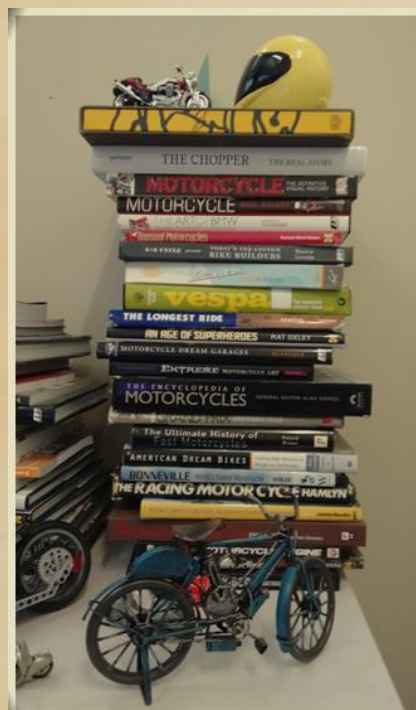


Visões Sobre Duas Rodas



Fábio Magnani

Visões Sobre Duas Rodas

Vol.1: Uma Visão Técnica



Volume I, Capítulo 1:

Termodinâmica

versão 0.1

Fábio Magnani

Este capítulo faz parte da coleção Visões Sobre Duas Rodas, de Fábio Magnani. Volume I: Uma Visão Técnica (2016); Volume II: Uma Visão Pessoal (2017); Volume III: Uma Visão Acadêmica (2018). Sumário do Volume I: Introdução; Cap.1: Termodinâmica; Cap.2: Estudos Paramétricos e Otimização; Cap.3: Propulsão e Dinâmica; Cap.4: Tráfego; Cap.5: Considerações Técnicas Gerais; Conclusão.



Fábio Magnani é editor-chefe do *website* Equilíbrio em Duas Rodas e professor no Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE. Mais informações no *website*: www.fabiomagnani.com

Visões Sobre Duas Rodas

Este capítulo faz parte de uma série de textos que serão construídos e divulgados eletronicamente ao longo dos próximos três anos. O nome provisório dessa coleção é VISÕES SOBRE DUAS RODAS, e tem três volumes programados: “Vol.1: Uma Visão Técnica”, “Vol.2: Uma Visão Pessoal”, e “Vol.3 Uma Visão Acadêmica”. Embora os títulos sejam bastante pretenciosos, a ideia não é escrever nenhuma referência na área, nem mesmo algo abrangente. Estes textos nada mais são que a organização do que estou fazendo no momento – parte sozinho, e parte com colegas e estudantes. Então, por exemplo, não teremos nada por aqui sobre medição de poluentes em motores, modelos avançados de tráfego, recortes socioeconômicos de motoboys, ou projeto estrutural de quadros. Muito embora nada impeça que esses tópicos apareçam no futuro, caso comecemos a nos concentrar nesses fenômenos, ou, então, caso alguém queira colaborar com algum capítulo específico.

Neste primeiro volume, UMA VISÃO TÉCNICA, estou reunindo algumas aplicações e exemplos das disciplinas que ministro na UFPE. Por exemplo, este Capítulo 1, TERMODINÂMICA, está sendo escrito para ajudar em duas aulas na disciplina “Termodinâmica Aplicada” (grad). Da mesma forma, o Capítulo 2, ESTUDOS PARAMÉTRICOS E OTIMIZAÇÃO, será usado em três ou quatro aulas de “Projeto de Sistemas Térmicos” (grad) e também em “Otimização de Sistemas Térmicos” (pós); o Capítulo 3, PROPULSÃO E DINÂMICA, em “Engenharia da Motocicleta” (grad); o Capítulo 4, TRÁFEGO, em “Propulsão de Bicicletas e Motocicletas” (pós); e o Capítulo 5, CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS GERAIS, em “Estudos Sobre Bicicletas e Motocicletas” (pós).

