

Universidade de São Paulo

Escola Politécnica

Departamento de Engenharia Mecânica

Estudo de um Sistema de Automação do Transporte Coletivo

Daniel Vilela

Marlos Bonelli Leonel

Orientador: Prof. Dr. José Sotelo Jr.

São Paulo

1.999

*aprovado
Prof. Sotelo Jr.
12/03/99*

Daniel Vilela

Marlos Bonelli Leonel

Estudo de um Sistema de Automação do Transporte Coletivo

E.P.U.S.P.

Departamento de Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. José Sotelo Jr.

São Paulo

1.999

*"O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus
sonhos."*

-Eleanor Roosevelt

Agradecimentos

Agradecemos a todas as pessoas envolvidas neste trabalho, pessoas que nos mostraram caminhos, pessoas que nos acompanharam e até aquelas que participaram com um simples gesto ou informação. Agradecemos aos nossos pais, amigos e familiares por nos darem suporte em todos os aspectos, mesmo não estando envolvidos diretamente com a pesquisa, mas estimulando nosso lado humano. Por fim, agradecemos ao Prof. Dr. José Sotelo Jr. que foi a pessoa que acreditou e apostou que a idéia daria frutos.

Sumário

1. RESUMO.....	8
2. ABSTRACT.....	9
3. INTRODUÇÃO	10
4. ESTUDO DE VIABILIDADE	11
4.1. SISTEMAS DE TRANSPORTE ATUAIS	11
4.1.1. <i>Características dos Sistemas de Transporte</i>	11
4.1.2. <i>Pesquisa de Campo</i>	15
4.2. SISTEMA DE TRANSPORTE AUTOMÁTICO FLEXÍVEL (STAF)	20
4.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS EXISTENTES E O PROPOSTO	26
4.4. ESTIMATIVA DOS CUSTOS DO SISTEMA	27
5. MODELAGEM DINÂMICA DE ÔNIBUS URBANO	28
6. ESTUDOS SOBRE O SISTEMA DE CONTROLE	30
7. RESULTADOS OBTIDOS.....	37
8. CONCLUSÕES	43
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

Lista de Figuras

Figura 1 - Participação percentual do transporte particular x transporte coletivo na Grande São Paulo.....	pág. 12
Figura 2 - Percentual de participação dos meios de transporte coletivo na Grande São Paulo.....	pág. 12
Figura 3 - Esquema de funcionamento do STAF.....	pág. 21
Figura 4 - Esquema de comunicação entre os veículos no comboio.....	pág. 22
Figura 5 - Possível esquema de pistas para o STAF na cidade de São Paulo.....	pág. 23
Figura 6 - Descrição das variáveis utilizadas no controlador.....	pág. 30
Figura 7 - Ganho do erro de separação variável.....	pág. 35
Figura 8 - Diagrama de blocos representando o modelo do ônibus + controlador.....	pág. 37
Figura 9 - Diagrama de blocos do ônibus.....	pág. 38
Figura 10 - Perfil de Velocidades Entre Estações...	pág. 39
Figura 11 - Velocidade dos ônibus no comboio.....	pág. 40
Figura 12 - Acelerações impostas aos ônibus no comboio.....	pág. 40
Figura 13 - Distância entre dois ônibus no comboio.	pág. 41
Figura 14 - Distância dos ônibus em relação ao líder do comboio.....	pág. 41

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Coleta de Dados - Corredor de Ônibus Av. Marquês de São Vicente.....	pág. 17
Tabela 2 - Coleta de Dados - Linha Azul do Metrô...	pág. 18
Tabela 3 - Coleta de Dados - Linha Verde do Metrô..	pág. 18
Tabela 4 - Sumário dos Dados - Metrô.....	pág. 19
Tabela 5 - Números comparativos dos sistemas de transporte convencionais x estimativas do STAF.....	pág. 26
Tabela 6 - Estimativa de custos dos subsistemas para um ônibus.....	pág. 27

1. RESUMO

O trabalho em desenvolvimento tem como objetivo estudar um sistema de transporte automatizado flexível (STAF) formado por comboios de ônibus que, utilizando faixas dedicadas das vias públicas já existentes nas grandes cidades, possam obter um melhor rendimento que os sistemas atuais, aumentando a capacidade de passageiros por km transportado e reduzindo os tempos de viagem e intervalos entre veículos. Para se chegar a este objetivo é proposto um sistema de controle automatizado para veículos e vias, minimizando a atuação do motorista nos trechos automatizados da linha e que, através de uma série de sensores nos veículos e na pista e sistemas controladores que se comunicam intensivamente, aumente a velocidade média do conjunto diminuindo expressivamente a distância entre veículos, conduzindo-os em "comboios" nas faixas dedicadas, com paradas pré-programadas em "estações" nos canteiros centrais das vias utilizadas. É realizado um estudo de viabilidade do sistema proposto, analisando a relação custo/benefício em relação aos sistemas convencionais de transporte de pessoas (automóvel, ônibus, metrô e trem urbano). O trabalho analisa um controlador adaptativo adequado para esta tarefa usando dados e informações disponíveis sobre o comportamento dinâmico desses comboios. A operação do sistema é simulada em modelos matemáticos.

2. ABSTRACT

This paper has the objective to study an automatized flexible transportation system (AFTS) for urban use composed of buses or vans platoons that, using dedicated lanes in public ways common in large metropolitan areas may have na improved urban trasportation system, improving its passenger capacity and reducing the vehicles' headway compared with conventional systems. To achieve this purpose, an automated control system for vehicles, in the absense of driver's interference in the automated lane sections, using a wide range of vehicle and ground sensors, controlled by computer clusters, is able to increase the overall average speed and reduce dramatically the distance between vehicles on the platoon formation on dedicated lanes, with pre-programaded stops in the "stations" in central way yards. A feasibility study of the proposed system is performed assessing the cost/benefit ratio of the proposed system. Finally, the paper addresses an adaptive controller, using data and additional available information to simulate mathematical models of the operating system.

3. INTRODUÇÃO

Engarrafamento, barulho, poluição, violência, 'stress'. Estes são itens inseparáveis dos motoristas das grandes cidades. As vias em geral estão saturadas e construir outras nem sempre é economicamente viável. Uma questão que pode ser colocada é se as vias públicas estão realmente sendo utilizadas no seu limite. O objetivo deste trabalho é mostrar que há alternativas com tecnologias recentes para melhorar esta situação.

A automação de vias 'congestionadas' onde automóveis e ônibus são controlados por computadores em formação de comboios pode aliviar o congestionamento. Em países como EUA, Japão e Europa, vários estudos e experiências vêm sendo desenvolvidos nesse sentido.

Nos EUA, o programa PATH do sistema viário da Califórnia, feito em cooperação entre universidades, governo e empresas privadas encontra-se em fase avançada de pesquisas e desenvolvimento nesta área, principalmente para automóveis em auto-estradas.

4. ESTUDO DE VIABILIDADE

4.1. Sistemas de Transporte Atuais

O início do estudo deve começar obrigatoriamente pela análise dos sistemas de transporte de passageiros atuais. Como este trabalho é dirigido para áreas metropolitanas como a Grande São Paulo, serão levadas aqui em consideração as análises para os seguintes sistemas de transporte mais representativos: automóveis, ônibus, trem urbano e metrô. Tendo isto em vista, serão mostradas a seguir as principais características de cada meio de transporte acima citado e os resultados de uma pesquisa de campo realizada na cidade de São Paulo.

4.1.1. *Características dos Sistemas de Transporte*

A distribuição do transporte na região da Grande São Paulo apresenta uma forte tendência à utilização do transporte particular. A proporção relativa entre estes dois e a participação de cada meio de transporte coletivo é demonstrada na seqüência em dois gráficos e, em seguida, é descrito cada um dos meios de transportes convencionais.

