

EVALUACION DE LAS CARACTERISTICAS CINEMATICAS DE UN NUEVO SISTEMA NEUMATICO DE TRANSPORTE PUBLICO

L. A. Lindau y V.C.S. Ferreira
Escola de Engenharia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumen

Este trabajo describe el modelo desarrollado para evaluar el desempeño cinemático del sistema Aeromovil durante la operación automatizada discreta, aun no implantada en la línea piloto. Después de una breve descripción de los principios de funcionamiento, de los ensayos de campo realizados, y del modelo para simular la operación Manual, presentaremos, detalladamente, los principios del sistema de control y las etapas de formulación del modelo matemático que expresa las relaciones entre los niveles de presión/depresión disponible en el tubo y el desplazamiento del vehículo. El modelo, implantado en un microcomputador, fue utilizado en la simulación de tiempo del recorrido, consumo energético y otras medidas de desempeño del vehículo al transitar en tramos que separan sucesivas estaciones propulsoras.

1. Introducción

Durante el año 1984, una serie de ensayos fueron realizados a lo largo del trecho de vía del Aeromovil, implantado experimentalmente en Porto Alegre. El objetivo de los ensayos fue la determinación de la potencialidad del Aeromovil como un sistema de transporte de pasajeros urbano.

Este trabajo enfoca la evaluación de las características cinemáticas de los vehículos considerando su relación con el desempeño del sistema teniendo en cuenta que, además de los tiempos de permanencia de los vehículos en las estaciones de embarque y desembarque, los tiempos del recorrido en los trechos de la vía son los principales determinantes de la capacidad del transporte (Lindau, 1985 a ; b).

2. Principios de Funcionamiento

El sistema de transporte Aeromovil se encuentra implantado a lo largo de la Av. Loureiro da Silva en Porto Alegre, Río Grande do Sul, Brasil. En su estado actual de desenvolvimiento, posee una única estación de embarque y desembarque y un trecho de vía recta y plana con aproximadamente 650 metros de extensión, lo que lo caracteriza como un sistema experimental.

El vehículo, con 25m de longitud (Figura 1), transita sobre vías apoyadas en una viga elevada de hormigón pretensado con sección interna hueca de 1 m^2 , tipo cajón abierto. El tubo de la vía es compuesto de vigas moduladas con una longitud de 25m apoyadas en pilares igualmente espaciados. En el interior del tubo se encuentran aletas que son rigidamente ligadas a las estructuras de los vehículos por medio de barras de acero. Una hendidura longitudinal a lo largo de toda la extensión de la vía, vedada por elementos flexibles, posibilita el desplazamiento del conjunto aleta-vehículo.

En una de las extremidades de la vía esta localizada una unidad estacionaria denominada de conjunto moto-propulsor. Consiste en un grupo motor-compresor de aire tipo centrífugo que tiene por finalidad crear succión o presión positiva dependiendo de la posición de las válvulas neumáticas que conectan el conjunto a la vía. La acción del diferencial de presión en las aletas responde por la propulsión del vehículo.

3. Desempeño Cinemático

Actualmente el control del sistema es manual, siendo realizado externamente al vehículo por un operador localizado en una cabina de comando que acciona las válvulas neumáticas de comando. Las válvulas permiten apenas las siguientes operaciones: presión positiva o succión en el tubo, operación totalmente cerrada (efecto pistón), totalmente abierta, 1/3 abierta e 2/3 abierta.

Durante la evaluación del desempeño cinemático del vehículo en la línea piloto, fue utilizado un acelerómetro lineal con salida analógica conectado a un registrador gráfico e a una placa conversora ana-

lógica-digital instalada en un microcomputador. Cuatro serie de testes fueron realizados englobando las siguientes alternativas operacionales de desplazamiento del vehículo: aceleración por presión en la aleta, aceleración por depresión e desaceleración por presión. Para representar diferentes condiciones de operación, en cada una de las series se varió la carga del vehículo. Pasajeros fueron simulados por bolsas de arena de 65 kg. distribuidas uniformemente en el piso e asientos del vehículo hasta un máximo de 300 bolsas, compatibles con la capacidad máxima propuesta.

Los resultados experimentales indicaron que los perfiles de aceleración por presión y depresión se aproximan a los del modelo de aceleración lineal donde la aceleración máxima es adquirida después del inicio de la movimentación del vehículo, apareciendo una disminución lineal de la aceleración a medida que aumenta el tiempo recorrido. Las siguientes relaciones fueron establecidas para válvulas totalmente abiertas:

presión	$ap = 1,27$	$e^{-0,010 \cdot K}$	con	$R^2 = 0,98$
	$sp = -0,04$	$e^{-0,021 \cdot K}$	con	$R^2 = 0,98$
depresión	$ap = 1,06$	$e^{-0,011 \cdot K}$	con	$R^2 = 0,97$
	$sp = -0,03$	$e^{-0,025 \cdot K}$	con	$R^2 = 0,97$

donde ap indica la aceleración inicial (m/s), sp representa la relación de variación de la aceleración (m/s³), K expresa la ocupación del vehículo (%) y R indica a correlación entre as respectivas variables y la capacidad del vehículo. Con relación al frenado por reversión de flujo de aire en el tubo, se verificó que la misma puede ser representada por un modelo mixto que incluye un periodo inicial de desaceleración lineal y un periodo final de desaceleración constante donde el módulo de la relación de desaceleración final se aproxima al de desaceleración inicial dada al vehículo. Para que estos niveles de desaceleración sean alcanzados es necesario que, una vez adoptada la decisión de proceder a la reversión máxima de flujo de aire en el tubo, quede el operador impedido de modular las aberturas de las válvulas de modo a corregir la posición final de parada del vehículo.

En la Figura 2 están representadas las tres etapas del perfil aceleración x tiempo: aceleración lineal, desaceleración lineal y desaceleración constante. Con base en estas etapas, se desenvolió un modelo cinemático (Lindau, 1985c.), que, a cada incremento de tiempo, reevalua las características cinemáticas del vehículo (aceleración o desaceleración, velocidad y distancia recorrida). En función de los parámetros de entrada y de actualización del desempeño, ecuaciones embutidas en el modelo, permiten la determinación de la duración de cada etapa.

4. Operación Manual

Con el objetivo de comparar los tiempos de recorrido del vehículo operado manualmente con los resultados producidos por el modelo cinemático, fueron realizadas algunas mediciones en la línea piloto. En las configuraciones operacionales que se aproximaban mucho de la rutina diaria del operador (vehículo vacío parado junto a la estación de embarque e desembarque de pasajeros), los resultados de campo se aproximaban mucho a los obtenidos con el modelo. Pero como los niveles de aceleración varían significativamente con la carga del vehículo, es prácticamente imposible esperar que el operador sea capaz de juzgar el exacto instante en que debe ser iniciado el proceso de reversión máxima del flujo de aire en el tubo de forma que el vehículo vaya a parar exactamente en la posición final pre-establecida. De hecho, durante los ensayos de campo se verificó que, bajo condiciones variables de carga, las posiciones finales no siempre fueron exactamente alcanzadas. Durante la operación comercial es de esperarse que el operador controle constantemente las características cinemáticas del vehículo, ejecutando modulaciones en las válvulas del grupo moto-propulsor en la etapa de frenado, para que el vehículo alcance la posición final de parada dentro de un margen aceptable de error.