As outras duas partes da coleção não são voltadas para a graduação. UMA VISÃO PESSOAL será uma coletânea revisada, aumentada e editada do que já venho escrevendo no blog “Equilíbrio em Duas Rodas” (www.fabiomagnani.com) desde 2007, no qual o mundo das motos e das bicicletas é visto de um ponto de vista bastante particular. A terceira parte, UMA VISÃO ACADÊMICA, reunirá os estudos que tenho realizado ultimamente - tanto os estudos técnicos, com a participação de colegas, estudantes de graduação e de pós-graduação, quanto estudos mais gerais, que vão além da engenharia mecânica, incluindo acidentes, indústria, cultura, mercado, história, trabalho, tecnologia, arte, política, organização social e por aí vai. Pretendo terminar o primeiro volume no final de 2016, o segundo em 2017 e o terceiro em 2018. Os capítulos não serão necessariamente publicados na ordem da coleção, mas sim conforme forem ficando prontos.

A ideia de fazer um lançamento eletrônico e em partes é conseguir a colaboração dos estudantes, leitores e amigos. Isso porque, na produção de um livro, o autor é apenas uma das peças. Uma peça necessária, claro, mas não suficiente. É preciso um editor para organizar a estrutura e forçar mudanças na forma do livro, para que o que está na cabeça do autor possa ser transmitido para as outras pessoas. Também é necessário um revisor para conferir as fontes, as contas e a gramática; um ilustrador, para as famosas imagens que falam mais que mil palavras; um promotor, para que o livro chegue a quem possa interessar; um diagramador para tudo ficar confortável; um digitador para fazer as tabelas e equações; um produtor para garantir a subsistência de toda essa tropa; e, o mais importante, colaboradores e especialistas para inspirar, enriquecer, estender ou aprofundar tópicos que o autor não domina direito.

O fato é que não tenho a sorte de fazer parte de uma equipe dessas, na qual poderia ser apenas o autor. Ou, o que seria mais divertido, ser o editor do trabalho de vários

autores. Mas é daí que vem a razão de fazer este lançamento eletrônico e em partes. Espero que, com o tempo, os estudantes das disciplinas façam críticas ao material; que os leitores da *internet* façam sugestões de como posso melhorar certas passagens; que eu mesmo vá encontrando erros; que os estudantes das eletivas, TCC, mestrado e doutorado, bem como colegas, professores, pensadores, escritores, motoqueiros e ciclistas, se sintam animados a colaborar em certos capítulos ou, melhor ainda, escrever capítulos inteiros; e que todos possamos ir acrescentando novos conhecimentos conforme o tempo for passando.

Estamos apenas no início de uma revolução na forma de escrever livros. Não é apenas uma questão de ler no papel ou ler em uma tela. As obras serão diferentes. Não serão mais escritas por uma única pessoa, e não serão mais fixas no tempo. Os livros serão uma colaboração de muitas pessoas, e serão reescritos e republicados dia a dia. Acho que este é um exemplo. Espero que seja apenas um pontapé inicial feito por um indivíduo que logo se transforme em um belo jogo coletivo. Vejamos.

1.1 – Introdução

O objetivo deste capítulo é mostrar como a Termodinâmica, uma disciplina muitas vezes como teórica demais, pode nos ajudar a entender problemas aplicados. Neste caso, queremos saber para onde vai toda a energia durante o deslocamento urbano. Por que precisamos de tanta gasolina ou álcool? Quem é o maior responsável pelo consumo de gasolina, será o peso ou será a resistência aerodinâmica? Qual é a diferença entre usar um motor de combustão interna, um motor elétrico ou a propulsão humana?

Que fique claro que este livro não pretende substituir nenhum texto clássico de engenharia. Quero apenas apresentar alguns exemplos e aplicações; nada mais que uma lista de exercícios resolvidos para acompanhar um par de aulas da disciplina “Termodinâmica Aplicada”.

Para começar, gostaria de falar sobre algumas escolhas importantes na análise de problemas reais: fenômenos, escalas, métricas, modelos, dados e unidades. A verdade é que, embora nem sempre notemos, antes de fazer qualquer estudo, precisamos fazer algumas escolhas que depois limitam as nossas conclusões. Isso não vale apenas para engenharia, mas para qualquer análise feita por qualquer pessoa. Vou usar o nosso exemplo para discutir esses temas.

