

Fórmula 1 & Física 1

Manuel Simões Filho

Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina

C.P. 6001, CEP 86051-970, Londrina, PR, Brasil e-mail: simoes@brfuel.bitnet

Trabalho recebido em 13 de maio de 1994

Resumo

O objetivo deste trabalho é exemplificar como, através de dados obtidos numa transmissão televisiva de fórmula 1, podemos fazer um estudo de alguns dos conteúdos ministrados nos cursos introdutórios de física e, ao mesmo tempo, entender alguns aspectos desse esporte, com exploração quantitativa das leis do movimento. Nosso principal resultado será a proposição de um método que pode nos fornecer a potência máxima dos motores desses carros, a partir dos dados de velocidade que são usualmente exibidos nas transmissões desses eventos.

Abstract

In this work we show how the data obtained from a formula-1 television transmission can be used to study some of the contents worked in a first year physics class. We also study some physical aspects of this sport. Our main result is the calculation of the maximum power of the motor of these cars using the velocity data usually shown in the transmission of these events.

Introdução

No dia 19 de outubro de 1991, em Suzuka, Japão, foram efetuados os últimos treinos de classificação para a corrida de fórmula 1 (F-1) que, no dia seguinte, levaria o piloto brasileiro Ayrton Senna ao tricampeonato mundial dessa categoria. Durante a transmissão desse treinamento, a televisão japonesa transmitiu as duas "flaying laps" (voltas de classificação) desse piloto colocando no ar a velocidade do automóvel tal como ela era exibida no velocímetro digital do automóvel. Essa prática, de exibir os dados do velocímetro dos automóveis F-1 durante as transmissões das corridas, tornou-se usual. A tabela de velocidades assim obtida será manipulada de tal maneira a obter, por exemplo, informações acerca da aceleração desses carros, da potência instantânea produzida pelos seus motores e da energia perdida com o atrito.

Tivemos a preocupação de que os conceitos abordados neste trabalho pudessem ser entendidos por um aluno do primeiro ano de física, que é o público alvo deste trabalho. Isto faz com que algumas vezes nos preocupemos em abordar pontos que para um leitor mais

qualificado irão parecer desnecessários. No entanto, nossa experiência tem mostrado que a aplicação das leis e métodos da física ao universo de interesse desses alunos é fator importante de motivação. É este o objetivo deste trabalho. Ressalte-se que a análise numérica que fazemos certamente está além de um curso introdutório. Mas isto não impede que os resultados obtidos possam ser entendidos pelos "calouros".

Acelerando

Selecionamos como objeto de análise um trecho que dura 12,6 segundos, durante o qual o automóvel está em ininterrupta aceleração, e que vai do momento em que o piloto completa a "ginkane" até o momento em que ele deixa a reta dos boxes. Ainda que haja aí uma grande curva, ela não terá qualquer relevância para os resultados que apresentaremos a seguir.

Na figura 1, mostramos os dados de velocidade do carro obtidos da televisão tais como eles foram editados. Vê-se que o carro ganha velocidade rapidamente, mas não linearmente. Nesta figura vê-se claramente que a velocidade do carro não aumentaria indefinida-

mente, mas tenderia a um valor assintótico para altos valores do tempo. Atribuímos esse fato à resistência ao movimento do carro. A medida que a velocidade aumenta temos um crescimento dessa resistência, provocada tanto pela massa de ar que ele tem que atravessar, quanto pelo seu atrito interno. Isso implica que novos ganhos de velocidade ficam cada vez mais difíceis. Daí, à medida que se aumentam a velocidade, a aceleração diminui. Portanto, num carro em movimento, a aceleração é função da velocidade.

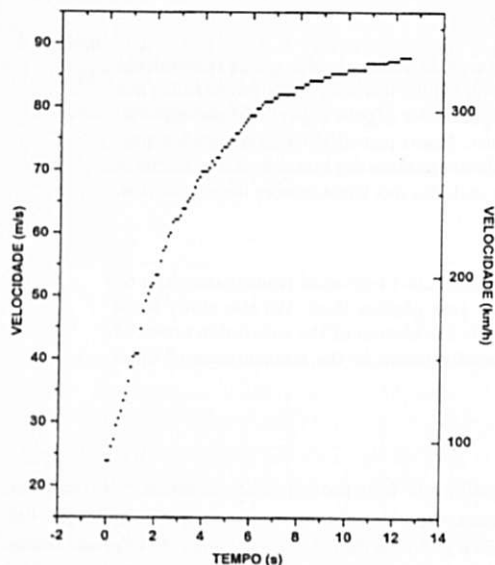


Figura 1. Gráfico da velocidade em função do tempo para o trecho que selecionamos para estudo. O fato de não terem sido colocadas barras de erro nos dados significa que é desconhecida a imprecisão da velocidade medida pelo velocímetro do carro.