Durante algunos ensayos de operación manual simulada de parada (Zanutto et al, 1985) se verificó una desaceleración media de frenado del orden de aproximadamente $0,3 \text{ m/s}^2$, para que la precisión de parada fuese inferior a 2m en 90% de los casos estudiados que engloban varios niveles de carga del vehículo. A partir de este resultado, se elaboró un modelo con solamente dos etapas: aceleración lineal e desaceleración constante. Este segundo modelo produce tiempos de recorrido significativamente mayores que los obtenidos por el modelo anterior.

5. Operación Automática

Ninguno de los modelos anteriores abordó la simulación de la operación automática discreta de Aeromovil. Todo el ecuacionamiento utilizado para representar el desplazamiento del vehículo a lo largo de un trecho partió de la hipótesis que sería posible dar inicio al proceso de frenado en un determinado instante, de forma que el vehículo fuese a parar en la estación subsiguiente de embarque e de desembarque de pasajeros dentro de los padrones de performance cinemática embutidos en el programa.

Para representar la operación automática, aun en fase de desenvolvimiento y, conseqüentemente, aun no implantada en la línea piloto, se optó por la elaboración de un modelo que posibilita la simulación de interacciones existentes entre vehículos, conjunto moto propulsores, sensores de vía e demas instrumentos previstos para el control automático de la operación.

El sistema automático propuesto por el fabricante se basa en el principio de la operación del vehículo de acuerdo con los desempeños cinemáticos que conduzcan a idénticos tiempos de recorrido a lo largo de los diferentes trechos entre estaciones de embarque y desembarque. Como consecuencia resulta que, cualquier vehículo, independien-

temente de su ocupación, deberá recorrer cualquiera de los trechos entre estaciones de embarque e desembarque en un periodo constante de tiempo. En otras palabras, un vehículo vacío deberá recorrer un trecho corto en el mismo tiempo que otro, ocupado, aunque tenga que recorrer el trecho mas largo de la línea.

Como la aceleración varia con a ocupación de los vehículos, para cada carga habrá un perfil velocidad x distancia que, una vez respetado, posibilitará al vehículo recorrer un determinado trecho dentro de un intervalo pre-especificado de tiempo. En la práctica, de acuerdo con lo demostrado por la Figura 3, fueron sugeridos cuatro perfiles.

Se presupone que la interacción entre los sensores de la vía, microprocesadores del vehículo e de la estación deberá posibilitar el control del desenvolvimiento del vehículo dentro del perfil que mas se adapte a su carga.

6. Control Durante la Operación Automática

De acuerdo con informaciones dadas por el projectista, fue posible detallar el proceso de desplazamiento del vehículo A entre dos estaciones, de acuerdo con la Figura 4:

a. el vehículo A, después de terminado el embarque y desembarque de los pasajeros con origen y destino en la estación A, esta libre para recorrer el trecho entre las estaciones A y B;

b. una señal es transmitida por el operador de la estación A a los microprocesadores localizados en la estación B. Simultaneamente son enviados señales a las válvulas 2, 17 y 18 (2 y 17 abren y 18 cierra);

c. los microprocesadores interpretan la señal y comandan las válvulas 15, 13 y 7 (15 abre 1/3 encuanto 13 y 7 abren totalmente), iniciando la propagación de la onda de succión en el tubo;

d. el vehículo A inicia la movimentación rumbo a la estación B;

e. el vehículo A es detectado por los 1º e 2º sensores del trecho (1);

f. los microprocesadores de la estación B interpretan los señales emitidas por los 1º y 2º sensores del trecho, calculado a aceleración del vehículo A, que, cuando comparada con aceleraciones tabula-

(1) El 1º y 2º sensores del trecho están dispuestos, respectivamente, a 3 y 4 metros del 1º imán del vehículo considerando que el mismo este en la posición ideal de parada en la estación A. El vehículo carga dos imanes que distan 0,5 m uno del otro.

das (2), permite la selección del perfil velocidad x distancia a ser inicialmente adoptado;

g. con base en el perfil seleccionado, la válvula 15 mantiene la posición 1/3 cuando el vehículo está hasta con 30% de la carga (perfil 1 o 2) adoptando la posición 3/3 (totalmente abierta), cuando el vehículo está con mas de 70% de la carga (3);

h. en el momento en que la aleta posterior del vehículo A pasa la válvula 2, esta y la válvula 17 son cerradas, abriéndose la válvula 18;

i. al cruzar los demás sensores del trecho (4), las posiciones y velocidades del vehículo A son interpretados por los microprocesadores de la estación B, procesandose eventualmente, una variación en la posición de la válvula 15 o una alteración en el perfil inicialmente seleccionado por el vehículo A (5);

j. el paso (i) es repetido hasta que el vehículo A pasa la posición del sensor de comienzo del régimen;

l. los sensores subsiguientes tienen por finalidad permitir la modulación de la abertura de la válvula 15 de forma que el vehículo siga la velocidad dictada por su perfil;

-
- (2) Las aceleraciones tabuladas fueron obtenidas del propio modelo de simulación. Por lo tanto, fue extraída del modelo la aceleración del vehículo al cruzar los primeros dos sensores: $0,90 \text{ m/s}^2$ (perfil 1 = vacío); $0,55 \text{ m/s}^2$ (perfil 2 = 30% de la carga); $0,35 \text{ m/s}^2$ (perfil 3 = 70% de la carga); $0,25 \text{ m/s}^2$ (perfil 4 = lleno). El perfil inicialmente adoptado es aquel cuya aceleración mas se aproxima de la aceleración del vehículo.
 - (3) Se consideró un tiempo de efectividad o sea, un intervalo de tiempo recorrido entre la emisión del comando de variación de posición de la válvula y el instante en que la aceleración del vehículo alcance el nivel correspondiente al nuevo valor de presión/succión en el tubo, compatible al descrito en Zanutto et al (1985), $0,9\text{s}$ en presión/pistón, y $2,4\text{s}$ en succión. Durante esos periodos, se supuso que la aceleración variase linealmente.
 - (4) Los sensores en los primeros 40m de percurso están dispuestos en intervalos de 5 metros. De 40m a 100m están dispuestos a cada 10 metros. De 100m hasta 100m antes del comienzo de la desaceleración, punto este calculado a partir del perfil 4 de velocidad x distancia, la distancia entre sensores es de 25m. De este punto en adelante hasta la estación, los sensores están dispuestos en intervalos de 10m.
 - (5) Las decisiones para mantenimiento o alteración de la posición de la válvula 15 están descritas en detalle en los flujogramas de Lindau (1985d.).