FENÔMENO. Ao fazer a análise de algum evento, escolhemos apenas alguns fenômenos para serem estudados. Por exemplo, ao estudarmos as motos e as bicicletas neste capítulo, não estaremos preocupados se o quadro da moto vai romper com a aceleração, ou se o ciclista, de tanto esforço, irá ter um colapso físico. Por isso, devemos ter cuidado para não chegarmos a conclusões que o nosso estudo não permite. Exemplo: como termodinamicistas estamos preocupados apenas com a eficiência na qual a energia do combustível é usada para mover o passageiro do veículo. Podemos até chegar à conclusão de que a massa do veículo é a grande vilã do consumo de gasolina nas cidades, por exemplo, mas não poderemos concluir, a partir de estudos apenas termodinâmicos, que efeitos a redução de massa teria sobre a segurança dos veículos ou sobre os custos de produção.

ESCALA. Ao estudar um fenômeno específico, é preciso escolher uma escala. Por exemplo, o estudo das transformações energéticas pode ser feito apenas no cilindro de um motor, ou então considerando as resistências do veículo como um todo, ou ainda levando em conta a influência que o tráfego tem sobre o consumo de cada veículo em particular, ou, mais além ainda, somando inclusive o gasto energético para produzir e

distribuir o combustível usado nos veículos. Outro exemplo interessante sobre a escala de estudo é a comparação entre a emissão de CO₂ de uma bicicleta convencional e de uma bicicleta elétrica. Olhando apenas para o veículo em movimento, a bicicleta convencional emite mais, pois o ciclista produz CO₂ adicional ao converter a energia do alimento em energia cinética; já a bicicleta elétrica não emite CO₂ na transformação da energia química da bateria. Agora, se olharmos em uma escala maior, teremos que pensar de onde vem a energia que carregou a bateria. Será que não foi de uma termoelétrica que emite CO₂? E lembre-se que mesmo uma hidrelétrica emite CO₂. E o alimento, como será que chegou na geladeira do ciclista? Não é preciso desmatar uma região, usar tratores e caminhões, e manter o alimento refrigerado? Isso não emite CO₂? Vamos agora pensar no consumo de gasolina de uma moto. Se olharmos apenas para a conversão no motor, veremos que 22% da energia da gasolina é convertida em energia mecânica no eixo, o restante sendo transformado em calor dissipado no bloco, radiador e escape. Mas, se agora olharmos para o veículo como um todo, calcularemos que apenas 2% da energia do combustível é usada para algo útil (movimentar pessoas e carga), pois boa parte daqueles 22% que viraram energia de eixo serão usados para coisas inúteis ao movimento das pessoas: vencer a resistência aerodinâmica, vencer a resistência de rolagem, elevar e acelerar o próprio veículo. Quer dizer, olhando só para o motor pode dar a impressão que a eficiência é de 22%, enquanto, ao olharmos para o veículo como um todo, calcularemos que a eficiência é de 2%. Tudo é uma questão de escala de análise.

MÉTRICA. Outro ponto importante nas análises é saber o que queremos melhorar. Ao analisar um veículo, podemos estar interessados no rendimento do motor, no consumo de combustível, no seu preço, na emissão de gases, no tempo de deslocamento, no número de pessoas que se acidentam, na infraestrutura necessária, no conforto, no *status*. Mesmo que estejamos interessados apenas no dinheiro, a métrica pode ser diferente: valor de aquisição do veículo, gasto operacional (combustível) e gasto indireto (taxas, estacionamento, multas, seguro de saúde, seguro do veículo). Além disso, a preocupação pode ser do indivíduo (os gastos que ele terá ao usar aquele veículo) ou da sociedade como um todo (redução na circulação econômica na cidade por causa dos congestionamentos, gastos com o tratamento de acidentados, construção de ruas e viadutos). Dependendo da métrica escolhida teremos uma solução ou outra. Por exemplo, se a métrica para avaliar um automóvel for a potência seu do motor, claro que os carros eficientes serão mal avaliados. Simples assim. A escolha da métrica não é uma questão técnica, é uma questão econômica, social, cultural e política, e que deve ser levada muito a sério.

