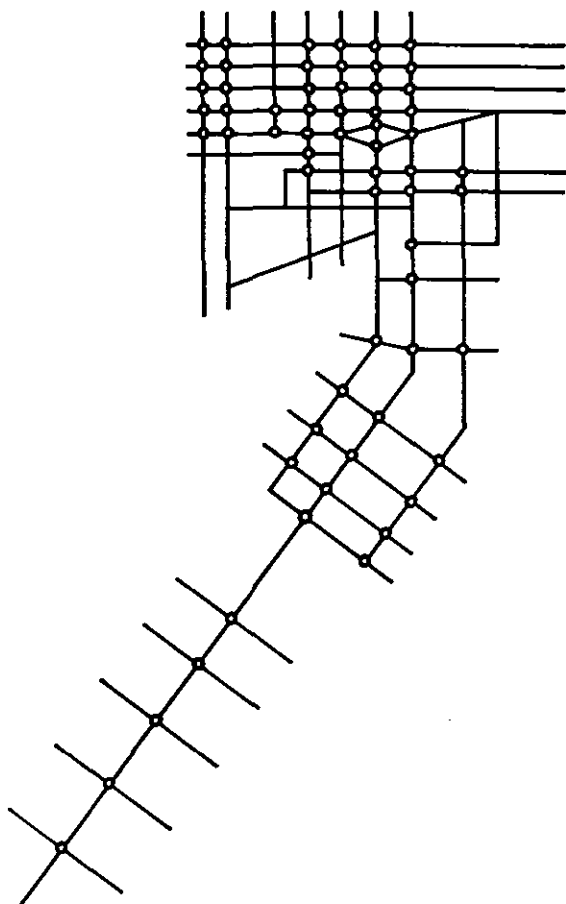
$$D = \sum_j \int_0^T q_j(t) dt / \text{MINIMUM.} \quad (5)$$

³ Cf. Little, J. D. The synchronization of traffic signals by mixed interger programming. *Working paper, Sloan school of management. MIT, ag. 1965, p. 125-65.*

⁴ Cf. Helly, W. & Baker, P. G. Accelerated noise in a congested signalized environment. *Report R. D., Engineering Department of the port of New York Authority, Jun., 1965, p. 65-72.*

Gráfico 3

OS SINAIS DE TRÁFEGO SOB CONTROLE DE COMPUTADOR
NO CENTRO DE SAN JOSÉ, CALIFÓRNIA



Na expressão (5) o símbolo $q_j(t)$ representa o comprimento da fila de carros na interseção j , no tempo t . O comprimento da fila é uma das principais variáveis físicas do sistema.

Consideremos i e j como duas interseções com sinais e o tráfego movendo-se de i para j ; e ainda que todos os carros se movam à mesma velocidade, v . Consideremos ainda que $f_i(t)$ representa a taxa de fluxo de automóveis que saem da interseção i em direção a j num tempo t ; essa taxa é expressa em unidades de carros por segundo. Deve-se notar que as taxas de fluxo são definidas nas interseções e não nas ruas que as ligam e que a natureza dos carros é menosprezada, considerando-se

assim o tráfego como um fluxo contínuo. Nesta acepção, portanto, o modelo é discreto no espaço, mas contínuo no tempo.⁵

Novamente, os fluxos nas ruas que constam as interseções são considerados iguais aos nas próprias interseções, admitindo-se o intervalo de tempo. Naturalmente, isto não é observado na prática. Mas numa situação tipicamente brasileira a dispersão de velocidades de fato não é importante, a não ser que o sistema cubra áreas que requeiram um tempo relativamente longo para sua travessia. Em tais casos a velocidade de cada carro seria vista como uma variável aleatória, com alguma dispersão e seria necessário considerar os movimentos dos veículos não somente nas interseções mas também entre elas.

Então em qualquer ponto P, afastado de j pela distância p, na ausência de uma fila em j estendendo-se até P, a taxa de fluxo é dada pela taxa em i, retardada pelo tempo de viagem até P:

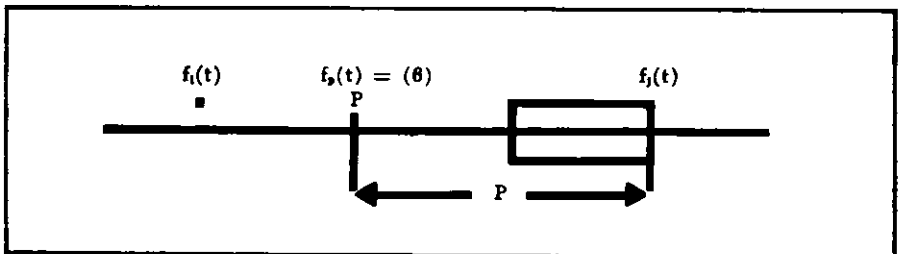
$$f_p(t) = f_i \left(t - \frac{d_{ij} - p}{v_{ij}} \right) \quad (6)$$

onde d_{ij} é a distância entre as duas interseções.