m. a 300m de la estación B, una bobina fijada en la vía para el sistema de operación de frenaje instalado dentro del vehículo A, constituido por microprocesadores programados para comparar la velocidad y la distancia del vehículo con valores calculados para el perfil velocidad x distancia de frenado;

n. el paso (1) es repetido hasta el momento en que el vehículo A cruza el sensor del trecho localizado a aproximadamente 30 metros antes del punto del comienzo de la desaceleración para el perfil considerado, cuando la válvula 15 cierra, dando por iniciado el proceso de frenado por el efecto pistón, donde el ventilador trabaja en vacío;

o. la suplementación de frenado (6) se comienza en el instante en que los microprocesadores del vehículo A detectan que el mismo alcanza el nivel de velocidad x distancia de frenado calculado a partir de la desaceleración constante de 1 m/s^2 .

p. a 25m del punto final de parada, una bobina instalada en el trecho coloca en cero los contadores de los microprocesadores del vehículo de forma de obtener una mejor precisión en la parada.

Se, por alguna razón el vehículo B no estuviese dejando la estación B y/o la válvula 3 no estuviese abierta, el comienzo de la frenada del vehículo A es anticipado en 50m. Eso es para garantizar la parada del vehículo A antes de la estación B. En este caso, el sistema de frenos de las ruedas es accionado por una bobina alternativa localizada junto a la principal descrita en el paso (m). Una vez desencadenado el programa alternativo de frenado, la válvula 3 permanece cerrada hasta la parada completa del vehículo. La válvula 3 solamente será nuevamente abierta después del vehículo B cruzar la válvula 4. Abiertas las válvulas 3 y 8, el vehículo A es llevado hasta la estación B por operación manual efectuada por el operador de la cabina de la estación B.

Antes de describir el modelo utilizado para calcular el desplazamiento del vehículo en la operación automática discreta, es necesario abordar algunas de las hipótesis básicas adoptadas:

a. la operación automática, no se encuentra aun implantada en la línea piloto. La formulación matemática adoptada parte del principio que sea posible operar comercialmente el sistema Aeromovil de acuerdo con los 15 pasos anteriormente descriptos;

b. que sea posible introducir un transdutor en la región de las válvulas 15 y 16 que posibilite el alivio de presión en el tubo durante la aplicación del efecto pistón de tal forma que la desaceleración, independientemente de la carga, la posición y velocidad del vehículo, nunca pase el valor de $0,7 \text{ m/s}^2$;

(6) Como el frenado por efecto pistón debiera estar limitado a $0,7 \text{ m/s}^2$, ella debiera ser suplementada, hasta el valor de 1 m/s^2 , por un sistema de frenos de rozamiento instalado en las ruedas del vehículo.

c. que el freno de rozamiento en las ruedas, una vez accionado garantiza a complementación de la desaceleración del efecto piston hasta 1 m/s^2 ;

d. que la precisión de parada en el frenado conjugada esté dentro de la variación admisible.

7. Formulación del Modelo

La operación automática discreta es simulada através de un programa desarrollado para reproducir el comportamiento cinemático, dinámico e energético de un vehículo que transita a lo largo de un trecho que separa dos estaciones propulsoras.

Para la formulación matemática del problema (Ferreira, 1985) fueron desarrollados dos dominios físicos acoplados: el primero, centrado en el vehículo, envolviendo su equilibrio de fuerzas; el segundo englobando el sistema de propulsión y el flujo de aire en el tubo con las respectivas resistencias.

El vehículo y las fuerzas en él actuantes son analizados en el primer dominio. El esfuerzo de tracción, que actúa sobre las dos aletas del vehículo, se origina en la diferencia de presión producida por el conjunto moto-propulsor. El nivel de presión en las aletas varía en función de la posición del vehículo con relación al conjunto moto-propulsor teniendo en vista las pérdidas de aire a lo largo del tubo.

De forma genérica, la ecuación de equilibrio para el movimiento del vehículo puede ser expresada por:

$$E(t) = \Delta p \cdot \Omega = M \frac{dV}{dt} + \sum F_r \quad (1)$$

donde $E(t)$ es el empuje, Δp es el diferencial de presión sobre las aletas ($\Delta p_1 + \Delta p_2$, con $\Delta p_1 = p_5 - p_4$ y $\Delta p_2 = p_3 - p_2$ en la figura 5), Ω es la sección transversal de las aletas, M es la masa total del vehículo incluyendo la respectiva carga dV/dt es la aceleración instantánea del vehículo y $\sum F_r$ es la sumatoria de las fuerzas resistentes al movimiento del vehículo.

Las fuerzas resistentes del primer dominio son debidas a la resistencia al movimiento del vehículo. En la ecuación (2) están colocadas, respectivamente, las fuerzas que representan la resistencia de rozamiento de las ruedas y bujes, resistencias debida al rozamiento en las juntas de la vía, la resistencia debido al arraste aerodinámico de los vehículos y a las eventuales resistencias debido a las rampas e las curvas de la vía,

$$\sum F_r = \mu_r \cdot (P_p + P_v) + K + C V_v^2 + F_1 + F_2 \quad (2)$$

donde μ_r es el coeficiente de rozamiento al rodamiento, P_v es el peso del vehículo vacío, P_p es el peso de los pasajeros, K es la fuerza de rozamiento en las vedaciones de goma de la vía, C es la constante de arraste aerodinámico, V_v es la velocidad del vehículo, F_1 es la resistencia debida a las rampas ascendentes F_2 es la resistencia debida a las curvas.

En la formulación matemática del segundo dominio, considerando a complejidad del desplazamiento del aire en el interior del conducto, fue necesario adoptar hipótesis simplificadas basadas en el supuesto escurrimiento incompresible, unidimensional e isotérmico del aire, considerado como un único bloque de masa. La hipótesis de incompresibilidad del aire se fundamentan en los bajos niveles de velocidad alcanzados por el flujo de aire. Se observó, mientras tanto, que en situaciones transientes bruscas con las alcanzadas durante el comienzo del movimiento del vehículo y durante la etapa de frenado, el régimen de escoamiento se altera significativamente. Se cree que el efecto oscilatorio del flujo del aire y la presión en el interior del conducto sea debido a tres factores principales: características del ventilador que provoca la fluctuación del flujo del aire en puntos anteriores al punto óptimo de operación, efectos de compresibilidad del aire, y la característica exitadora de las vedaciones de goma a lo largo de la vía y en las aletas. Este efecto oscilatorio aún no fue incorporado al modelo matemático, mereciendo una investigación mas detallada e completa.