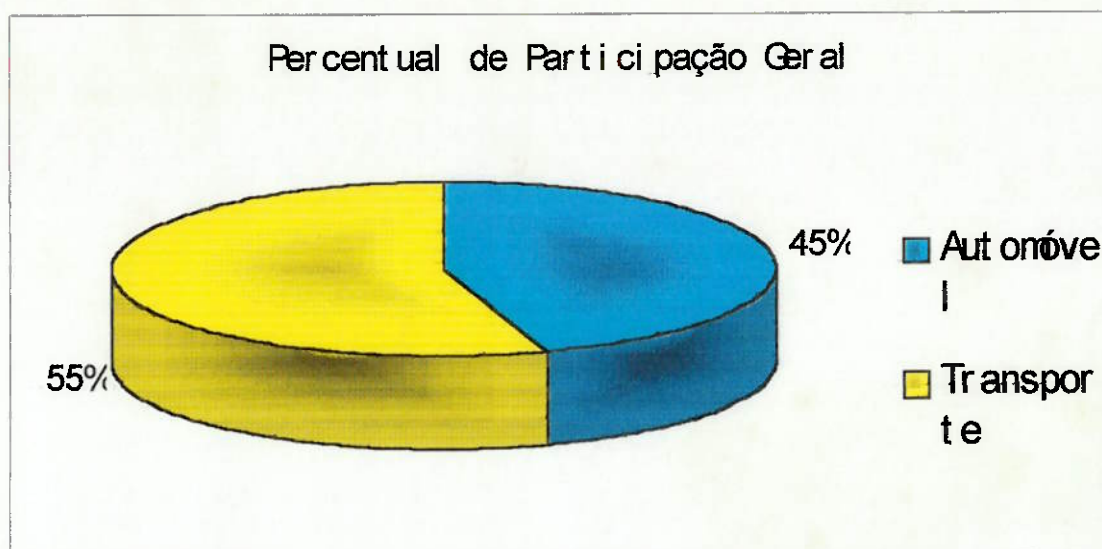


Figura 1 - Participação percentual do transporte particular x transporte coletivo na Grande São Paulo.

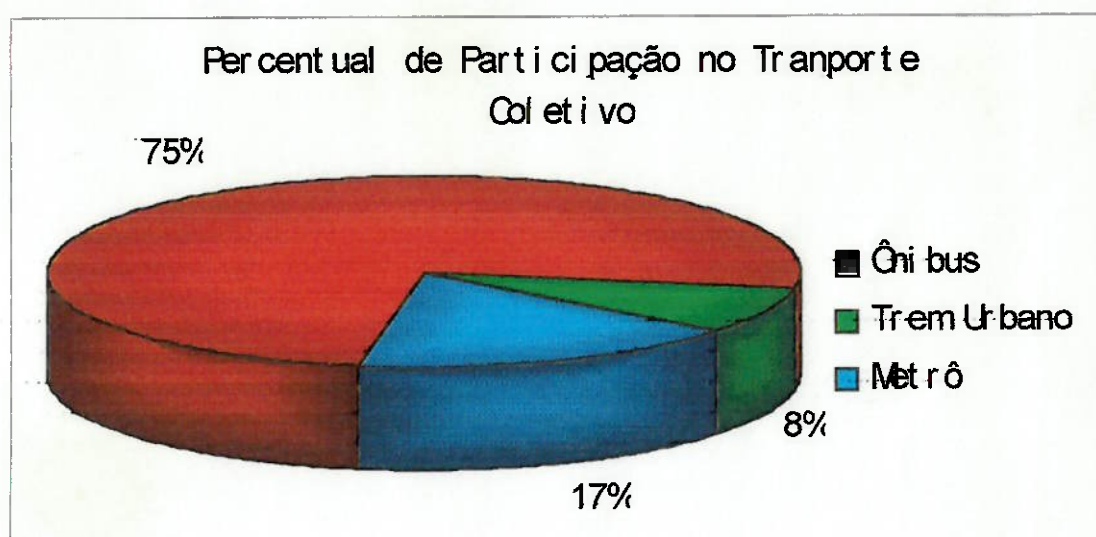


Figura 2 - Percentual de participação dos meios de transporte coletivo na Grande São Paulo.

Automóvel - é hoje o sistema mais amplamente utilizado como meio de locomoção em São Paulo, representando aproximadamente 45% das viagens realizadas na região metropolitana [4]. É o meio que tem menor aproveitamento de espaço de via por passageiro, o que acaba por colocá-lo em situação de grande desvantagem frente ao demais meios de

transporte. Um importante fato que deve ser levado em conta são os enormes congestionamentos causados pelo excesso de veículos, já que as vias existentes não mais comportam o número crescente de automóveis nas ruas. Obviamente que o automóvel particular tem vantagens, como comodidade para o passageiro e grande mobilidade. A sua zona de atuação não é superada por outro meio, porém com custo operacional elevado. Como sistema de transporte, causa grandes congestionamentos urbanos. A retirada obrigatória de circulação desses veículos em determinados horários alivia o conjunto do sistema de viário.

Ônibus - dos sistemas de transporte coletivo existentes, este é o mais utilizado na região metropolitana de São Paulo, representando aproximadamente 75% da demanda [4]. O ônibus tem baixo custo de implantação, custo por passageiro relativamente baixo e grande zona de atuação (flexibilidade). O que acaba por prejudicar os ônibus comuns numa cidade como São Paulo são as velocidades excessivamente baixas de transporte, devido ao fato de que estes têm que dividir espaço nas ruas com os automóveis particulares, enfrentando os mesmos congestionamentos com a desvantagem de serem veículos mais pesados e, portanto, mais lentos que os veículos leves. Isto acaba por elevar o tempo de viagem, que por sua vez eleva o intervalo entre ônibus consecutivos de uma mesma linha, aumentando a lotação por veículo. Esses fatores levam muitos usuários a

abandonarem este meio de locomoção em favor do automóvel , o que acaba por prejudicar o sistema como um todo, até o limite de saturação.

Uma alternativa implantada em algumas regiões de São Paulo são faixas exclusivas para tráfego de ônibus urbanos - nestas vias a velocidade média é maior, o tempo de viagem é reduzido razoavelmente - mas ainda assim, insuficiente pela elevada demanda.

Trem Urbano - na Grande São Paulo, este tem como função principal a ligação entre a cidade de São Paulo e os municípios vizinhos e representa 8% da demanda dos transportes coletivos [4]. Possui uma boa relação de passageiros por espaço de via e, quando bem operado, tem uma velocidade média de viagem bastante alta em relação aos demais meios de transporte coletivo. Pela sua própria concepção, é um meio de transporte que se estende por uma longa distância, porém têm uma área de abrangência restrita a uma estreita faixa ao longo das linhas, o que o leva a depender fortemente dos demais para um bom funcionamento. Este é um sistema de elevado custo de implantação , necessitando de pesados investimentos para sua expansão e, também por sua natureza, é um sistema que possui um *headway* elevado em relação aos demais. No caso particular da região da Grande São Paulo, este sistema ficou abandonado durante longo tempo, fazendo com que o seu desempenho operacional e

o conforto dos passageiros se mantenha inferior a sistemas semelhantes em outros países.

Metrô - este sistema está localizado em uma pequena região da cidade de São Paulo, e é responsável por 17% da demanda dos transportes coletivos da região metropolitana [4]. É um sistema com uma relação de passageiros por área de via extremamente alta, uma velocidade de operação muito elevada, e um intervalo entre veículos bastante reduzido. No caso de São Paulo, busca-se manter o seu desempenho operacional em níveis adequados, o que melhora muito a sua imagem para a população. A principal desvantagem é a pequena abrangência na região da cidade de São Paulo, aliado a um elevado custo de construção de novas linhas, o que torna sua expansão extremamente lenta e, com certeza, com uma velocidade incipiente para uma metrópole como São Paulo, ainda mais quando se leva em conta as previsões de crescimento - isto talvez acabe por comprometer sua adoção massiva na região metropolitana de São Paulo.

4.1.2. Pesquisa de Campo

A pesquisa de campo realizada teve por objetivo verificar alguns valores para os sistemas de ônibus urbano e metrô, como velocidade, tempo de viagem, tempo de parada, etc. Estes números são importantes para analisar o desempenho atual destes meios de transporte e definir parâmetros de performance para o STAF.