Para obter a aceleração do carro devemos derivar, em relação ao tempo, os dados da figura 1. A grande dificuldade é que os métodos usuais de derivação são destinados às curvas contínuas. Os dados da figura 1 estão na forma de pontos discretos. Como produzir a derivada desse conjunto de pontos? Para produzir essa derivada usaremos o método dos mínimos quadrados^[1], que faz passar por um coleção de pontos discretos a curva contínua, de um tipo previamente escolhido (usaremos um polinômio - mas não é necessário que o seja), que mais se aproxima, de uma só vez, de todos os pontos dados. Por razões de facilidade numérica usaremos um polinômio do 9º grau. A partir do polinômio que melhor ajusta todos os pontos obtidos da televisão, a

obtenção de sua derivada, e portanto da aceleração do automóvel, é imediata.

Na figura 2 colocamos o gráfico desse polinômio e de sua derivada. Tem-se assim a velocidade e a aceleração do carro em função do tempo no trecho escolhido. Vemos pelas figuras que a aceleração cresce rapidamente até o valor 1.7 g ($1g = 10 \text{ m/s}^2$) em aproximadamente 1.0 segundo^[2]. Depois disso a aceleração vai decrescendo até um valor muito próximo de zero. Observe que durante a queda, em algumas regiões, a aceleração altera seu ritmo de queda. Veremos adiante que essa mudança de ritmo no decrescimento da aceleração está relacionada à troca de marchas pelo piloto do automóvel.

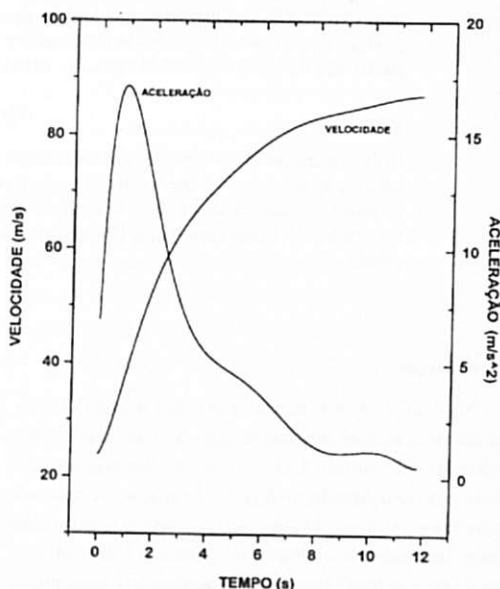


Figura 2. Gráfico do polinômio que interpola os pontos da figura 1 e que representa a velocidade do auto. Desenhamos também a aceleração, tomada como derivada desse polinômio. Note que a aceleração atinge seu valor máximo rapidamente, depois decai até o valor nulo, com algumas regiões onde esta queda é atenuada.

Potência

Fixemo-nos agora numa variável muito importante no automobilismo de competição. A potência desses carros. Vamos procurar mostrar a seguir que, com o que aprendemos a partir da figura 2, é possível produzir uma curva que dá a potência fornecida pelo motor

do carro em função do tempo. Essa potência será definida como a quantidade de energia, por unidade de tempo, que é fornecida pelo motor ao automóvel em movimento. Para avaliar essa potência dividiremos a energia, por unidade de tempo, produzida pelo motor em duas porções: a primeira é aquela parte da energia que é utilizada diretamente para acelerar o carro. Identificamos essa energia com aquela que é armazenada na forma de energia cinética de movimento do carro com relação solo, e que é facilmente identificável pela própria velocidade do carro. Chamaremos a essa porção de potência útil. A outra porção é aquela energia produzida pelo motor e que é perdida, quer nas muitas formas de atrito que podem dissipar energia, quer na energia cinética de rotação das muitas partes do carro que estão a girar (as rodas e todas as engrenagens do motor e câmbio, por exemplo). De maneira esquemática podemos dizer que essa perda de energia tem duas causas: a primeira está na própria máquina, na energia que é perdida para mantê-la funcionando; a outra é o atrito do carro com o ar. Esses dois sorvedouros de energia são inevitáveis. Chamaremos essa energia perdida, por unidade de tempo, de potência dissipada.