MODELO. Ao estudarmos um determinado fenômeno, em geral usamos modelos, que podem ser modelos teóricos, como os que estamos usando aqui; experimentais, como os protótipos em bancadas e os veículos reais testados em condições específicas; ou modelos estatísticos, onde escolhemos uma amostra para representar o todo. Modelos não são a realidade, o que é ruim, mas são necessários. Primeiro porque permitem, com poucos recursos, prever o que acontecerá no mundo real. Por exemplo, o teste de um veículo em um dinamômetro apresenta resultados valiosos para prever como será o comportamento de uma frota no tráfego real. A segunda característica dos modelos é que simplificam a realidade, mostram o que é essencial. Por exemplo, podemos concluir, a partir do uso de modelos (matemáticos ou, neste exemplo, modelos mentais), que a cor de um motor não é relevante para o seu consumo. Mas nem sempre as coisas são tão óbvias para poderem ser resolvidas apenas com a experiência do dia a dia. Será que o diâmetro de admissão de ar em um motor é importante para o seu consumo? Será que vou ter que construir uma dezena de sistemas de admissão para testar isso? Não, pois posso usar um modelo matemático para pelo menos guiar a construção dos protótipos de teste. No

entanto, mesmo com essa vantagem da simplicidade e da capacidade de demonstrar o que é essencial em um fenômeno, é preciso tomar cuidado com os modelos, pois eles não representam fenômenos que não são previamente incluídos. Por exemplo, se no dinamômetro não há vento, eu não poderei concluir nada sobre a influência do arrasto aerodinâmico no consumo daquele veículo. Se no meu modelo matemático não houver o efeito da gravidade, não poderei estudar o maior consumo nas subidas. Se o meu teste de consumo foi feito em velocidade constante em uma pista, não poderei concluir nada sobre o consumo real daquele carro em uma situação de tráfego intenso. Bem, e para terminar essa questão dos modelos, devemos sempre lembrar que na engenharia precisamos de uma combinação de modelos, testes e experiência. Nenhum substitui o outro.

DADOS. Além da própria qualidade do modelo, a qualidade dos resultados depende também da qualidade dos dados que alimentam esse modelo. Não adianta nada ter um sofisticado motor de bancada se você não sabe a composição do combustível que o está alimentando. Da mesma forma, não adianta muita coisa ter um supermodelo teórico de transferência de calor no cilindro do motor se você não sabe o valor da condutividade térmica. No mundo real, a maior parte dos problemas de engenharia envolve conseguir esses tais “dados”. Qual é a emissão de CO₂ de uma hidrelétrica? Qual é o mapa de rendimento de um motor em função da carga e da rotação? Qual é o aumento no custo de produção de um veículo se substituirmos o MCI (motor de combustão interna) por um ME (motor elétrico)? Agora, apesar de todo esse sermão, neste capítulo continuaremos cometendo o mesmo pecado. Os “dados” continuarão sendo dados, e em todas as vezes serão apenas dados aproximados. Isso porque o enfoque do capítulo está nos modelos, não na obtenção dos dados. Peço, então, que não levem os resultados a sério do ponto de vista quantitativo.

UNIDADES. Embora todos devessem usar um mesmo sistema de unidades, o SI, a realidade é outra. Energia, por exemplo. É comum que a energia de um combustível seja expressa em kJ, da eletricidade em kWh e do alimento em kcal. Pior, pois a energia normalmente é vendida em bases diferentes, por unidade de volume, por unidade de energia, por unidade de massa. Neste capítulo eu preferi fazer a seguinte escolha: (1) todas as equações estão escritas no SI e (2) as tabelas de dados e resultados estão escritas nas unidades mais comuns para cada grandeza (*e.g.*, velocidade em km/h, potência mecânica em CV). Por isso, ao usar as equações, é preciso converter os dados para o SI, fazer as contas, e depois reconverter para as unidades de interesse.

O capítulo tem quatorze seções, *grosso modo* separadas em três grandes partes. A primeira (1.1-3) faz uma introdução ao assunto, uma rápida revisão da teoria e algumas recomendações bibliográficas para quem quiser se aprofundar ou se estender no assunto. Depois, as seções 1.4-9 desenvolvem um modelo para o cálculo do consumo de combustível em um motor de combustão interna. O modelo vai ficando cada vez mais detalhado. Começa com um motor bem simples, com potência e rendimento constante (1.4). Nessa seção, aproveitaremos para apresentar as equações gerais de balanço e algumas comparações iniciais entre as várias fontes energéticas (gasolina, álcool, eletricidade e alimento). Depois, consideramos um Ciclo Otto ideal (1.5), que já tem a vantagem de ter a sua potência variando com a rotação. Com o andar do capítulo, esse motor Otto será acrescido de algumas características reais, como eficiência isoentrópica de compressão e expansão (1.6), mistura ar-combustível (1.7), perda de calor e atrito (1.8). Na seção 1.9 fazemos a avaliação desse modelo com outros modelos mais realistas, que serão desenvolvidos no Capítulo 3.