A pesquisa foi realizada em duas etapas. A primeira consistia numa medição de valores num corredor urbano de ônibus - esta sendo realizada no corredor existente na Avenida Marquês de São Vicente, no bairro da Barra Funda. A Segunda etapa foi realizada em dois trechos de duas linhas do metrô (verde e azul). Os resultados obtidos estão demonstrados a seguir:

Coleta de Dados – Corredor de Ônibus Av. Marquês de São Vicente

Ponto n°	Distância Relativa (m)	Tempo de Parada (s)	Tempo Entre Estações (s)	Velocidade Média de Percurso (m/s)	Velocidade Média de Percurso (km/h)	Velocidade Média Geral (m/s)	Velocidade Média Geral (km/h)
1 (smf. Av. Rudge)		10,00					
1 → 2	350		40,50	8,64	31,11	6,93	24,95
2		7,00					
2 → 3	500		106,50	4,69	16,90	4,41	15,86
3		9,00					
3 → 4	550		220,50	2,49	8,98	2,40	8,63
4							
4 → 5	850		97,50	8,72	31,38	8,72	31,38
5		8,00					
5 → 6	500		141,00	3,55	12,77	3,36	12,08
6		8,00					
6 → 7	600		157,50	3,81	13,71	3,63	13,05
7		7,00					
7 → 8	400		55,50	7,21	25,95	6,40	23,04
8		8,00					
8 → 9	500		73,50	6,80	24,49	6,13	22,09
9		9,00					
Valores Médios	531	8,25	111,56	5,74	20,66	5,25	18,88
Valores Totais	4250	958,50					
Velocidade Máxima no trecho estudado: 65 km/h							

Tabela 1 - Coleta de Dados - Corredor de Ônibus Av. Marquês de São Vicente

Coleta de Dados - Linha Azul do Metrô

Tomada	Tempo de Parada (s)	Tempo de Percurso Entre Estações (s)	Tempo de Parada (s)	Tempo de Percurso Entre Estações (s)	Tempo de Parada (s)	Tempo de Percurso Entre Estações (s)	Tempo de Parada (s)
	Praça da Árvore		Santa Cruz		Vila Mariana		Ana Rosa
1	26,36	88,90	31,81	81,40	48,60	92,55	
2	20,89	92,24	29,30	85,98	26,34	78,42	
3	17,36	92,34	18,62	85,99	17,45	87,13	
4	23,15	101,35	22,74	85,34	21,52	78,05	20,56
5		100,17	34,60	89,77	31,06	80,66	45,47
Média	22	95	27	86	29	83	33

Tabela 2 - Coleta de Dados - Linha Azul do Metrô

Coleta de Dados - Linha Verde do Metrô

Tomada	Tempo de Parada (s)	Tempo de Percurso Entre Estações (s)	Tempo de Parada (s)	Tempo de Percurso Entre Estações (s)	Tempo de Parada (s)	Tempo de Percurso Entre Estações (s)	Tempo de Parada (s)
	Ana Rosa		Paraíso		Brigadeiro		Trianon-Masp
1	44,22	76,82	31,75	86,40	22,47	67,24	24,86
2				92,28	23,84	70,70	29,64
3	25,22	68,90	43,02	90,83	26,01	73,96	24,91
4		70,27	53,30	89,40	34,72	73,65	39,33
Média	35	72	43	90	27	71	30

Tomada	Tempo de Percurso Entre Estações (s)	Tempo de Parada (s)	Tempo de Percurso Entre Estações (s)
		Consolação	
1	69,00	28,00	78,75
2	74,95	31,80	81,48
3	75,52	38,57	83,13
4	70,50	33,84	82,20
Média	72	33	81

Tabela 3 - Coleta de Dados - Linha Verde do Metrô

Sumário dos Dados - Metrô

Estação	Distância Relativa (m)	Tempo de Parada (s)	Tempo Entre Estações (s)	Velocidade Média de Percorso (m/s)	Velocidade Média de Percorso (km/h)	Velocidade Média Geral (m/s)	Velocidade Média Geral (km/h)
Praça da Árvore		21,94					
P.A. <--> S.C.	1328,4		95,00	13,98	50,34	11,36	40,89
Santa Cruz		27,41					
S.C. <--> V.M.	1180,8		85,70	13,78	49,60	10,44	37,58
Vila Mariana		28,99					
V.M. <--> A.R.	996,3		83,36	11,95	43,03	8,87	31,92
Ana Rosa (azul)		33,02					
Ana Rosa (verde)		34,72					
A.R. <--> Par.	664,2		72,00	9,23	33,21	6,22	22,41
Paraíso		42,69					
Par. <--> Brig.	1070,1		89,73	11,93	42,93	8,08	29,09
Brigadeiro		26,76					
Brig. <--> T.M.	947,1		71,39	13,27	47,76	9,65	34,74
Trianon-Masp		29,69					
T.M. <--> Cons.	1094,7		72,49	15,10	54,36	10,71	38,57
Consolação		33,05					
Cons <--> Clín.	1217,7		81,39	14,96	53,86	10,64	38,31
Clínicas		-					
Valores Médios	1062	30,92	81,38	12,75	45,89	9,33	33,60
Valores Totais	8499	929,32					

Tabela 4 - Sumário dos Dados - Metrô

4.2. Sistema de Transporte Automático Flexível (STAF)

O sistema proposto baseia-se no uso intensivo de sistemas automáticos de controle sediado nos veículos e uma faixa dedicada para os ônibus, de modo a aumentar significativamente a velocidade média do conjunto e, ao mesmo tempo, reduzir a distância entre veículos consecutivos, levando portanto a um melhor aproveitamento da pista que está sendo utilizada. Tanto a pista como o veículo nesta concepção devem ser preparados para um grau de automação complexo de controles e comunicação sofisticados.

Pretende-se que o sistema seja organizado da seguinte forma: os ônibus utilizados, quando não estiverem nas pistas automatizadas, terão um motorista no seu comando, como ocorre hoje com os ônibus convencionais. Assim que adentram a pista automatizada, o controle do veículo passa para o sistema automático, que se encarrega de organizar os veículos em comboios e de conduzi-los através da linha, controlando direção, aceleração e frenagem de cada veículo, bem como as paradas em estações. O sistema deve monitorar continuamente todas as variáveis envolvidas, através de sensores instalados nos veículos e ao longo da pista. Com estes dados, decisões precisas são tomadas para obter o melhor desempenho global do conjunto. Quando um veículo tiver de sair da pista automatizada para uma via secundária comum, o controle do mesmo retorna ao motorista, que

continua a guiar o veículo normalmente até seu destino final - este é o caráter flexível do sistema.

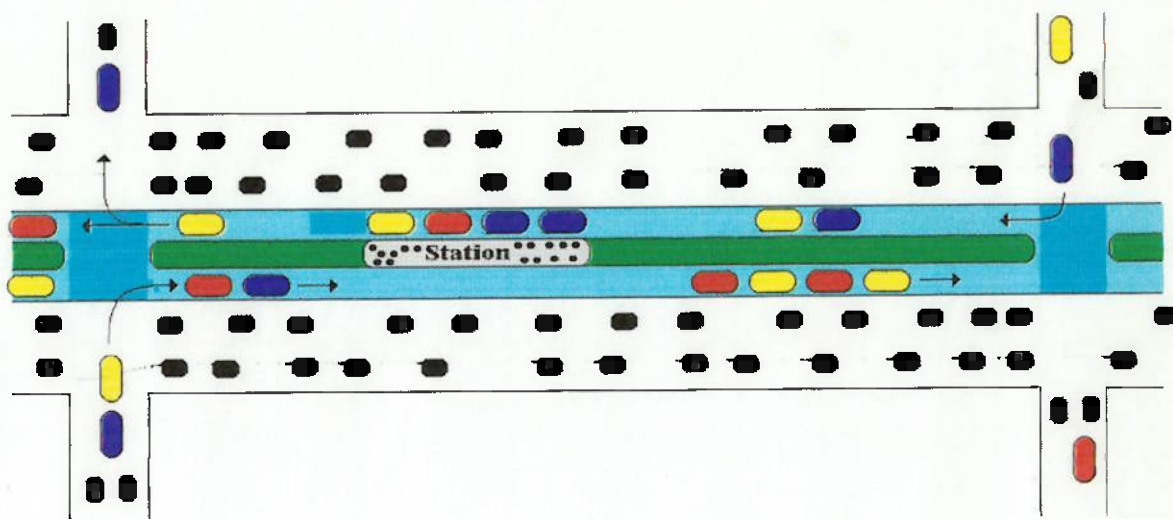


Figura 3 - Esquema de funcionamento do STAF

Do ponto de vista estrutural, o sistema é composto por vários níveis hierárquicos de controle, sendo estes: o próprio veículo, o comboio, a pista e o sistema global.

O nível hierárquico de controle no veículo é aquele responsável por receber os sinais captados pelos sensores deste e, tendo em vista as características deste veículo (resposta a aceleração, frenagem, etc.) e as condições específicas do mesmo no momento (massa, velocidade, inclinação da pista, posição relativa no comboio, etc.), possa coordenar a ação dos atuadores (injeção de combustível, comando de direção, frenagem, etc.) em tempo real.