En estas condiciones, la ecuación que representa el movimiento del aire en el interior del conducto puede ser expresada por,

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial t} + v \frac{\partial V}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

onde x e y representan los ejes (x es el eje axial del conducto), ρ es la masa específica del aire, V es la velocidad del aire en la dirección axial del conducto, p es la presión termodinámica del aire a lo largo de x , y , μ es la viscosidad absoluta del aire. Sustituyendo las fuerzas viscosas por la expresión de la pérdida de carga en el conducto de sección circular equivalente obtenemos:

$$\rho \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{dp}{dx} + \rho f \cdot \frac{V^2}{2D} = 0 \quad (4)$$

donde f es el factor de rozamiento en función de la rugosidad interna del conducto e del régimen de escoamiento del aire y D es el diámetro equivalente de la sección del conducto.

Integrando la ecuación (4) para los diferentes trechos (espacio entre aletas, entre sistema moto propulsor y vehículo, entre vehículo e salida atmosférica) y considerando que la longitud de succión se altera en la medida en que el vehículo se desplaza en vía, se obtiene para el segundo dominio, la siguiente ecuación,

$$\Delta p = \Delta p_t - \rho \cdot \frac{dV}{dt} L_e - \rho f \cdot \frac{V^2}{2D} L_e \quad (5)$$

donde Δp_t es definido como la presión estática disponible por el ventilador ($p_6 - p_1$) y L_e se encuentra indicado en la figura 5.

La velocidad del aire en el interior del conducto próximo al vehículo, puede ser relacionada con la velocidad del vehículo a través de,

$$V = V_v + \Delta V \quad (6)$$

onde ΔV es la parte de la velocidad proporcionada por las pérdidas de aire por las vedaciones de las aletas y el conducto, expresada por,

$$\Delta V = 0,95 \cdot \frac{A}{\Omega} \cdot \left(\frac{2}{\rho} \Delta p\right)^{1/2} \quad (7)$$

donde A es la área de pérdidas.

Las ecuaciones que expresan la presión disponible por el ventilador en función del caudal total de circulación por el ventilador, Q_t , fueron determinadas experimentalmente (Ferreira, 1984) para dos rotaciones,

$$\begin{aligned} & \cdot 1150 \text{ rpm} \\ \Delta p_t &= -0,39 Q_t + 664 - 1,45 Q_t^2 \end{aligned} \quad (8.a)$$

$$\begin{aligned} & \cdot 1750 \text{ rpm} \\ \Delta p_t &= 57,21 Q_t + 1460 - 3,77 Q_t^2 \end{aligned} \quad (8.b)$$

Las ecuaciones 1, 5, 6, 7 y 8 forman un sistema con resolución numérica posible, donde la aceleración del vehículo que considerada como variable dependiente. La condición inicial para el sistema es dada por,

$$\begin{aligned} \text{para } t=0 \quad \therefore \quad & V = \Delta V \\ & V_v = 0 \\ & p = \Delta p_t \end{aligned}$$

8. Modelo Numérico

En su versión actual, el modelo para evaluar el desempeño del sistema Aeromovil consiste en dos programas. Un genera los perfiles velocidad x distancia para 4 diferentes cargas del vehículo y el otro simula el desplazamiento del vehículo por un trecho que separa dos estaciones de embarque y desembarque.

Como datos de entrada, el primer programa requiere el número de trechos que compone una determinada línea, las coordenadas de cada estación, el tiempo de recorrido propuesto, las cuatro aceleraciones medias correspondientes a los respectivos perfiles velocidad x distancia a ser alternativamente adoptada por los vehículos en los trechos, la aceleración del frenado común a todos los perfiles. Este programa tiene por objetivo:

a. evaluar si el tiempo de recorrido inicialmente propuesto es compatible con el trecho crítico de una línea, aquel trecho que requiere el mayor intervalo de tiempo para ser vencido por un vehículo totalmente cargado;

b. localizar, por coordenadas, los sensores de todos los trechos del circuito;

c. asociar, a cada sensor, cuatro velocidades, cada una correspondiendo a uno de los diferentes perfiles velocidad x distancia.

El segundo programa simula, a cada intervalo de tiempo, las características cinemáticas, dinámicas y energéticas de un vehículo en el trecho entre dos estaciones propulsoras. Se inicia el análisis por la etapa de permanencia del vehículo en la estación también referida como etapa de embarque/desembarque. Cuando en movimiento, el vehículo pasa sucesivamente, hasta su parada en la estación subsiguiente, por las etapas de aceleración, régimen y desaceleración.

La etapa del movimiento del vehículo comienza en el instante de la abertura de las válvulas. El desplazamiento del vehículo se inicia en el momento en que el diferencial de presión supera las fuerzas resistentes al movimiento. Cada vez que el vehículo cruza un sensor de la vía, ocurre la comparación de su velocidad con la dictada pelos sensores para su perfil de desplazamiento. De acuerdo con los resultados comparativos es alterada la posición de la válvula y consecuentemente el nivel de presión del aire en el conducto.

La etapa de aceleración es encerrada cuando el vehículo cruza el sensor de inicio de regimen del perfil. Ocasionando la imposibilidad de obtención, en la práctica, de un movimiento rectilíneo uniforme, es necesario realizar una serie de correcciones de la velocidad através de la modulación de las válvulas del sistema moto-propulsor.

El frenaje del vehículo es realizado por la conjugación del efecto pistón con el efecto de rozamiento. La simulación del efecto pistón del sistema Aeromóvel fue perjudicado por la inexistencia de estudios específicos en la línea piloto. Como el sistema conjugado de frenaje aún no se encuentra implantado en la línea piloto y, consecuentemente, existiendo la imposibilidad de obtener parámetros para modelar detalladamente esta operación, se desenvolvió un modelo simplificado basado en algunos pocos ensayos de campo que no permiten conclusiones quanto a la precisión de parada del vehículo en las estaciones.

El segundo programa de modelo numérico fue ajustado con los datos levantados por ensayos de campo. Para la calibración del programa fueron simuladas condiciones similares a las ensayadas. La Figura 6 posibilita una comparación entre curvas experimentales e resultados producidos por el programa en la fase de aceleración con la válvula totalmente abierta.