A terceira parte deste capítulo envolve o estudo do comportamento dos motores de combustão interna quando instalados em veículos específicos. Primeiro considerando

movimento com velocidade constante (1.10), depois incluindo um termo aproximado de aceleração (1.11). Na Seção 1.12 fazemos a comparação desse modelo aqui desenvolvido com outro modelo mais realista, que será detalhado no Capítulo 3. A seção 1.13 traz um estudo de casos comparando o comportamento de vários veículos e combustíveis. Uma rápida conclusão (1.14) fecha o capítulo.

Praticamente todos os cálculos deste capítulo foram realizados com duas planilhas eletrônicas, também distribuídas eletronicamente: V1C1P1.xlsx com os modelos do motor e V1C1P2.xlsx com a modelagem da dinâmica. No desenrolar do texto, sempre que possível, vou dizer a planilha usada para cada cálculo, usando um código do tipo VxCyPzAbkk [Vx: volume x; Cy: capítulo y, Pz: parte z, Abkk: aba kk]. O leitor é convidado a usar essas planilhas para reconstruir os estudos apresentados e também para analisar outras configurações de motores e de veículos. Isso só não será possível nas seções de comparação com os modelos mais detalhados (1.9 e 1.12), que necessitam tanto da teoria quanto de planilhas que serão distribuídas em conjunto apenas no Capítulo 3.

1.2 – Fundamentação Teórica

Para acompanhar os exemplos, é interessante fazer uma revisão de como funcionam os motores de combustão interna e também do equilíbrio de forças sobre um corpo em movimento. Vou comentar alguns detalhes aqui só como lembrança, mas lembro que este livro não substitui textos específicos de engenharia.

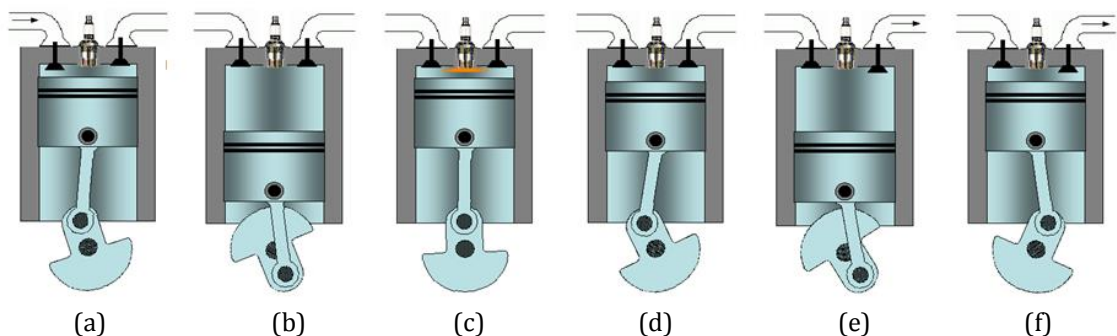


Figura 1.1 – Funcionamento de um MCI. (Imagens retiradas do ICE - Internal Combustion Engine -, uma versão distribuível do software EES - Engineering Equation Solver)

Na Figura 1.1, vemos a operação de um motor de combustão interna de ignição por centelha de quatro tempos, com seus vários processos: (a-b) aspiração da mistura ar-combustível, (b-c) compressão da mistura, (c-d) queima do combustível, (d-e) expansão dos gases, e (e-f) descarga dos gases. As setas nos dutos de admissão e de descarga indicam quando há entrada e saída de gases.

Neste capítulo iremos idealizar a operação desse motor segundo um Ciclo Otto, cujo diagrama aparece na Figura 1.2. Algumas características idealizadas podem ser visualizadas no diagrama, como a aspiração e descarga a pressão constante e a combustão instantânea. Quando formos ver a modelagem matemática desse ciclo simplificado daí eu falo um pouco mais sobre as hipóteses simplificativas.