Figura 4 - Esquema de comunicação entre os veículos no comboio

O nível hierárquico de controle do comboio é o responsável por coordenar a entrada/saída de veículos neste comboio, a parada em estações e em cruzamentos, e a manutenção da estabilidade do mesmo (manter o comboio se movimentando uniformemente ao longo da pista).

O nível hierárquico da pista é o responsável pela entrada/saída de veículos nesta pista, pela determinação dos perfis de velocidades a serem seguidos pelos comboios, pela sinalização da pista e pela interface com as estações (como por exemplo, informar as estações os destinos dos próximos ônibus).

Por fim, o nível hierárquico global é aquele que recebe informações de todo o sistema, organizando o fluxo dos veículos entre as várias pistas, coordenando a comunicação entre os vários componentes do sistema e recebendo informações estatísticas do funcionamento do mesmo, que podem ser utilizadas para a otimização deste em vários sentidos (como por exemplo determinar os itinerários com maior fluxo de passageiros por horário a fim de atender melhor demandas específicas).



Figura 5 - Possível esquema de pistas para o STAF (linhas azuis)
na cidade de São Paulo

Aqui cabe ressaltar mais algumas características importantes do STAF. Um ponto que torna o STAF bastante interessante a implementação do STAF é o fato de que cada trecho do sistema constitui um "segmento" que pode ser implementado separadamente. O que o sistema global faz é coordenar estes vários segmentos como se fossem componentes de uma rede (*network*), controlando o fluxo dos veículos através desta rede - assim sendo, o seu gerenciamento se aproxima muito do gerenciamento de uma rede de comunicação entre computadores, e muitos dos conceitos hoje utilizados

na coordenação de redes de informática podem ser adaptados para a sua utilização no STAF.

Essa característica de implantação fragmentada por trechos permite uma alta flexibilidade de expansão do sistema, atendendo às demandas específicas de um determinado momento. Outro fator importante de ser mencionado é que o sistema não tem necessidade de ser contínuo - o fato dos veículos serem guiados pelo sistema nos trechos automatizados e por motoristas fora destes permite a expansão do sistema em trechos que não necessariamente precisam ser contínuos.

Uma outra característica deste sistema que é impossível ou muito difícil de ser implementada nos sistemas convencionais é a fácil reordenação do fluxo dos veículos dentro dele através do gerenciamento do controlador global - assim, no caso de uma via interditada em um certo momento por algum motivo por exemplo, o sistema é capaz de redirecionar o fluxo dos veículos através das melhores vias alternativas, a fim de manter o bom desempenho do mesmo. Pode-se imaginar também que um remodelamento de todo o sistema torna-se muito facilitado ao aproveitar-se destas características do STAF.

O melhor desempenho do STAF, levando-se em consideração apenas a velocidade dos veículos no mesmo e o menor intervalo entre estes quando comparado aos sistemas convencionais reside no fato de que, com controladores monitorando todas as variáveis da pista e dos veículos, ele

pode tomar decisões em tempo real com uma margem de segurança mais estreita do que um motorista consegue fazê-lo normalmente, além da coordenação simultânea de grupos de veículos ao invés de apenas um veículo isolado -tudo isto levando a alcançar uma velocidade média maior e um menor distanciamento entre veículos.

Levando-se em conta todos estes fatores, espera-se que o STAF possa atender a uma maior demanda de passageiros, sem contudo ultrapassar os limites de capacidade dos veículos utilizados. Assim, conseguir-se-ia um sistema de transporte com um conforto maior e uma performance melhor do que os meios de transportes convencionais.

4.3. Comparação Entre os Sistemas Existentes e o Proposto

Para um melhor entendimento, os dados mais relevantes serão apresentados na forma de uma tabela comparativa, com os valores dos sistemas atuais retirados das referências [4] e [5] (valores estes confirmados pela pesquisa de campo efetuada nos casos do ônibus urbano e do metrô). Os dados referentes ao STAF são estimativas baseadas em sistemas já existentes e relacionadas com os objetivos a serem atingidos como tempo de viagem, preço do transporte e conforto.

	Capacidade Máxima (1000 pph/direção)	Velocidade Comercial (km/h)	Custo por km por ano (\$ x 10 ⁶)	Custo de Implantação de 2 linhas por km (\$ x 10 ⁶)	Custo por Passageiro por km (cents)
Carro	0,7 - 3,5	10 - 25	1,0 - 1,5	0,4 - 0,5	2,0 - 3,0
Ônibus	7,2 - 9,6	10 - 20	0,5 - 0,7	0,4 - 0,5	0,8 - 0,9
Trem Urbano	9 - 25	30 - 40	0,3 - 0,7	3,3 - 6,7	0,5 - 1,1
Metrô	35 - 70	30 - 40	0,7 - 1,3	20 - 43	0,5 - 1,3
STAF	20 - 30	25 - 35	1,2 - 2,1	1,1 - 2,6	0,7 - 1,5

Tabela 5 - Números comparativos dos sistemas de transporte convencionais x estimativas do STAF

Pode-se observar que o STAF aproxima-se do metrô em desempenho a um custo de implantação substancialmente inferior, de pelo menos uma ordem de grandeza. Cabe ressaltar que a característica de flexibilidade do STAF não foi aqui quantificada.

4.4. Estimativa dos custos do sistema

Além da viabilidade técnica, principal objetivo deste trabalho, abrimos espaço para um breve levantamento de custos dos subsistemas mais importantes que compõem uma parte do sistema em estudo. Estamos falando do ônibus e, conseqüentemente, do comboio.

A preocupação desta estimativa foi a de fornecer apenas uma ordem de grandeza para os custos dos componentes, não constituindo-se em um levantamento detalhado dos mesmos.

Julgamos ser suficiente para esta etapa do estudo tal nível de informação. Todos os dados a seguir expostos foram levantados por especialistas no assunto.

Componente	Custo estimado (R\$)
Microcontrolador	250,00
Injeção eletrônica	4.000,00
Freio eletrônico	750,00
Direção eletrônica	900,00
Transmissão automática	14.000,00
Comunicação	1.000,00
Total	20.900,00

Tabela 6 - Estimativa de custos dos subsistemas para um ônibus

A injeção eletrônica refere-se à diferença de custos entre um motor eletrônico e um mecânico, já que o sistema de injeção não pode ser adaptado.

Existem também outros subsistemas espalhados pela pista e nas estações. A pista possui sensores e sistema de comunicação. Já as estações contam com painéis e catracas eletrônicas, além de ser gerenciada por computadores. No entanto, seus custos não foram estimados, uma vez que este ponto não estava previsto nesta etapa do estudo.

5. MODELAGEM DINÂMICA DE ÔNIBUS URBANO

O aspecto mais importante do funcionamento do STAF reside no controle do comboio e do espaçamento mínimo e seguro entre veículos, conferindo a natureza de barras eletrônicas entre eles, possível mediante a aplicação do controle automático residente nos veículos e organizado pela pista automatizada. São colocados a seguir aspectos importantes para o tratamento da dinâmica e controle de ônibus urbano.

A dinâmica longitudinal desses veículos é suficientemente complexa para ser tratada no domínio dos sistemas não-lineares, apesar de que, numa primeira aproximação, o estudo do controle pode ser conduzido com modelos simplificados. Seguindo-se o método de linearização utilizado por Kanellakopoulos e Yanakiev [6], conclui-se que a dinâmica relativa à velocidade angular das rodas, ao sistema de alimentação de combustível, à pressão do coletor de admissão, à velocidade do motor e à velocidade do rotor do turbo-compressor é muito mais rápida que aquela relativa à velocidade do veículo - logo, o modelo pode ser aproximado a um sistema linear de 1ª ordem, para o estudo do controlador:

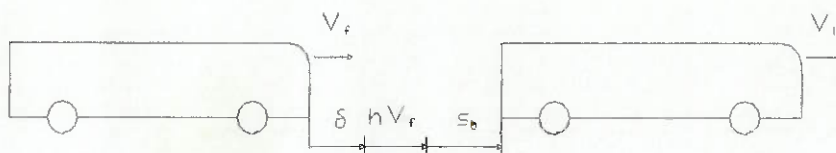
Assim considera-se a dinâmica relativa a dois veículos consecutivos representada por:

$$\frac{\partial v}{\partial u} = \frac{b}{s+a} \quad (1)$$

Os parâmetros a e b de (1) caracterizam respectivamente o tempo de resposta a um comando de controle de distancia e o ganho associado ao comando. A relação estabelece a dinâmica do comando u e a variação do espaçamento com o tempo v .