É fácil avaliar a potência útil, por unidade de massa, desse veículo. Se $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ é a energia cinética, a potência útil P_u como definida acima, será dada pela variação da energia cinética em relação tempo, $P_u = \frac{dE_c}{dt}$, pois a potência útil é, por definição, a energia produzida pela máquina que é armazenada na forma de energia cinética por unidade tempo. De onde decorre que

$$P_u = mav \quad (1)$$

Vê-se assim que, com os dados da figura 2, é plenamente possível obter a potência útil do automóvel, pois ela só depende da velocidade e da aceleração do carro em movimento. Na figura 3 mostramos o gráfico do produto da velocidade pela aceleração do carro. O que corresponde à potência útil, por unidade de massa, em função do tempo.

Ainda que o conhecimento da potência útil do carro seja um dado importante, seria melhor se pudéssemos conhecer a potência total fornecida pelo motor. Naturalmente essa quantidade deve ser obtida pela soma da potência útil com a potência dissipada. Como destacamos acima, a potência dissipada tem pelo menos dois sorvedouros: o movimento das engrenagens internas do carro; e todas as formas de atrito presentes no carro em movimento. Mas é evidente que destas a grande

perda de energia se dá por atrito. Mesmo porque, ainda que haja variação da energia cinética interna das engrenagens do carro em aceleração, o uso do câmbio faz com que a velocidade de rotação dessas engrenagens, à exceção das rodas, seja mantida num valor que oscila em torno de uma constante.

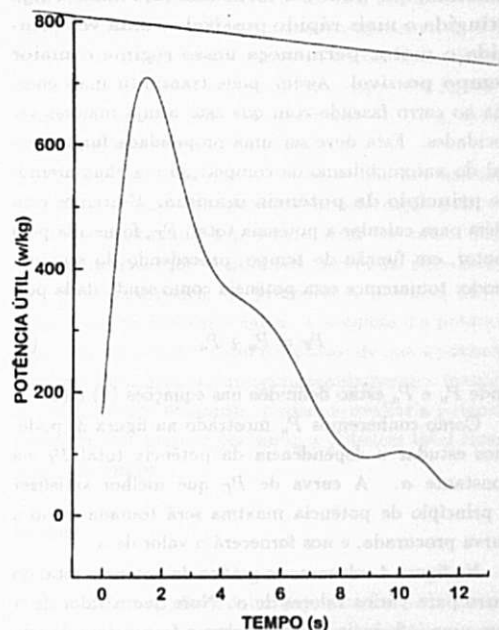


Figura 3. Potência útil, por unidade de massa, do auto em função do tempo. Veja o texto para a definição deste conceito, que foi tomado como o produto da velocidade do carro pela sua aceleração.

Vemos assim que a principal dificuldade está em avaliar a energia dissipada pelo atrito. Sabemos que o atrito se origina da resistência que os meios materiais oferecem ao movimento, e que a força de atrito é tanto maior quanto maior for a velocidade de um meio em relação ao outro. Num automóvel, a perda por atrito se dá quer no movimento relativo das engrenagens internas, quer na resistência do ambiente exterior (atmosfera principalmente) ao movimento do carro. Como temos a velocidade do carro, suporemos que a força de atrito seja proporcional à velocidade do carro, $f_a = \alpha v$, onde α é definido como coeficiente de atrito^[3]. Como, a potência de uma força é obtida pelo produto dessa força pela velocidade, temos que a energia, por unidade de tempo, perdida pelo atrito deve ser dada por^[4]

$$P_a = \alpha \cdot v^2 \quad (2)$$

O princípio da potência máxima

A questão agora é: como calcular o coeficiente de atrito? Para fazer isto lembremo-nos de uma característica fundamental dos carros de corrida: neles é vital que num intervalo de aceleração contínua a potência máxima, que pode ser fornecida pelo motor, seja atingida o mais rápido possível e, uma vez atingida o motor permaneça nesse regime o maior tempo possível. Assim, pode transmitir mais energia ao carro fazendo com que este atinja maiores velocidades. Esta deve ser uma propriedade fundamental do automobilismo de competição e a chamaremos de **princípio da potência máxima**. Usaremos esta idéia para calcular a potência total, P_T , fornecida pelo motor, em função do tempo, procedendo do seguinte modo: tomaremos essa potência como sendo dada por

$$P_T = P_u + P_a \quad (3)$$

onde P_u e P_a estão definidos nas equações (1) e (2).

Como conhecemos P_u mostrada na figura 3, podemos estudar a dependência da potência total P_T na constante α . A curva de P_T que melhor satisfizer o princípio de potência máxima será tomada como a curva procurada, e nos fornecerá o valor de α .