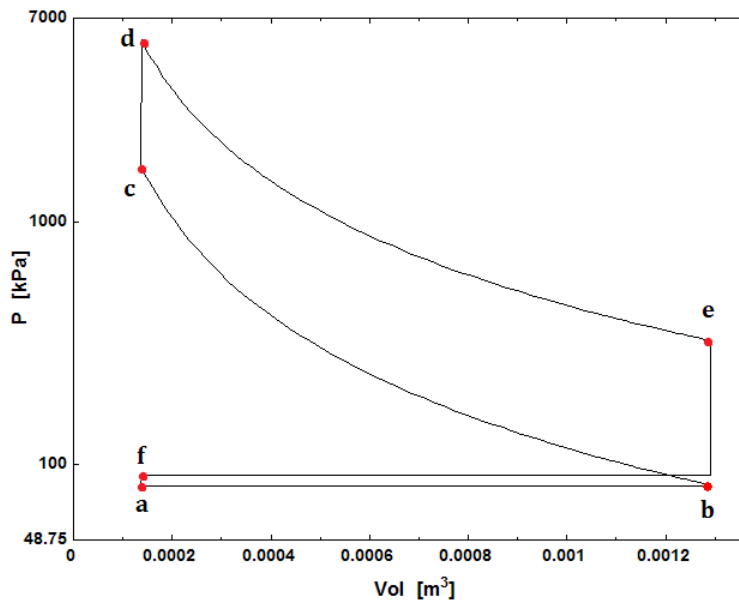


Figura 1.2 - Digrama P-V de um Ciclo Otto. (Imagem retirada do ICE - Internal Combustion Engine -, uma versão distribuível do *software* EES - Engineering Equation Solver)

Se estivermos interessados em saber a energia necessária para que um veículo se movimente em linha reta, temos que fazer um balanço de forças. Por um lado há a força de tração, que é a força de reação do chão contra o pneu (que estava “tentando jogar o planeta Terra para trás”). Em casos especiais, como durante a frenagem, a força do chão contra o pneu é contrária ao movimento do veículo – mas isso não nos interessa neste capítulo.

Essa força de tração (F_{trac}), que tenta acelerar a moto para frente, é balanceada por quatro outras forças: força de arrasto aerodinâmico (F_{aer}), força de resistência à rolagem (F_{rol}), força da gravidade (F_{grav}) e a força de inércia (F_{ine}). Um ponto importante para destacar é que estamos interessados apenas nas componentes dessas forças que ficam na direção do movimento. Por exemplo, no caso de uma pista horizontal, a força de gravidade não tem efeito direto sobre o movimento (tem indireto, já que influencia na resistência de rolagem, como veremos).

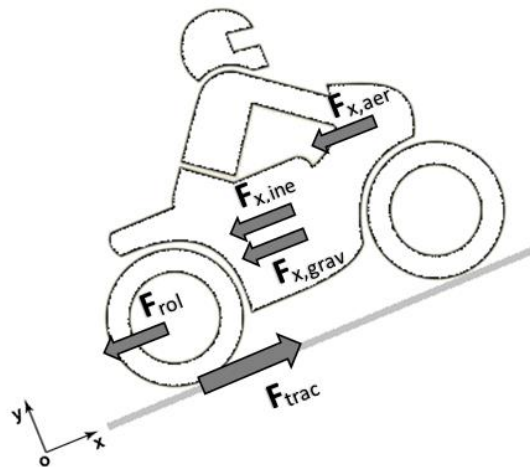


Figura 1.3 - Forças agindo sobre uma motocicleta na direção do movimento.

$$P_{trac} = V(F_{trac}) = VF_{res} = V(F_{ine} + F_{aer} + F_{rol} + F_{grav})_x \quad (1.1)$$

A Equação 1.1 mostra o balanço de forças (ou de taxas energéticas, *i.e.*, potências, quando multiplicamos pela velocidade, V). Nem todas as forças retardam o movimento. Exemplos de forças que auxiliam o movimento são a inércia durante a desaceleração, a força da gravidade nas descidas e o vento quando sopra por trás.