6. ESTUDOS SOBRE O SISTEMA DE CONTROLE

São definidos alguns parâmetros para o comboio de veículo, como se segue:



s_0 : distância mínima entre dois ônibus

h : tempo de 'headway'

x_r : separação entre dois ônibus

V_l : velocidade do ônibus da frente (líder)

V_f : velocidade do ônibus seguidor

δ : erro de separação

Figura 6 - Descrição das variáveis utilizadas no controlador

Temos como objetivo do controlador: $v_r + k\delta = 0$, onde $v_r = v_l - v_f$ é a velocidade relativa entre dois ônibus. Desta forma, obtém-se:

$$\dot{v}_r = a(v_r + k\delta) + bu + d \quad (2)$$

onde d é o termo relativos às perturbações e imperfeições do modelo.

Um controlador simples que pode ser aplicado neste caso é o controlador proporcional integral (PI). Este controlador pode conseguir regular tanto v_r como δ com alguma robustez a respeito de perturbações e efeitos não modelados - porém este controlador possui o sério inconveniente do sobresinal que, no caso de controle de comboios de veículos é altamente indesejável (um sobresinal poderia causar a colisão dos veículos nos comboios). A solução para isso passa pela adoção de um termo não-linear quadrático no controlador, transformando-o num PIQ [7]. Este controlador é razoavelmente agressivo para grandes erros que possam surgir devido a acelerações ou freadas bruscas, e não possui o efeito de sobresinal, o que o torna mais adequado para a aplicação em questão. Este controlador possui a seguinte forma:

$$u = k_p(v_r + k\delta) + k_i \frac{1}{s}(v_r + k\delta) + k_q(v_r + k\delta)|v_r + k\delta| \quad (3)$$

com k_p , k_i e k_q sendo respectivamente os ganhos proporcional, integral e quadrático.

Um problema comum aos controladores em geral é o fato de que os ganhos conferem a este uma boa performance para alguma região específica de operação - sendo que estes mesmos ganhos resultam numa performance inferior do controlador em outras regiões de operação, especialmente quando existem muitas não-linearidades contidas no sistema. No nosso sistema de controle dos comboio de ônibus, este efeito torna-se ainda mais acentuado devido ao fato de que

existem muitas variações nas condições de operação dos veículos, como por exemplo a quantidade de passageiros que varia alterando a massa total, a variação na temperatura ambiente alterando comportamento do motor, etc. Assim, a adoção de um controle adaptativo torna-se imprescindível para o sucesso deste esquema de controle. O controlador PIQ com ganhos adaptativos fica da seguinte forma:

$$u = \hat{k}_p(v_r + k\delta) + \hat{k}_i \cdot \frac{1}{s}(v_r + k\delta) + \hat{k}_q(v_r + k\delta)|v_r + k\delta| \quad (4)$$

onde \hat{k}_p , \hat{k}_i e \hat{k}_q são ganhos variantes no tempo. Substituindo-se (4) em (2), obtém-se:

$$\dot{v}_f = (a + b\hat{k}_p)(v_r + k\delta) + b\hat{k}_i + b\hat{k}_q(v_r + k\delta)|v_r + k\delta| + d \quad (5)$$

Para a obtenção das regras de atualização das estimativas dos ganhos, considera-se o seguinte referencial não-linear:

$$\dot{v}_m = a_m(v_l - v_m + k\delta) + q_m(v_l - v_m + k\delta)|v_l - v_m + k\delta| \quad (6)$$

onde $a_m > 0$ e $q_m \geq 0$. A partir daí, obtém-se o erro do valor real em relação ao parâmetro:

$$\dot{e}_r = \dot{v}_f - \dot{v}_m = -a_m e_r - q_m e_r |v_r + k\delta| - b[\tilde{k}_p(v_r + k\delta) + \tilde{k}_i + \tilde{k}_q(v_r + k\delta)|v_r + k\delta|] \quad (7)$$

onde $\tilde{k}_p = k_p - \hat{k}_p$, $\tilde{k}_i = k_i - \hat{k}_i$ e $\tilde{k}_q = k_q - \hat{k}_q$ são os erros nos parâmetros utilizados.

A regra de atualização dos parâmetros é obtida pela função de Lyapunov do sistema em malha fechada (5) - um resultado satisfatório é obtido aplicando-se a seguinte função de Lyapunov ao sistema, conforme a referência [7].

$$V = \frac{e_r^2}{2} + b \cdot \frac{\tilde{k}_p^2}{2\gamma_p} + b \cdot \frac{\tilde{k}_i^2}{2\gamma_i} + b \cdot \frac{\tilde{k}_q^2}{2\gamma_q} \quad (8)$$

onde γ_p , γ_i e γ_q são constantes positivas de projeto, e b varia de veículo para veículo, porém é positivo. Com as escolhas apropriadas:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{k}}_p &= \text{Proj}[-\gamma_p \cdot e_r (v_r + k\delta)] \\ \dot{\hat{k}}_i &= \text{Proj}[-\gamma_i \cdot e_r] \\ \dot{\hat{k}}_q &= \text{Proj}[-\gamma_q \cdot e_r (v_r + k\delta) | v_r + k\delta] \end{aligned} \quad (9)$$

onde $\text{Proj}[\cdot]$ é o operador projeção para um intervalo contendo o valor real do parâmetro, obtém-se para \dot{V} :

$$\dot{V} = -a_m e_r^2 - q_m |v_r + k\delta| e_r^2 \leq 0 \quad (10)$$

e este resultado garante que os valores de e_r , \hat{k}_p , \hat{k}_i e \hat{k}_q sejam mantidos dentro das fronteiras adequadas e garante também a auto-regulagem de e_r .

Tipicamente, tempos de "headway" da ordem de 0,1 s oferecem resultados satisfatórios para automóveis de passeio. Já para veículos mais pesados, este valor sobe para aproximadamente 1 s se quisermos obter resultados satisfatórios (boa performance, segurança e estabilidade do comboio) - isto se deve basicamente ao fato de que veículos

mais pesados possuem uma relação atuação/peso tipicamente 5 a 10 vezes menores que veículos de passeio. Com um tempo de *headway* muito grande, o espaço entre veículos nos comboios se torna elevado demais para um bom desempenho do sistema no trânsito urbano. Assim, utiliza-se o conceito de *headway* variável, o que é até mesmo intuitivo à primeira vista: se a velocidade relativa entre dois veículos é positiva, isto é, se o veículo líder está se afastando do veículo seguidor, então é seguro diminuir o tempo de *headway* sem riscos de choques entre os dois - já se a velocidade relativa entre os dois é negativa, isto é, o veículo seguidor está se aproximando do veículo líder, então o tempo de *headway* deve ser aumentado para atender aos critérios de segurança. Pode-se redefinir o tempo de *headway* da seguinte forma então:

$$h = \begin{cases} 1 & \text{se } h_0 - c_h v_r \geq 1 \\ h_0 - c_h v_r & \text{se } 0 < h_0 - c_h v_r < 1 \\ 0 & \text{se } h_0 - c_h v_r \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

onde h_0 e c_h são constantes de projeto (positivas) - esta definição assegura que o tempo de *headway* não se torne negativo (por questões de segurança) e também não permite que este se torne excessivamente grande, o que viria a prejudicar o comportamento do comboio.

Outra modificação que pode ser implementada para melhorar a performance do comboio como um todo é a adoção do ganho do erro de separação (k) variável. O raciocínio também é intuitivo: se dois veículos estão mais perto do

que o desejado ($\delta < 0$), mas o veículo seguidor está com uma velocidade inferior à velocidade do veículo líder, então o veículo seguidor não precisa tomar nenhuma atitude muito drástica para diminuir o erro de separação; o mesmo acontece quando os dois veículos estão mais longe do que o desejado ($\delta > 0$), porém o veículo seguidor vem numa velocidade maior que o líder. Quando o ganho do erro de separação é fixo, o controlador tentará reduzir um grande erro de separação através de uma grande velocidade relativa de sinal contrário, com um comando de aceleração ou frenagem muito agressivo - este comportamento não é desejável num comboio, pois ele é antieconômico no sentido de que consome mais combustível e desgasta mais o sistema de freio, além do fato de que pode levar a colisões em situações extremas. Pode-se então definir a variável k :

$$k = c_k + (k_0 - c_k)e^{-\sigma\delta^2} \quad (12)$$

onde $0 < c_k < k_0$ e $\sigma \geq 0$ são constantes de projeto. Assim, o ganho k fica com o comportamento representado na figura 4 (gráfico obtido utilizando-se $k_0 = 1$, $c_k = 0,1$ e $\sigma = 50$).