9. Resultados

Los dos programas, implantados en un microcomputador, actúan en conjunto. Los datos de salida del programa de generación de perfiles son almacenados en archivos para lectura posterior por el segundo programa. Con este proceso, es posible modelar cualquier trecho que separa estaciones subsiguientes de embarque y desembarque de pasajeros. Los resultados del programa que procesa el desplazamiento del vehículo pueden ser alternativamente direccionados a uno de los siguientes canales de salida:

- a. video do micro (gráficos o resultados numéricos);
- b. graficador;
- c. impresora convencional

La Figura 7 presenta los resultados generados por el modelo através del graficador. Los puntos indican la localización de los sensores con las respectivas velocidades dictadas por los 4 perfiles. El vehículo adopta, de acuerdo a su ocupación, el perfil de menor aceleración. Las oscilaciones de velocidad son propias del principio de propulsión e sensoreamiento del sistema pues:

- a. informaciones referentes a la velocidad del vehículo solamente son obtenidas en la medida que el mismo cruza los sensores de la

via;

b. alteraciones en la posición de las válvulas del grupo moto-propulsor solamente ocurren cuando las velocidades detectadas pasan los límites previstos para los respectivos perfiles de velocidades;

c. alteraciones en la posición de las válvulas requieren un periodo relativamente largo para la plena efectividad en la aleta do vehículo;

d. los dos niveles utilizados para el control de velocidad en el periodo del regimen, o sea, piston y valvula a 1/3, resultan, respectivamente, en desaceleraciones y aceleraciones muy elevadas.

De las otras configuraciones simuladas se observó que las variaciones en la velocidad son tanto mas pronunciadas cuando menor es la carga del vehículo. Como formas de reducir tanto la frecuencia como la amplitud de las oscilaciones, se sugiere la introducción de un o mas niveles de comando entre las posiciones 0 a 1/3 de la válvula, además de una mayor densidad de los sensores en la vía.

La Figura 7 presenta tambien otros datos de recorrido producidos por el modelo: distancia recorrida en la simulación, tiempo del recorrido, consumo energetico total y específico, velocidad media y máxima, ademas de la relación media de aceleración inicial. ,

10. Conclusión

En este trabajo se describe la metodologia adoptada para evaluar el desempeño del Aeromóvil durante la operación automática. Como el sistema automático aún esta en fase de concepción y consecuentemente aún no implantado en la linea piloto, se desarrolló un modelo que asocia las características dinámicas del sistema propulsor al comportamiento cinemático del vehículo al simular las interacciones existentes entre vehículos, conjuntos moto-propulsores, sensores de via, microprocesadores ubicados en los vehículos en las estaciones y demas equipamientos utilizados en el control de la operación automatizada.

El modelo fue calibrado y posteriormente usado para evaluar tiempos de recorrido, velocidades operacionales, consumos energéticos además de otras medidas de desempeño para trechos rectos o curvos con distancias variables, que separan sucesivas estaciones propulsoras. Con base en los resultados obtenidos, es posible estimar las potencialidades del sistema en términos de capacidad de transporte.

El modelo demostró , tambien, su utilidad en el proceso de desenvolvimiento de la concepción de la operación automática, especialmente en lo que respecta a la necesidad de ser introducida una mayor modulación de las válvulas de comando del flujo del aire en el conducto.

Referencias

- FERREIRA, V.C.S. (1984) Análise do sistema de propulsão. Relatório nº 0.5. 07/84, Fundação Universidade-Empresa de Tecnologia e Ciências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- FERREIRA, V.C.S. (1985) Análise simulada do sistema de propulsão. Relatório nº 0.5. 11/84, Fundação Universidade-Empresa de Tecnologia e Ciências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- LINDAU, L.A. (1985 a) Uma metodologia para avaliar os tempos de embarque e desembarque no transporte público. V Congresso Nacional de Transportes Públicos, Belo Horizonte, Brasil.
- LINDAU, L.A. (1985 b) Uma metodologia para avaliar os intervalos de tempo de um sistema pneumático de transporte urbano. XVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Instituto Técnico de Aeronáutica, San José dos Campos, Brasil.
- LINDAU, L.A. (1985 c.) Uma análise cinemática preliminar do aeromóvel. III Encontro de Pesquisa Operacional do Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- LINDAU, L.A. (1985 d.) Performance do sistema aeromóvel. Relatório nº O.S. 12/84, Fundação Universidade-Empresa de Tecnologia e Ciências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- ZANUTTO, J.C., CARDOSO, J.E.D. y TAMASHIRO, S. (1985) Análise do sistema de controle e sinalização, Relatório nº 21537 do Centro de Desenvolvimento Ferroviário, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Brasil.

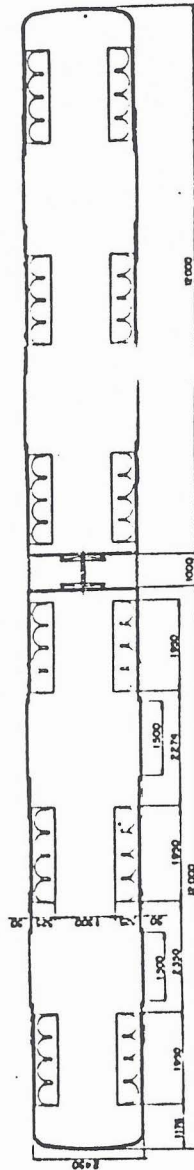
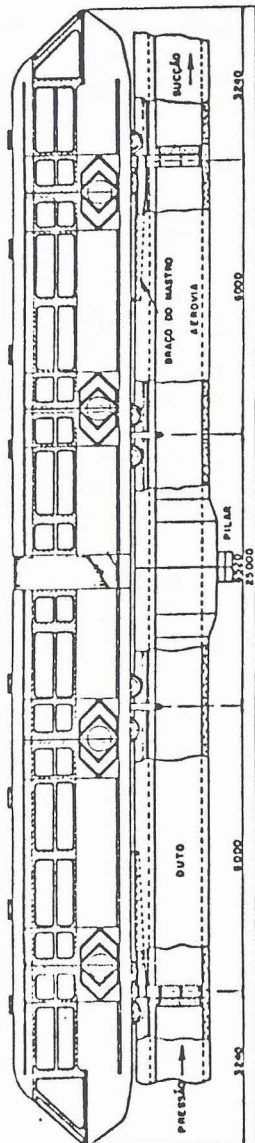
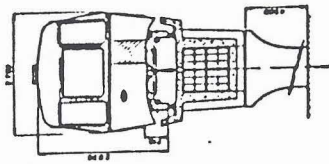