Este é um modelo bastante simples, que despreza vários termos, como a energia acumulada nas partes rotativas da moto (rodas e virabrequim) e a energia dissipada pela suspensão (que poderia estar incluída na força de resistência à rolagem, mas que não poderia ser considerada constante, pois depende da pilotagem). Ainda, não estamos considerando os limites, como a perda de atrito e a transferência de peso durante as acelerações e frenagens. Alguns desses fenômenos serão vistos no Capítulo 3.

Do ponto de vista do consumo energético, motos, bicicletas e automóveis podem usar um mesmo modelo dinâmico (Equação 1.1). Isso porque estamos considerando apenas o movimento para frente (não faz diferença se o veículo tem duas ou quatro rodas). Outro detalhe é que, na análise das forças sobre o veículo, o que importa na F_{trac} é que haja tração na roda, independente se a energia veio de um MCI (motor de combustão interna), ME (motor elétrico) ou PH (propulsão humana). Agora, embora o modelo do veículo em linha reta possa ser o mesmo para os vários veículos, claro que o modelo do motor tem que ser diferente.

Considerando agora cada uma das forças agindo sobre o veículo, a força de inércia depende da massa combinada (soma da massa do veículo com a massa do piloto, passageiros e carga), como mostrado na Equação 1.2. Interessante perceber que, quanto maior a massa combinada, maior será a força de inércia e, então, segundo a Equação 1.1, maior deve ser a força de tração. Como veremos daqui a pouco, isso significa que, quanto maior a massa, maior terá que ser a potência do motor e, conseqüentemente, maior o consumo de combustível. Essa é uma das principais razões para o grande consumo de combustível em automóveis urbanos. A cada nova arrancada no sinal, uma boa parte da energia do combustível precisa ser usada para acelerar a cerca de uma tonelada do veículo. Toda essa energia é perdida depois durante a frenagem, processo no qual a energia cinética do carro é convertida em calor nos freios. Uma das vantagens dos veículos elétricos é que parte da energia cinética pode ser acumulada na forma de energia elétrica com o uso de geradores elétricos. Mesmo em carros convencionais isso seria possível, usando massas rotativas. Possível, mas não usado!

Aqui já chegamos ao primeiro resultado importante que a Termodinâmica pode nos dar. Parte da energia do combustível é usada para acelerar a massa do veículo, só para ser jogada fora algumas centenas de metros mais à frente, na parada. Agora, será que a massa dos veículos, principalmente dos carros, poderia ser menor? Isso depende do uso de materiais mais leves (compósitos de carbono, por exemplo), de velocidades mais baixas (o que permitiria estruturas mais leves) e que os outros carros também fossem mais leves (o que diminuiria a energia durante as colisões e atropelamentos). Hoje em dia, o consumidor não tem como escolher carros mais leves, pois os mais lentos são projetados para rodar a mais de 160 km/h (mesmo que o limite de velocidade no Brasil seja de 110 km/h!). Eu, por exemplo, uso carro só para andar na cidade, pois quando viajo vou de moto ou de avião. Mesmo assim, quando fui comprar, me deram como melhor opção um carro de uma tonelada que pode rodar a 165 km/h, mesmo que eu nunca passe dos 60 km/h. Tenho que rodar na cidade com um monstrengo que faz 8 km/litro. Uma insanidade do ponto de vista da engenharia!

$$F_{ine} = m \frac{dV}{dt} \quad (1.2)$$

Outra resistência importante ao movimento dos veículos é o arrasto aerodinâmico, a força que precisamos fazer para deslocar o ar enquanto nos movimentamos. A força da resistência aerodinâmica, como vemos na Equação 1.3, depende do quadrado da velocidade relativa do ar (soma da velocidade do veículo, V , com a velocidade contrária do vento, W). Mesmo em velocidades relativamente baixas, 60 km/h, por exemplo, a força do arrasto aerodinâmico pode ser mais da metade das forças resistivas. E quem anda de bicicleta sabe muito bem como a gente gasta energia para pedalar contra o vento, mesmo com uma velocidade baixa quando comparada com um carro ou com uma moto.