Uma esquematização dessa proposição é dada pelo gráfico 4.

Gráfico 4

TAXAS DE FLUXO ENTRE INTERSEÇÕES



O número de carros de uma fila, em uma interseção pode ser facilmente expresso em termos do seu valor inicial e o fluxo fora da fila (da interseção até a interseção adjacente anterior). Supõe-se que o comprimento da fila seja proporcional ao número de carros da mesma. Por conseguinte, ρ_j representa o comprimento por carro na fila em j, dependendo do número de pistas da rua que liga i a j. Usando a fórmula 6, a fila em j, num tempo t, é dada pela fórmula seguinte:

$$q_j(t) = q_j(0) - \int_0^t \left[f_j(\tau) - f_i \left(\tau - \frac{d_{ij} - \rho_j q_j(\tau)}{v_{ij}} \right) \right] d\tau \quad (7)$$

⁵ Cf. Chiang, A. Synchronization of traffic signals in Grid Networks. *IBM Journal of Research and Development*, 11, 4, Jul. 1967, 436-441.

onde se supõe que o comprimento da fila $p_j q_j(\tau)$ seja menor do que d_{ij} no intervalo $(0, t)$.

Para definir a variável fluxo, $f_j(t)$ supõe-se que os carros deixem as filas numa taxa fixa r_j , expressa em carros/segundo, acelerando até uma velocidade desejada em um período de tempo desprezível. A variável é determinada por duas funções indicadoras de $q_j(t)$. Destas, I_{sj} recebe o valor de 0 se o sinal em j está vermelho, e o valor 1 se o sinal está verde; a outra, I_{qj} , recebe o valor 0 se não há fila em j , e o valor 1 se há fila. Com estes dois componentes combinados, o fluxo partindo de j é dado pela fórmula seguinte:

$$f_j(t) = I_{sj}(t) \left\{ r_j I_{qj}(t) + [1 - I_{qj}(t)] f_i \left(t - \frac{d_{ij}}{v_{ij}} \right) \right\}. \quad (8)$$

Essas funções podem assumir três possíveis valores:

(1) $f_j(t) = 0$, se $I_{sj}(t) = 0$, isto é, se o sinal está vermelho (o amarelo sendo ignorado ou somado à fase vermelha ou à verde);

(2) $f_j(t) = r_j I_{sj}(t) = 1$ e também $I_{qj}(t) = 1$, isto é, o sinal está verde e há uma fila, ($q_j(t) > 0$); e

(3) $f_j(t) = f_i(t - \frac{d_{ij}}{v_{ij}})$ se $I_{sj}(t) = 1$ enquanto $I_{qj}(t) = 0$, isto é,

o sinal está verde e não há fila em j , ($q_j(t) = 0$), então o valor é o próprio do fluxo de tráfego de i atrasado pelo tempo de viagem d_{ij}/v_{ij} .

Este modelo de interseção, que não apresenta dificuldades, proporciona um método para a simulação de condições reais de tráfego. As vantagens de um modelo operacional são óbvias. É possível simular uma grande variedade de condições de fluxo de tráfego (*rush* da manhã, hora do almoço, *rush* da tarde); várias estratégias de controle podem ser testadas no modelo, sem que sejam jamais mudadas as faixas livres atuais dos sinais de tráfego; o modelo pode ser atualizado periodicamente, para considerar a construção de novas ruas, e pode ser mais sofisticado pela introdução de parâmetros como a capacidade da rua, ou dobras à esquerda permitidas nas interseções; a utilização de um modelo a longo prazo pode incluir o planejamento da rede, planejamento do uso do espaço disponível, relações entre o uso de veículos particulares e o rápido trânsito do transporte coletivo, e assim por diante.