FIGURA 1: El vehículo en la vía

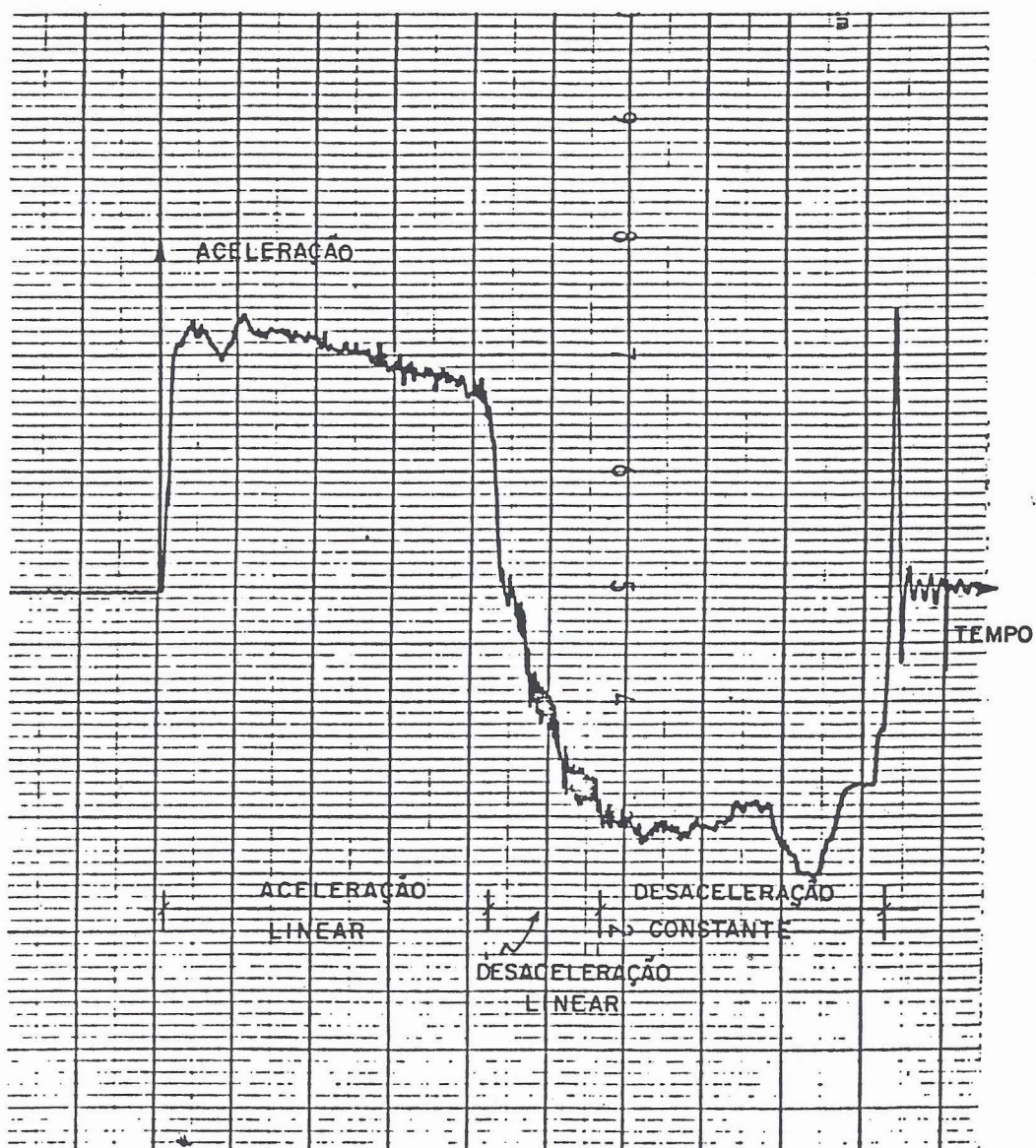


FIGURA 2: Etapas del modelo cinemático.

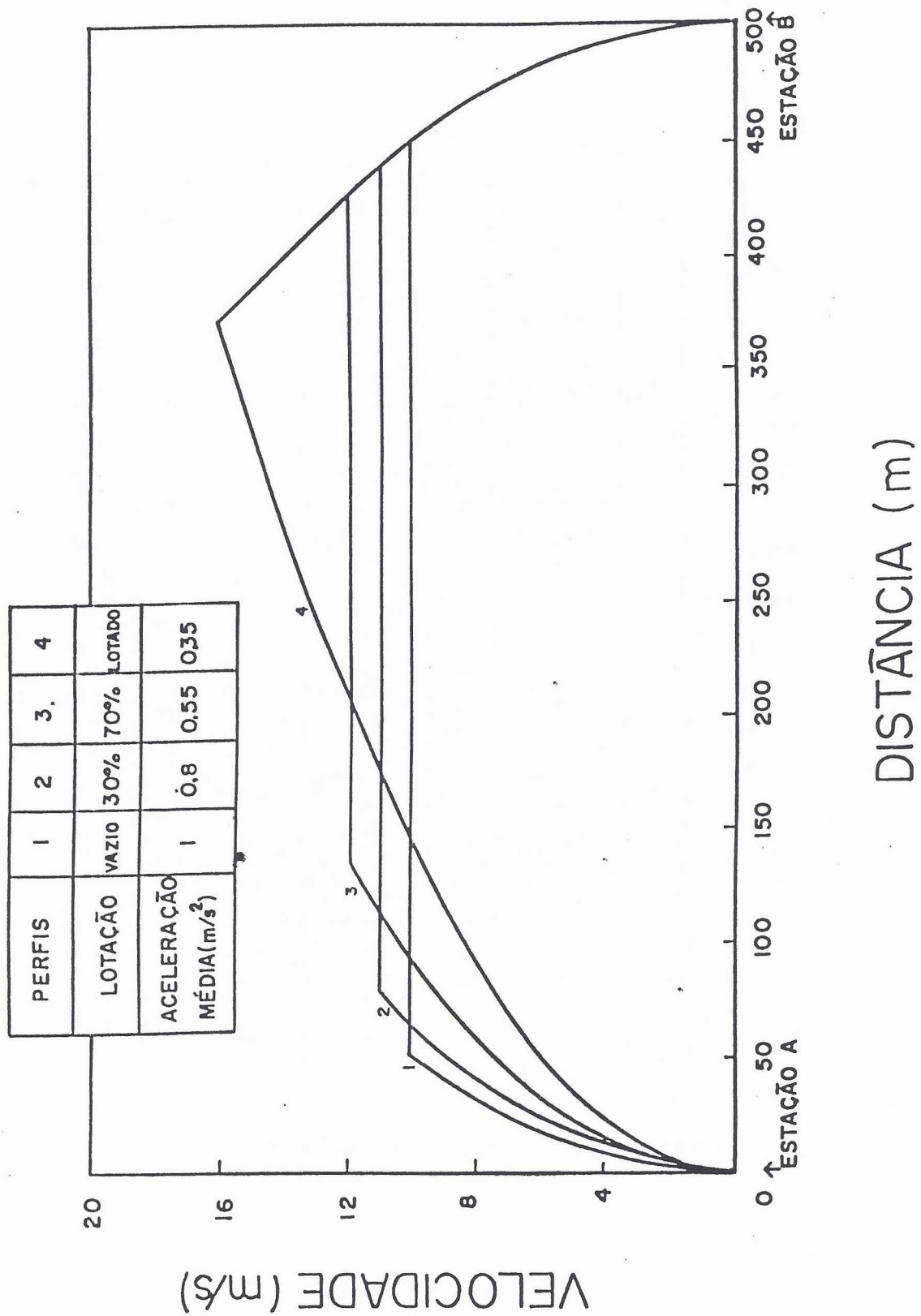
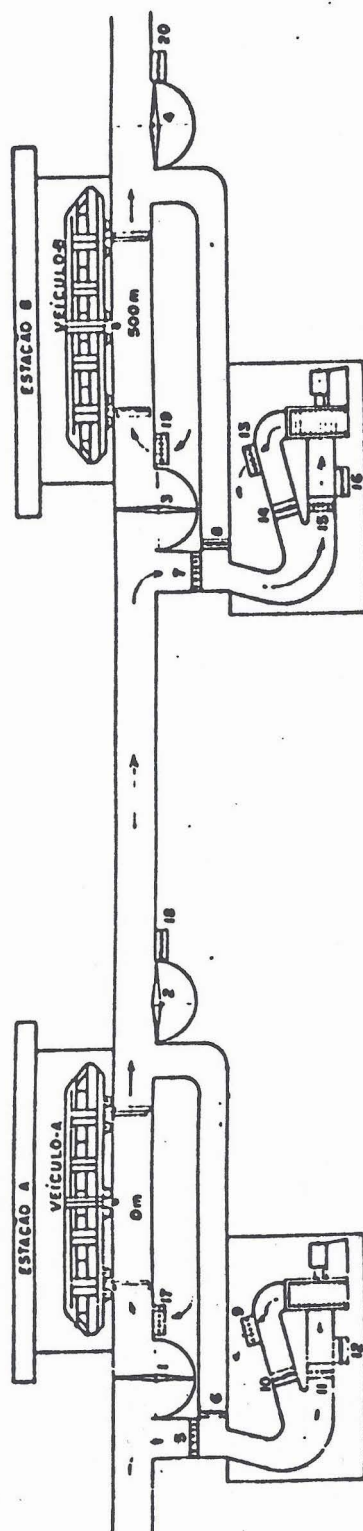