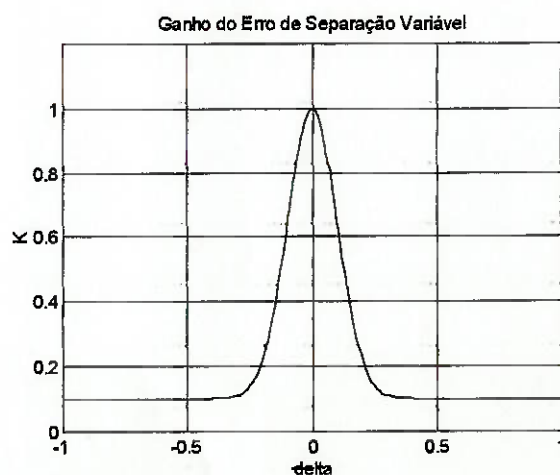


Figura 7 - Ganho do erro de separação variável

Outras estratégias de controle para aplicação em sistemas complexos dessa envergadura e responsabilidade estão em curso , baseados em aplicações de tempo real com velocidades muito elevadas de atuação e que se auto-conformam e otimizam o sistema como um todo , apesar da variabilidade das características dinâmicas do sistema. Cabe citar os controles que estão surgindo , baseados em técnicas de inteligência artificial e fortemente adaptativos.

7. RESULTADOS OBTIDOS

Foram feitas simulações do sistema de controle proposto para o STAF utilizando-se o software Matlab[®]. Para este estudo foi admitido que o comportamento dinâmico do ônibus é predominantemente influenciado pela sua velocidade e que as dinâmicas de aceleração e frenagem são semelhantes. Foi simulado um comboio de 4 ônibus semelhantes num percurso de 5 km. Os ônibus realizam uma parada numa estação a cada 500 m, totalizando 10 estações para o trecho simulado.

A modelagem dos ônibus foi feita com base em parâmetros típicos de ônibus comerciais, construindo-se um diagrama de blocos que representa o ônibus e seu controlador individual, e outro diagrama representando todo comboio.

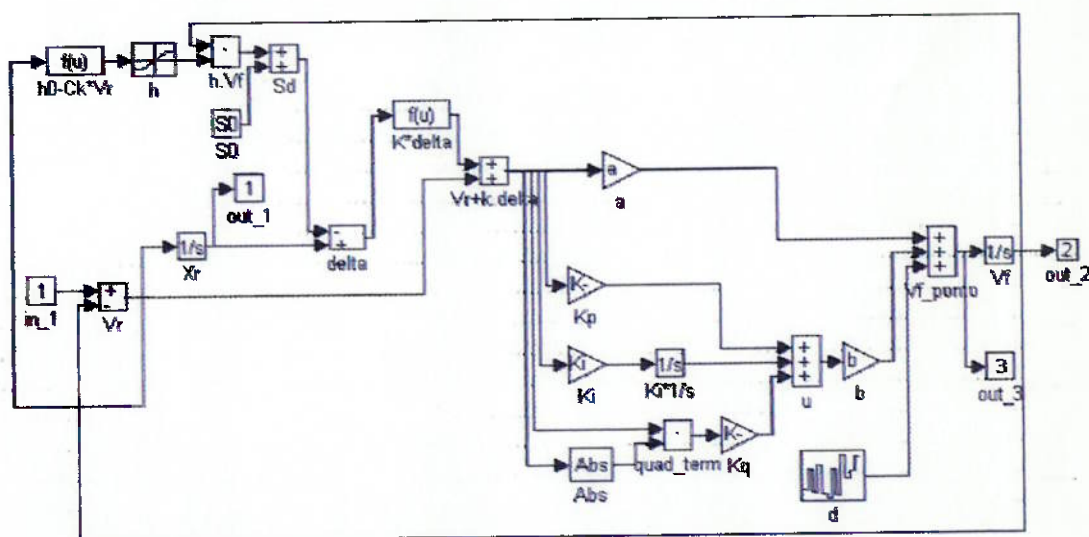


Figura 8 - Diagrama de blocos representando o modelo do
ônibus + controlador

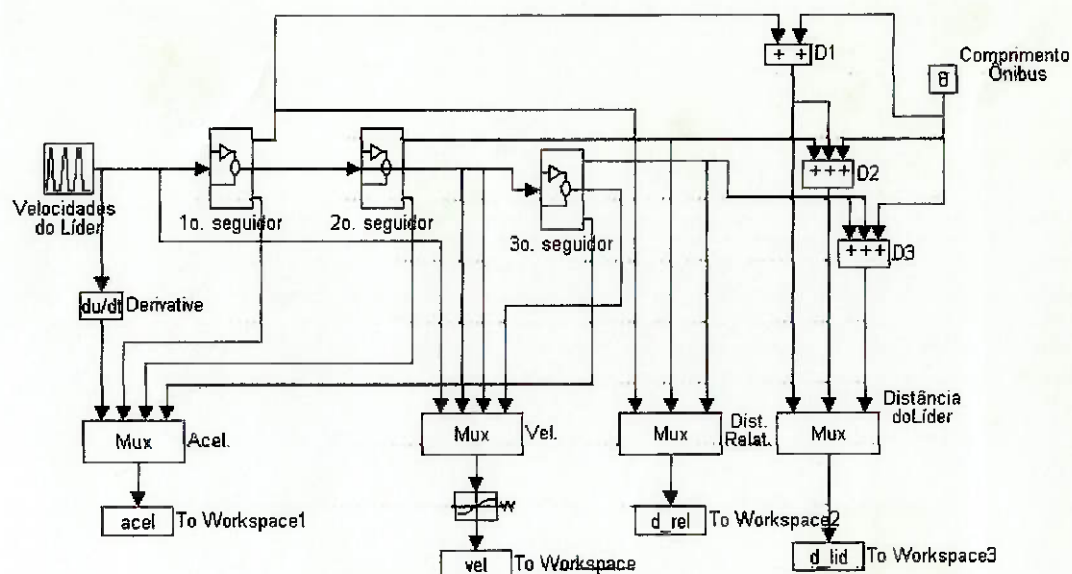


Figura 9 - Diagrama de blocos do ônibus

O perfil de velocidades imposto ao líder do comboio foi feito de modo que este possa realizar o trajeto entre as estações num período razoavelmente pequeno de tempo, sem que entretanto sejam necessárias acelerações ou frenagens bruscas no trecho. A velocidade média obtida em todo percurso simulado foi de 25 km/h, que é superior às obtidas pelos ônibus convencionais e é da mesma ordem de grandeza da velocidade atingida hoje pelo metrô.