4. Tráfego de túnel e ponte

O problema de tráfego de uma megalópole como o Rio, imprensada por baías e montanhas, não pode ser otimizado a não ser que o controle das ruas seja coordenado com o controle dos túneis e pontes. Por exem-

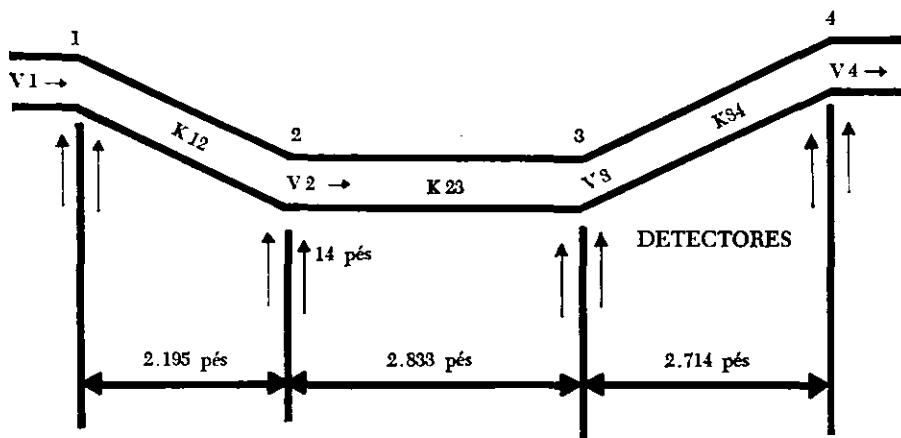
plo, um congestionamento de tráfego em Copacabana pode ser sentido em Botafogo, enquanto que um acidente no Rio Comprido pode afetar o tráfego do Túnel Rebouças e do Jardim Botânico. Assim, no futuro, será necessário considerar, dentro de um mesmo sistema, o centro da cidade, Avenida Brasil, Ponte Rio-Niterói, Auto-Estrada Barra-Leblon, Túnel Dois Irmãos, Túnel Rebouças, Túnel Santa Bárbara, o projetado Túnel da Avenida Carioca, em conjunto com áreas residenciais como Copacabana, Leblon, Ipanema, Botafogo, Cosme Velho e Flamengo.

O tráfego em túneis e pontes difere do tráfego em ruas, porque seu acesso é restrito tanto por suas características geométricas, quanto pela capacidade de fluxo de entrada e saída. A experiência tem demonstrado que um congestionamento dentro de um túnel reduz o escoamento. Este fenômeno é devido às reduzidas propriedades de aceleração de carros que acabaram de diminuir a marcha ou parar. Mantendo-se menos carros dentro de um túnel é possível espaçá-los mais propriamente, aumentando a velocidade e aumentando assim o escoamento total do túnel.

A filosofia geral, nesse caso, é aumentar o escoamento restringindo os insumos nas entradas dos túneis ou pontes, assim prevenindo congestionamentos, sem no entanto "estrangular" as facilidades do túnel ou da ponte.⁶ Para tanto, divide-se um túnel ou ponte em seções, com mecanismos de registros que fornecem ao sistema informações sobre o comprimento dos carros e suas velocidades. Uma representação gráfica do Lincoln Tunnel (Cidade de Nova Iorque) é mostrada no gráfico 5.

Gráfico 5

CONFIGURAÇÃO DO TUBO SUL DO LINCOLN TUNNEL
(FORA DE ESCALA)



⁶ Cf., Gaziz, Denis C. & Foote, Robert S. Surveillance and control of tunnel traffic by digital computer. *Transportation Science*, 3 Ago. 1969, 255-75.

De acordo com Gaziz, Denos G. e Foote, Robert S. (Surveillance and control of tunnel traffic by on-line digital computer. *Transportation Science*, 3 (3): Ago. 1969, p. 256) se $V_{ij}(k)$ representa o número de carros na seção ij , no fim de um período K de observação, então o número de carros naquela seção durante o período de tempo de observação $(K + 1)$ é:

$$V_{ij}(k + 1) = V_{ij}(k) + N_i(k + 1) - N_j(k + 1) \quad (9)$$

onde $N_i(k + 1)$ e $N_j(k + 1)$ representam o número de carros passando pelos detectores i e j durante o intervalo $(k, k + 1)$.

Note-se que substituindo-se em (9) os valores nominais para $V_{ij}(0)$, $N_i(1)$, $N_j(1)$, $i = \{0, 1, \dots, n-1\}$, $j = i + 1$, é possível calcular-se os valores subseqüentes de V_{ij} . Infelizmente, as taxas de fluxo dentro do túnel variam, os motoristas trocam de pistas, os veículos cortam passagem, modificando, assim, as taxas ideais de fluxo.

Por essa razão é necessário desenvolver uma estratégia de controle que maximize o escoamento. A função *performance* a ser otimizada é:

$$P = \max \sum_{\substack{i=0 \\ j=i+1}}^{n-1} \sum_{k=1}^T V_{ij}(k) / \text{OPTIMUM}, \quad (10)$$

onde n representa o número de detectores no sistema.