Na figura 4 colocamos o gráfico da potência total do carro para vários valores de α . Note que o valor de α tem uma influência decisiva sobre a forma da potência total. O primeiro valor que destacamos, $\alpha = 0.3$, não nos serve, pois faz com que a potência total seja sempre crescente. Este tipo de curva deve ser descartada por violar o princípio da potência máxima. A medida que diminuimos o valor de α o valor médio da potência total máxima diminui. Para pequenos valores de α a potência total atinge um valor máximo e depois diminui. Este também é um resultado inaceitável por violar nosso princípio: a potência total deve manter-se praticamente constante ao longo do percurso analisado. Existe um intervalo de valores de α , entre 0.12 e 0.13, que têm justamente as características que procuramos. A potência assume rapidamente um valor máximo e oscila em torno dele até o término do período de aceleração. São as curvas que procuramos.

Algumas características dessa curva devem ser ressaltadas. A região de potência máxima é atingida num tempo muito curto, aproximadamente 2 segundos. Depois disso o carro permanece nessa região por todo o restante do tempo: cerca de 10 segundos. Mas a potência máxima não permanece estritamente constante. Ela os-

cila! Mas por que? São as trocas de marcha. Vamos entender isso.

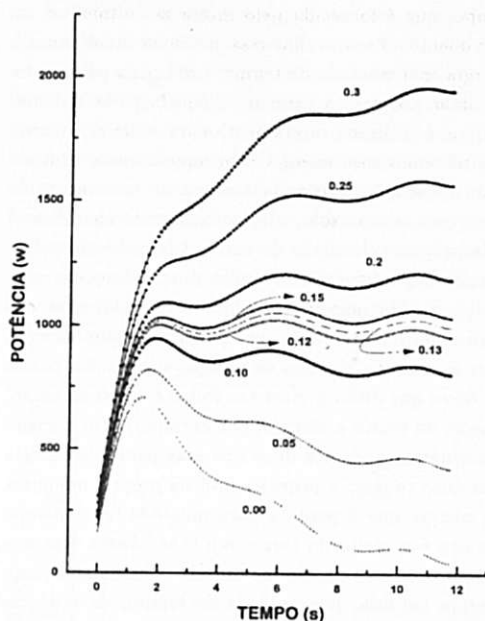


Figura 4. Potência total do carro em função do coeficiente de atrito. As curvas de maiores ordenadas correspondem os maiores coeficientes de atrito. Os valores do coeficiente de atrito estão no intervalo 0.3 à 0.0. O fato que se destaca nesta figura é que na região do coeficiente de atrito entre 0.12 e 0.13 a potência total gerada atinge rapidamente um valor máximo e oscila o resto do tempo em torno dele.

Cada vez que o piloto passa para uma marcha maior a rotação do motor cai, as rodas são ligadas à uma engrenagem do câmbio de raio maior, e o piloto acelerando aumenta novamente a rotação do motor que imprime maior velocidade ao veículo. Portanto, em cada marcha, ao acelerar, o motor passa por um ciclo de rotação completa. Mas a potência transmitida pelo motor depende de sua rotação. O motor é projetado para transmitir potência máxima em algum valor de rotação. Quando o motor se afasta desse valor a potência transmitida diminui. Como pelo próprio processo com o qual se acelera o auto, não é possível manter a rotação do motor, a potência - mesmo no regime de máxima potência - oscila em torno de um valor médio.

Existe ainda um outro fator que deve influir para a oscilação da potência total máxima do carro. A energia se perde por atrito em muitos lugares. Pelo menos dentro do motor a potência perdida por atrito não pode, mesmo que aproximadamente, ser proporcional

ao quadrado da velocidade do automóvel como faz supor a equação 2. É óbvio que no motor a força de atrito deve ser dada por uma função da frequência de rotação. Mas como a frequência de rotação do motor oscila aproximadamente no mesmo intervalo para cada marcha utilizada, teremos que a energia perdida por atrito também oscilará no mesmo intervalo. Assim, esta perda oscilante de energia irá contribuir para a oscilação da potência total fornecida ao carro.

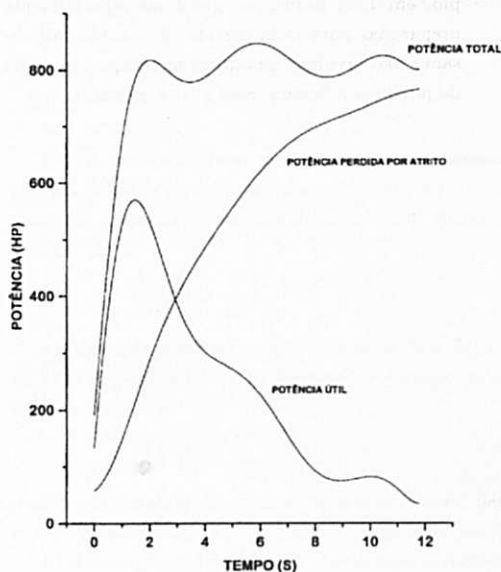


Figura 5. Potências envolvidas no movimento do carro. Nesta figura estão sobrepostas a potência útil, a potência dissipada e a potência total do carro para $\alpha = 0.125$. Para comparação com as unidades usualmente utilizadas no automobilismo colocamos nossa escala em cv (cavalos vapor).