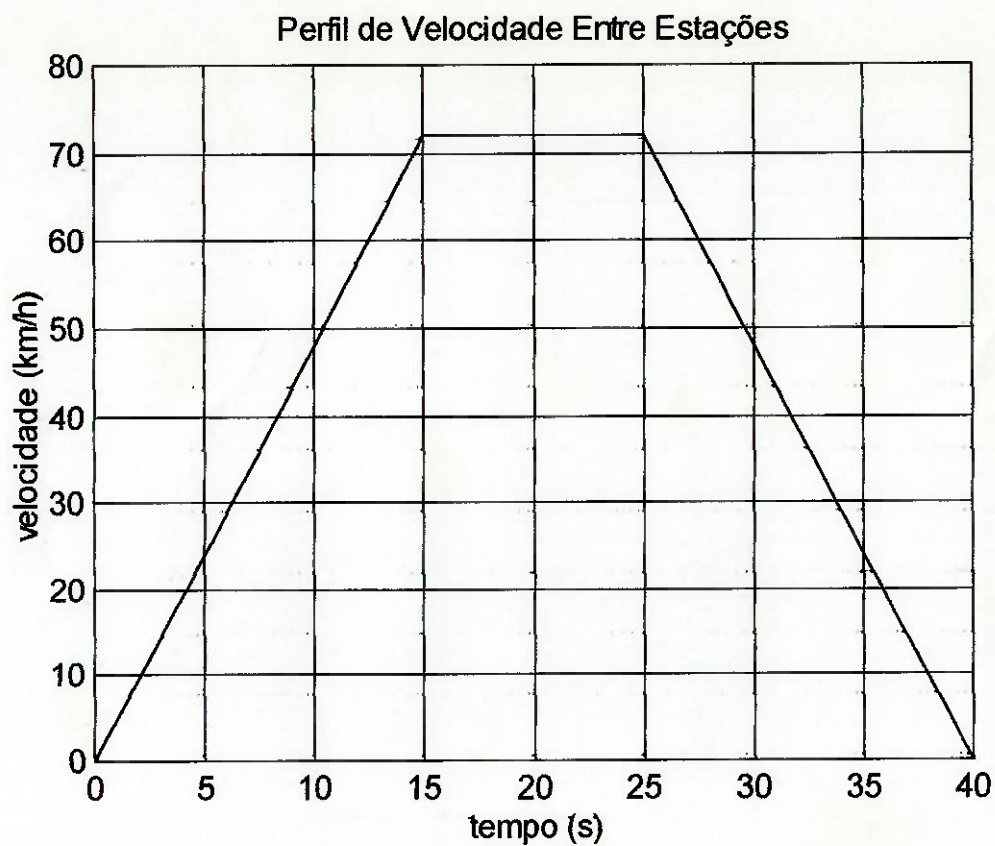


Figura 10 - Perfil de Velocidades Entre Estações

DURANTE A SIMULAÇÃO FORAM AVALIADOS 4 PARÂMETROS:
VELOCIDADE, ACELERAÇÃO LONGITUDINAL, SEPARAÇÃO ENTRE DOIS
ÔNIBUS DENTRO DO COMBOIO E DISTÂNCIA DE CADA ÔNIBUS
SEGUIDOR EM RELAÇÃO AO LÍDER DO COMBOIO. FORAM OBTIDOS OS
SEGUINTE RESULTADOS:

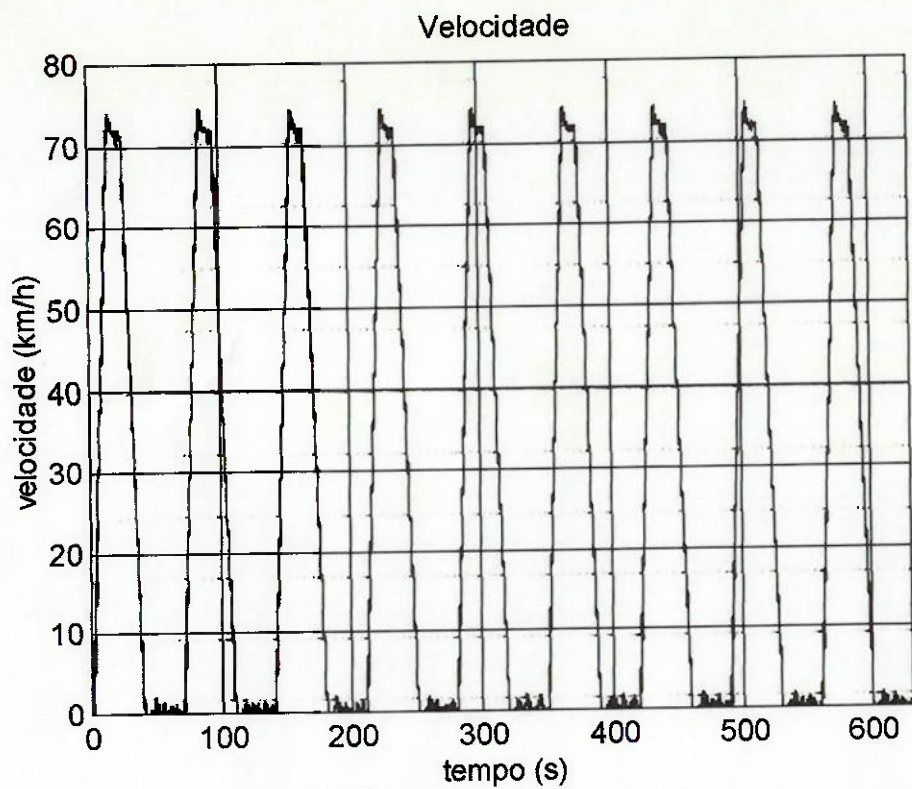


Figura 11 - Velocidade dos ônibus no comboio

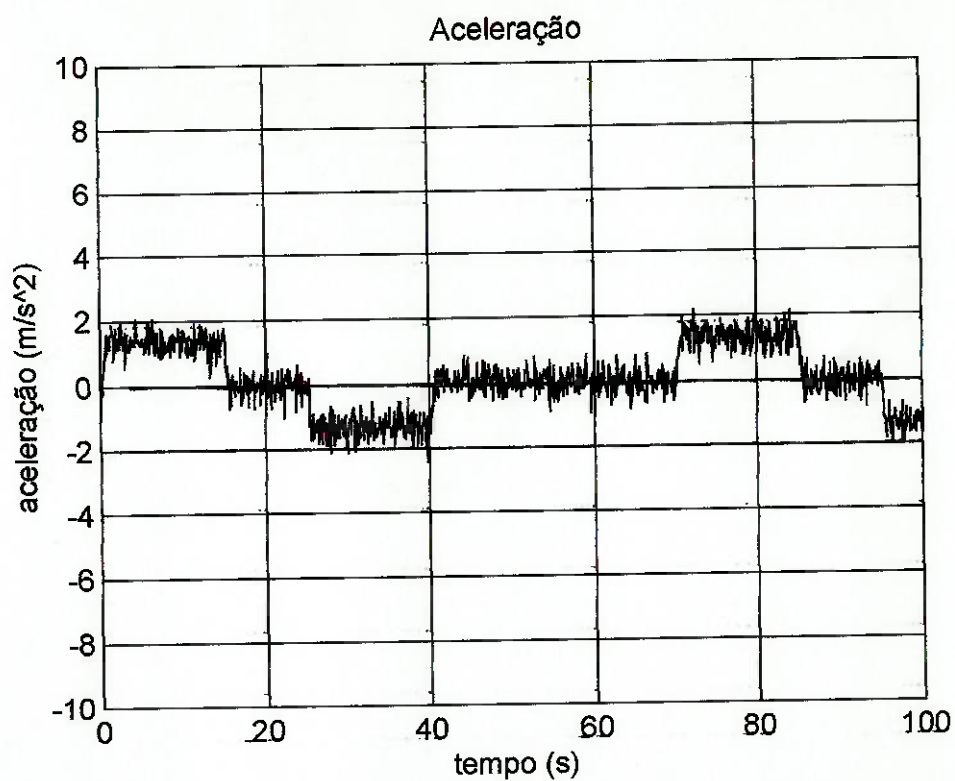


Figura 12 - Acelerações impostas aos ônibus no comboio

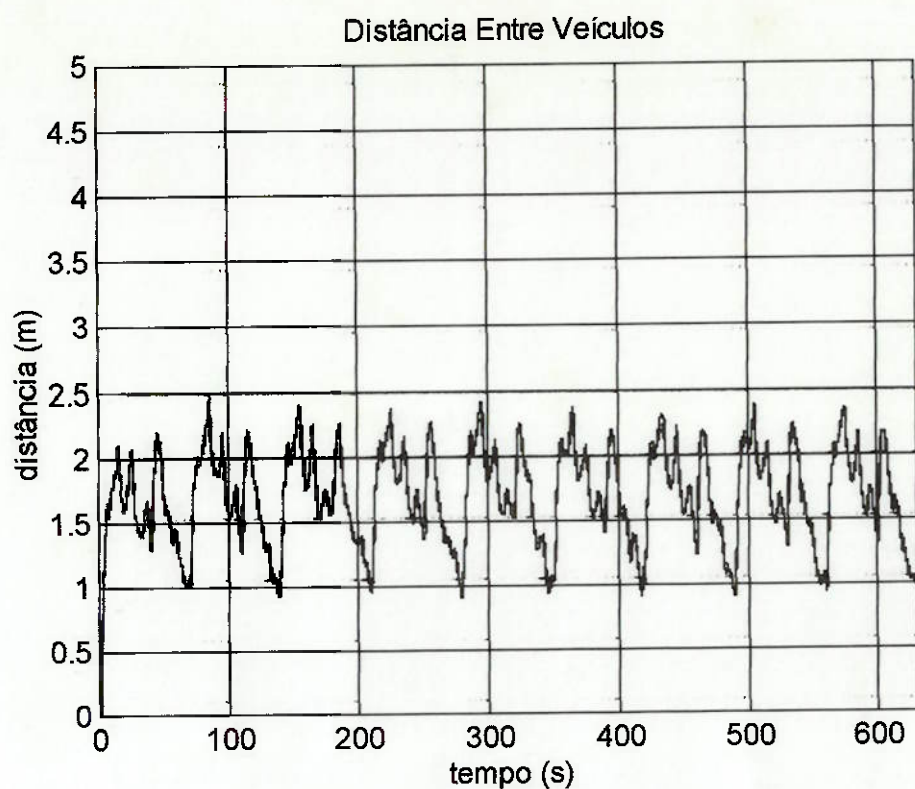


Figura 13 - Distância entre dois ônibus no comboio

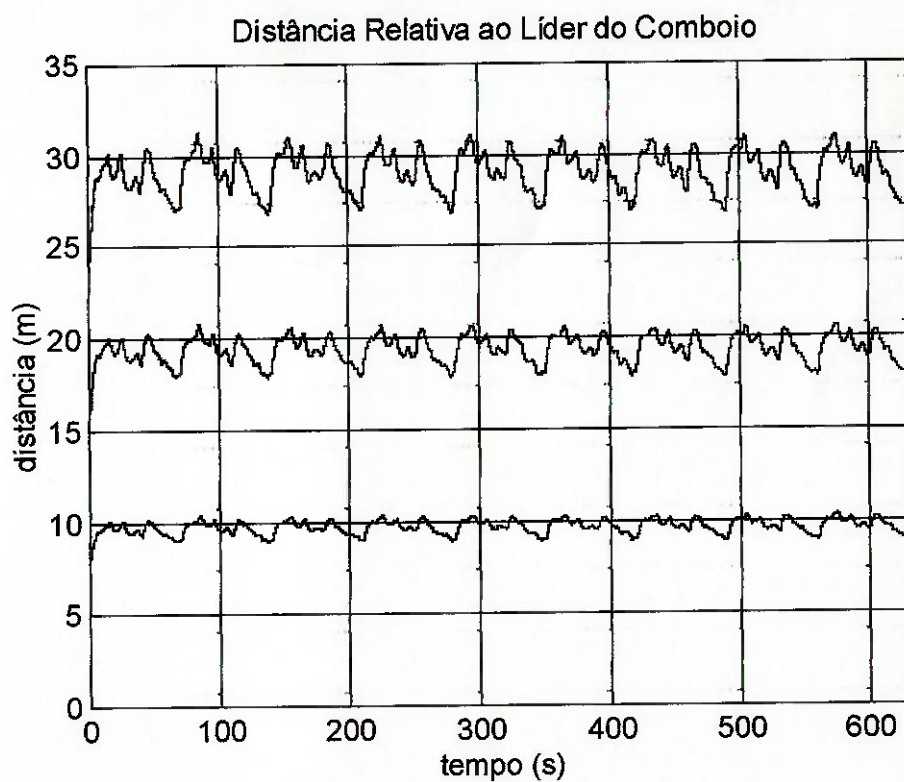


Figura 14 - Distância dos ônibus em relação ao líder do
comboio

O tempo de parada em cada estação foi de 30 segundos. Para a implantação do STAF, pode-se considerar que esses tempos possam ser atingidos com uma mudança no acesso aos ônibus.

As acelerações se situam num nível tolerável, menor que 0,2 g no geral - deve-se salientar que existem técnicas disponíveis de controle para aperfeiçoar o controlador aqui testado no sentido de se eliminar as oscilações de alta frequência da aceleração que possam vir a se tornar indesejáveis.

Observa-se que o espaçamento entre os ônibus dentro do comboio oscila em torno de 1,5 m, e mesmo quando estes estavam a 70 km/h, este espaçamento ainda se situava por volta de 2 m. Considerando-se que um motorista dirigindo um ônibus convencional nesta velocidade tende se distanciar aproximadamente 7 a 10 m do veículo à sua frente por questões de segurança, percebe-se que o STAF tem potencial para aproveitar melhor a capacidade de fluxo das pistas existentes, colocando um número maior de veículos num mesmo trecho de pista quando comparado ao sistema convencional.

Por fim, observa-se que o comprimento total do comboio é menor que 40 m (somando-se o comprimento do último ônibus) - levando-se a conclusão de que a implantação do sistema para os corredores de tráfego existentes nas áreas urbanas atualmente é viável neste sentido.

8. CONCLUSÕES

Há várias considerações a serem feitas com relação aos requerimentos do sistema de controle que mantém o *headway* entre os veículos. No aspecto de desempenho, o controlador deve manter com a melhor precisão o intervalo nominal entre veículos em função da velocidade do comboio. No aspecto segurança, deve manter a estabilidade longitudinal do conjunto por efeito da dinâmica de formação (*string stability*) e também evitar colisões entre dois veículos sucessivos nas várias manobras. No que diz respeito ao conforto, o controle deve permitir uma operação suave e confortável para os passageiros, isto é, com baixas acelerações. Esses itens em geral são conflitantes e o projeto do sistema de controle deve ser uma solução de compromisso para o atendimento dos requisitos.

Observando-se os resultados obtidos com esse estudo inicial, nota-se que o STAF é viável de implantação, em especial nas grandes metrópoles, onde os ganhos com a sua adoção poderão ser grandes. A tecnologia atualmente disponível no campo de sensores, atuadores e microprocessadores está num patamar suficientemente elevado para permitir a adaptação dos veículos convencionais para os requisitos do STAF com custos relativamente baixos - pode-se ainda imaginar que, com o início de uma produção de veículos padronizados com esta finalidade, os custos tendem a cair com o passar do tempo.

Avaliando-se tecnicamente os resultados obtidos nas simulações, pode-se dizer que o STAF apresenta resultados muito promissores, mesmo levando-se em conta as simplificações aqui adotadas para a obtenção destes resultados. Considerando-se que existem inúmeras modificações que podem ser adicionadas ao sistema de controle no sentido de aprimorá-lo, melhorando o desempenho do conjunto, chega-se a conclusão de que esta abordagem deve ser aprofundada para avaliar todas as suas potencialidades.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] SHLADOVER, S. D. - Review of the State of Development of Advanced Vehicle Control Systems, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vol. 24, Nos.6-7, pp 551-595, July 1995

[2] JOCHEM, T. e PEMERLEAU, D. - Life in the Fast Lane: The Evolution of an Adaptive Vehicle Control System, AI Magazine, Vol. 17, No. 2, pp 11-50, Summer 1996

[3] RILLINGS, J. H. - Automated Highways: Cars that Drive Themselves in Tight Formation Might Alleviate the Congestion Now Plaguing Urban Freeways, Scientific American Magazine, Special Issue, pp 52-57, October 1997

[4] COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO - Metrô - 15 Anos em Operação, São Paulo, 1989

[5] MACKETT, R.L. - Modelling the Implications of New Public Transport Technology: An Approach Using Artificial Intelligence, Transport, Land Use and the Environment, pp 297-315, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1996

[6] YANAKIEV, D. e KANELLAKOPOULOS, I. - Longitudinal Control of Heavy-Duty Vehicles for Automated Highway Systems, Proceedings of the American Control Conference, pp. 3096-3100, Seattle, June 1996.

[7] YANAKIEV, D. e KANELLAKOPOULOS, I. - Nonlinear Spacing Policies for Automated Heavy-Duty Vehicles, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 47, no. 4, pp. 1365-1377, November 1998.

[8] CHO, D. e HEDRICK, J.K. - Automotive Powertrain Modelling for Control, ASME Transactions, vol. 111, pp. 568-576, December 1989

[9] KAO, M. e MOSKWA, J.J. - Turbocharged Diesel Engine Modelling for Nonlinear Engine Control and State Estimation, ASME Transactions, vol. 117, pp. 20-30, March 1995.

[10] JENSEN, J.P.; KRISTENSEN, A.F.; SORENSON, S.C.; HOUBAK, N. e HENDRICKS, E. - Mean Value Modelling of a Small Turbocharged Diesel Engine, SAE Technical Paper no. 910070, pp. 1-13, 1991.

[11] KOTWICKI, A.J. - Dynamic Models for Torque Converter Equipped Vehicles, SAE Technical Paper no. 820393, pp. 103-117, 1982.