Antes de desenvolver a estratégia de controle utilizando todos os n detectores, apresenta-se um controle simplificado de algoritmos, baseado em medições de um detector. Se há uma tendência a que um congestionamento ocorra num ponto l o algoritmo comparará a velocidade do veículo $V_l(k)$, com a velocidade do congestionamento, predeterminada, V_c , para determinar o valor binário da variável de controle durante o período de observação K . Assim, na seguinte fórmula:

Se $v_l(k) > v_c$ então $C(k) = 0$ (nenhum controle) de outra forma $C(k) = 1$ (Pare entrada de tráfego). (11)

Um algoritmo mais sofisticado leva em consideração o número de carros na seção $l-1, l$, e o valor prévio da variável de controle.

Se $v_l(k) > v_c$ então $C(k) = 0$.

De outra forma $C(k) = R [V_{l-1,l}(k) - P - Q.C(k - 1)]$,

onde R é a *Unit step function*:
$$R(x) = \begin{cases} 0 & \text{Se } x < 0 \\ 1 & \text{Se } x \geq 0; \end{cases} \quad (12)$$

e P, Q são constantes determinadas experimentalmente.

O sistema de detector único não leva em consideração eventos em outras partes do túnel que possam gerar congestionamento. Usando os n detectores podem ser obtidos perfis de tráfego do túnel em toda sua extensão. Um *vetor perfil* é definido como $N -$ upla, que consiste de um registro de carros em cada seção do túnel.

$$V(k) = [V_{01}(k), V_{12}(k), \dots, V_{n-1,n}(k)] \quad (13)$$

Represente-se o vetor perfil da curva de congestionamento por V_{cp} . Consegue-se um conjunto desses vetores por meio de dados experimentais, obtidos com facilidade sob condições de ausência de controle; cada vetor representa uma configuração de tráfego que se desenvolverá em uma configuração de congestionamento dentro de 15 minutos ou menos. Uma superfície livre, $f = f(V_{cp})$, pode ser traçada por estes pontos no “espaço do perfil”. A seguir uma função distância, $d(f, V(k))$, mede a distância entre um vetor perfil arbitrário e a superfície. Se a distância $d(f, V(k))$ excede a distância mínima predeterminada, d_{min} , não se toma nenhuma medida de controle; do contrário usa-se controle total do *input*. O algoritmo é:

$$\text{Se } d(f, V(k)) > d_{min} \quad \text{então } C(k) = 0; \quad (14)$$

De outra forma $C(k) = 1$.

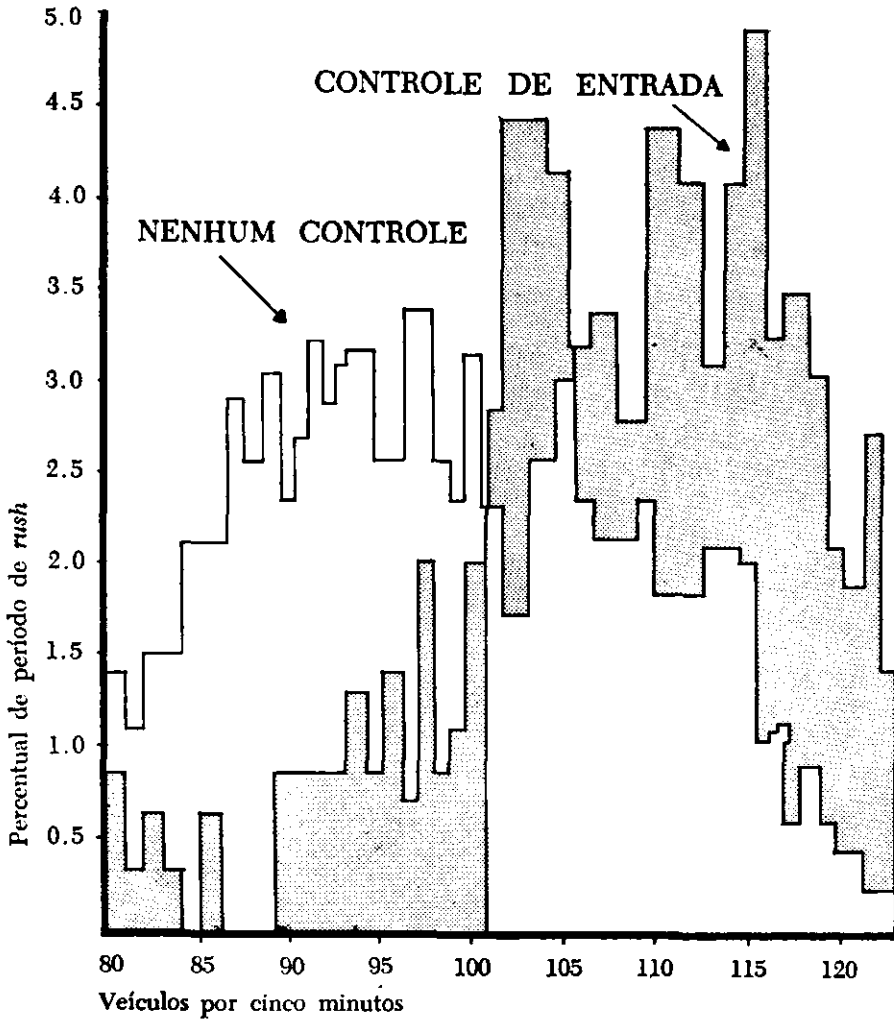
Finalmente, a filosofia de controle mais desejável incorpora tanto o controle da entrada quanto controles em vários pontos dentro do túnel. Estes controles podem ser sinais luminosos (amarelo e verde) para indicar ao motorista a ação corretiva, de forma a evitar o congestionamento (perfis).