FIGURA 3: Perfis velocidade distância para diferentes cargas



1.2.3.4 - VÁLVULAS DE ISOLAMENTO DE TRECHO VLI
 17.18.19 e 20 - VÁLVULAS ATMOSFÉRICAS VENEZIANA VAT
 11.12.15 e 16 - VÁLVULAS DE CONTRÔLE DO VENTILADOR VCV
 10.9.14 e 13 - VÁLVULAS DE SEGURANÇA DO VENTILADOR VSV
 5.6.7 e 8 - VÁLVULAS DE DESVIO DE FLUXO VDF

OPERAÇÃO C/VENTILADOR NA ESTACÃO
 ACELERAÇÃO, INÍCIO

FIGURA 4: Comienzo del desplazamiento del vehículo A

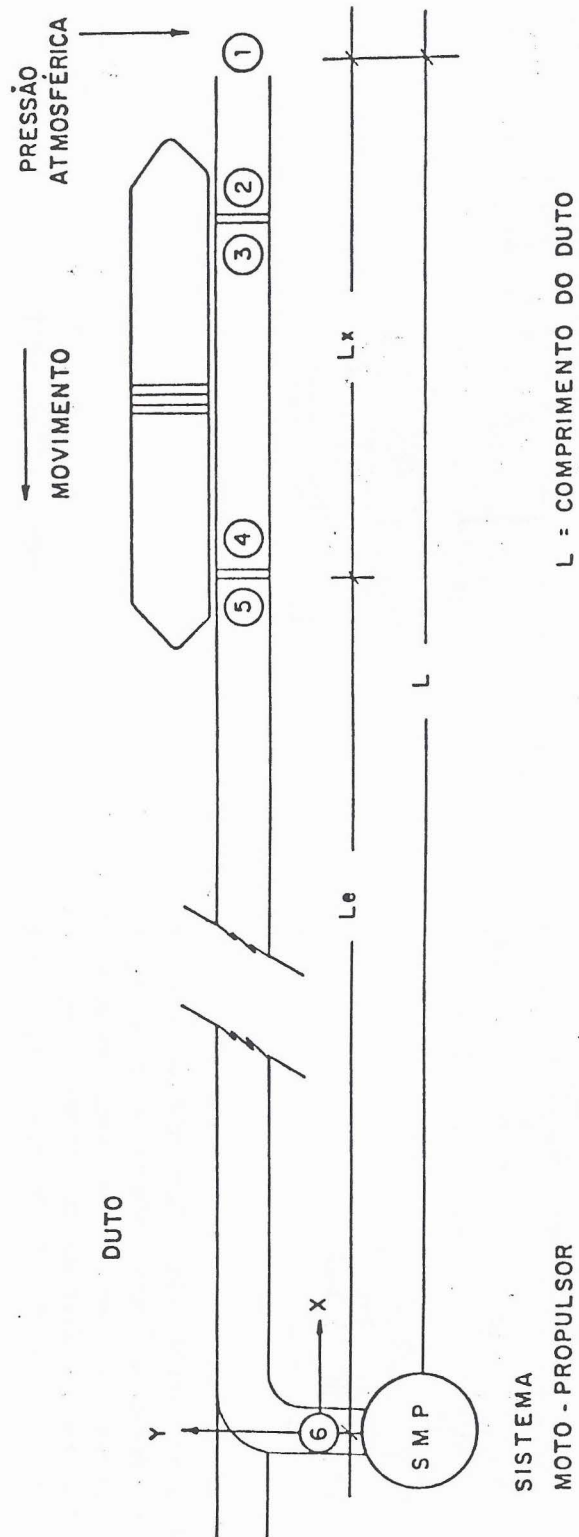