Apresentamos na figura 5 um gráfico da potência total, potência útil e potência dissipada para o valor de $\alpha = 0.125$, que acreditamos produzir uma curva compatível com princípio da potência máxima. Pela comparação da curva encontrada para esse valor e o nosso critério é fácil de nos convenceremos de que embora esse não venha a ser o valor exato dessa constante, ela deve ter um valor muito próximo desse. Para que se possa comparar facilmente os resultados que obtivemos com o sistema de unidades empregado no automobilismo de competição colocamos esses resultados em Cavalos Vapor (cv). Algumas características dessas figuras são então destacáveis. Em primeiro lugar a potência máxima oscila em torno dos 800 cv. O valor máximo da potência conseguida^[5] pelo carro foi algo

em torno de 850 cv. Para conseguir esses resultados utilizamos como massa do carro 610 kg.

Conclusão

Neste trabalho mostramos como podem ser obtidas informações dinâmicas a partir de uma tabela de velocidades exibida em uma transmissão televisiva de F.1. Através da interpolação numérica desses dados fomos capazes de avaliar a aceleração do carro. Na figura 2 vemos que o auto atinge a aceleração de 1.7 g, quase duas vezes a aceleração da gravidade!

Partindo do fato que a potência útil, por unidade de massa, é dada pelo produto da aceleração pela velocidade, calculamos a potência total do auto. Para isso assumimos que a potência fornecida pelo motor tem duas finalidades. A primeira, a potência útil, é utilizada para acelerar o carro. A segunda é a potência dissipada com atrito. Com a hipótese de que a potência total máxima deva ser atingida rapidamente e manter-se praticamente constante, pudemos avaliar a potência dissipada com atrito e portanto, a potência total fornecida pelo motor.

Notas

1. - O método dos mínimos quadrados pode ser encontrado em praticamente qualquer livro introdutório de Análise Numérica. Veja por exemplo, T. Pacitti e C. P. Atkinson, *Programação e Métodos Computacionais*. Nos últimos anos, com a proliferação de "Softwares" dedicados à esse assunto, esse método já se encontra "pronto para o uso" em programas como o "Matemática" ou o "Origen".
2. - Note que este valor de aceleração é muitíssimo maior que os valores usuais da aceleração dos carros comuns. Uma aceleração de 1.7g significa que o carro sofre uma variação de velocidade de 60km/h em 1 segundo. E isto quando ele está a 140 km/h! Um carro comum nessa velocidade praticamente não acelera. O senso comum acredita que um carro de corrida é concebido para atingir grandes velocidades. Seria mais correto dizer que ele é idealizado para grandes acelerações. Uma coisa não implica necessariamente na outra. Nos circuitos de rua, Mônaco por exemplo, as velocidades dos carros não são "surpreendentes". Sua aceleração, nesses circuitos, é que é relevante.

3. - Saliente-se de imediato que não existe justificativa a priori para esta lei, ela só poderá ser justificada pelo resultado final obtido. Em tese a força de atrito poderia ser proporcional a qualquer potência da velocidade. Para baixas velocidades a lei acima mostra-se satisfatória. Para altas velocidades desvios desta lei são observados. Em movimentos turbulentos potências quadradas da velocidade devem ser consideradas.
4. - Este assunto pode ser encontrado em praticamente todos os livros de Física básica. Boas referências são o livro do Prof. H. M. Nussenzveig "Física Básica - Vol. 1", ou o Texto de Alonso & Finn "Física - Um Curso Universitário, vol 1".
5. - As revistas especializadas em automobilismo não fornecem o valor da potência dos motores de F.1 com exatidão. É sabido que em 1991 a potência desses carros era maior que 750 cv. Essa informação é sempre dada de maneira genérica. A razão para isso é clara. A obtenção de mais potência envolve ajustes que em geral as equipes e fábricas desejam manter em segredo. Por exemplo, em 1991 usavam-se gasolinas especialmente preparadas para cada corrida. Era então interessante não divulgar quanto cada equipe conseguia de potência adicional com a 'sua' gasolina.