5. Conclusão

O objetivo desse artigo foi apresentar os conceitos lógico-matemáticos do controle de processo aplicado ao controle do tráfego. A meta foi familiarizar o leitor com as técnicas de criação de modelo, simulação e controle do tráfego urbano. A tecnologia que cerca este problema está bem desenvolvida e pode ter aplicações diretas com as demandas de um futuro não muito distante em cidades brasileiras como Rio e São Paulo.

É importante entender que, para se usar com proveito as vias existentes e outras que virão, é necessário introduzir-se alguma forma de controle por computador. Por exemplo, pode ser observado no Gráfico 6 que o escoamento do Lincoln Tunnel durante as horas de maior afluência de tráfego aumentou em quase 100%, depois de aplicado o controle de entrada.

RESULTADOS COM E SEM CONTROLE NO LINCOLN TUNNEL, DURANTE ABRIL (Cf. Gaziz e Foote, p. 270)



O primeiro passo para a automatização do tráfego de uma cidade é o completo estudo da rede de tráfego existente, coleta de dados sobre o comportamento do tráfego por hora, dia, mês e ano. O segundo passo é a construção de um modelo e estudos de simulação que levariam aos algoritmos teóricos de controle. O terceiro passo é uma estimativa rea-

lista das necessidades presentes e futuras de computação e a compra do equipamento necessário. O último passo no processo de automatização é o teste, a regulação e a manutenção de um sistema de controle por computadores.

Summary

The object of this paper is to present the logico-mathematical concept of process control as applied to the control of traffic in urban streets, tunnels, or bridges. It is intended to acquaint the reader with techniques of modeling, simulation, or control of urban traffic. The technology associated with this problem is well developed and has direct applications to the not-too-distant future requirements of Brazilian cities like Rio de Janeiro or São Paulo. It is important to realize that to use to best advantage the existing roadways as well as new facilities, it is necessary to introduce some form of computer control. One design criterion is to determine and establish with the aid of computers optimal setting of traffic signals, that minimize the total vehicular delay in the network. A related tunnel or bridge-traffic problem requires restriction of input to the facility so as to maximize its throughput. It is interesting to observe that in this manner the throughput performance of the Lincoln Tunnel, for example, during a peak traffic period, was increased by almost one hundred per cent.

The first step in the automation of a city's traffic is a complete and thorough study of the existing traffic network, the gathering of data concerning hourly, daily, monthly, and yearly traffic behavior. The second step consist of model building and simulation studies which then lead to theoretical control algorithms. The third step is a realistic estimate of present and future computing needs, and the purchase of the required equipment. The last step in the automation process is the testing, tuning, and maintenance of the on-line computer control system.

REEMBOLSO POSTAL

OBSERVAÇÃO IMPORTANTE:

A fim de simplificar e tornar mais rápido o envio de pedidos de publicações da Fundação Getúlio Vargas, sugerimos o uso do reembolso postal, que beneficiará principalmente às pessoas residentes em locais afastados dos grandes centros. Assim, na ausência, em sua cidade, de representantes credenciados ou livrarias especializadas, dirija-se diretamente pelo reembolso ao

SERVIÇO DE PUBLICAÇÕES

PRAIA DE BOTAFOGO, 188 — CAIXA POSTAL, 21.120, ZC-05,
RIO DE JANEIRO — GB.