FIGURA 5: Domínios físicos do sistema de propulsão do veículo

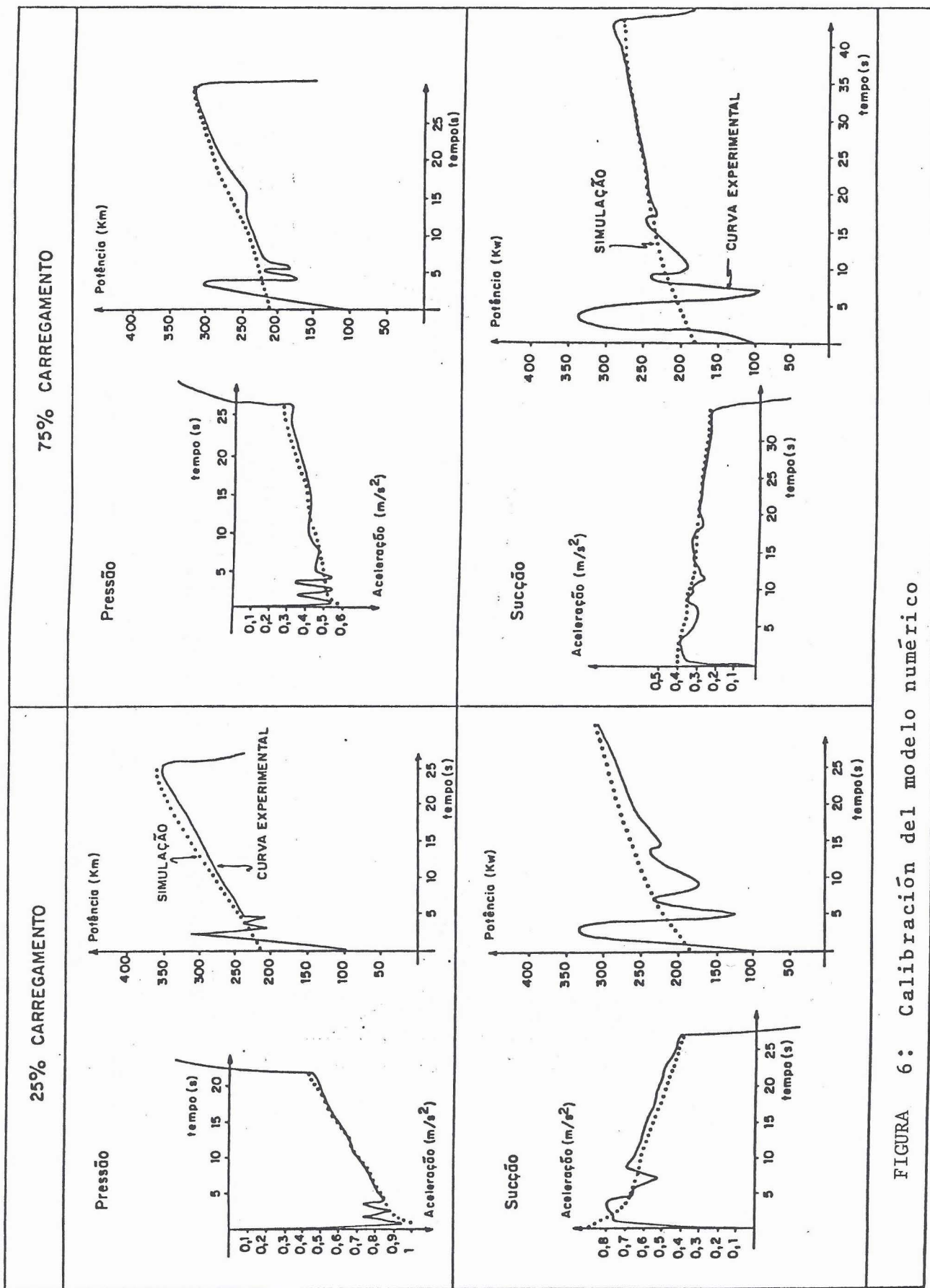


FIGURA 6: Calibração del modelo numérico

AEROMOVEL-PERFIS DO TRECHO

DADOS DO PERCURSO:

DISTANCIA : 501,88 M
 TEMPO PERC: 74 S
 ENERG. TOT.: 3,68 KWH
 ENERG. ESP.: 0,027 KWH/QP-KWH
 VEL. MEDIA : 6,78 M/S
 VEL. MAXIMA: 10,86 M/S
 ACEL. MEDIA: 0,28 M/S²

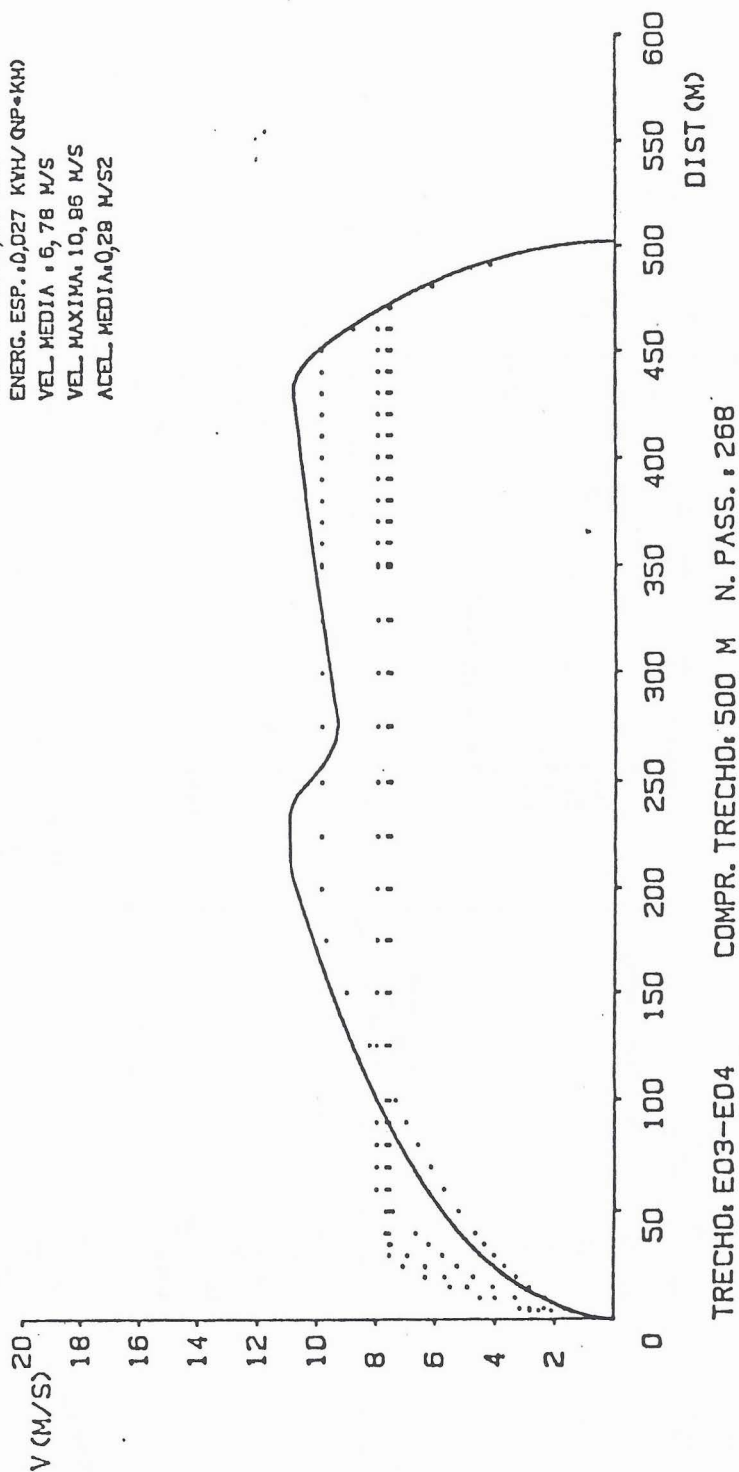


FIGURA 7. Veículo recorrendo el trecho de 500 m entre estaciones propulsoras