$$F_{aer} = k_a(V + W)^2 \quad (1.3)$$

O fator de arrasto, k_a na Equação 1.3, é calculado a partir da Equação 1.4, levando em conta a massa específica do ar, ρ , a forma geométrica do veículo, C_d , e a área frontal, A . Melhorar a aerodinâmica de um veículo não é algo tão simples, já que muitas vezes implica em aumentar o peso e o tamanho do veículo, e deixá-lo inseguro a rajadas de vento laterais. Uma oportunidade para os novos engenheiros.

$$k_a = \frac{1}{2} \rho C_d A \quad (1.4)$$

A força de resistência à rolagem, F_{rol} , engloba as resistências internas ao veículo, como rolamentos e suspensão. Para um veículo bem projetado e em terreno plano, a maior parte dessa força é usada para deformar o pneu. Por isso, em pisos planos, o uso de pneus mais duros diminui a força de rolagem e, conseqüentemente, o consumo. O problema é que pneus duros não absorvem as irregularidades da pista e não têm bom atrito. Outra oportunidade para engenheiros.

Talvez não seja muito fácil imaginar como a deformação do pneu aumenta a resistência ao movimento. Se for o caso, lembre-se de como dá trabalho caminhar ou pedalar na praia, onde uma parte considerável da sua energia é usada para deformar a areia. Como vemos na Equação 1.5, a força de rolagem depende do C_R (que é um coeficiente que leva em conta o pneu e o tipo de piso) e da massa do veículo.

$$F_{rol} = C_R mg \quad (1.5)$$

A última força que consideramos é aquela para vencer a gravidade. Quanto maior a inclinação, I , maior é a força que precisamos vencer para nos deslocarmos. Na nossa formulação, I é a razão entre a altura e o deslocamento real (seno). Alguns autores consideram a inclinação como a razão entre a altura e a projeção horizontal do deslocamento (tangente), e, portanto, nesse caso, a Equação 1.6 teria que ser modificada.

Mais uma vez, vemos a importância da massa, *i.e.*, de como um carro pesado tem um maior consumo de combustível.

$$F_{ine} = Img \quad (1.6)$$

Na Equação 1.7 substituímos todos os termos anteriores (Eqs. 1.2-6) na Equação 1.1. Para visualizar o efeito de cada um dos termos na potência necessária para o movimento, imagine que você está na sua bicicleta tentando acelerar, contra o vento, na areia de uma duna fortemente inclinada.

$$P_{trac} = V \left(m \frac{dV}{dt} + k_a(V + W)^2 + C_R mg + Img \right) \quad (1.7)$$

Desprezando o vento e assumindo que a inclinação é constante ao longo do trajeto, a Equação 1.7 pode ser escrita como na Equação 1.8, na qual o termo d (Equação 1.9) inclui a resistência à rolagem e a resistência gravitacional.

$$P_{trac} = V(ma + k_a V^2 + md) \quad (1.8)$$

$$d = m(C_R g + Ig) \quad (1.9)$$

No Capítulo 3 iremos integrar numericamente a Equação 1.7, o que permitirá que o vento e a inclinação variem ao longo do trajeto, além de limitarmos a potência do motor em função da rotação e da marcha escolhida. No presente capítulo, para não precisarmos fazer essa integração, iremos considerar vários termos constantes.

		Moto	Bicicleta	Carro
V	km/h	60	18	60
m	kg	75+150	75+20	75+1000
k_a	kg/m	0,4	0,45	0,5
C_R		0,03	0,02	0,03
W	km/h	0	0	0
l	m/m	0,02	0,02	0,02
a	m/s ²	0	0	0
P_{trac}	W	3733	243	11108
P_{trac}	CV	5,1	0,3	15,1

Figura 1.4 - Potência necessária ao deslocamento em cruzeiro de vários veículos.

A Figura 4 apresenta a potência necessária para vários veículos rodarem em cruzeiro (velocidade constante). Usei a planilha V1C1P2Ab01 para fazer as contas, mas deixemos as explicações de como usá-la para a Seção 1.10. O importante aqui é a análise dos resultados. Vemos que o carro precisa de 15,1 CV de potência, a moto 5,1 CV e a bicicleta apenas 0,3 CV. A grande vantagem da bicicleta, do ponto de vista energético, é que ela é bastante leve (o que diminui a força da gravidade, de rolagem e de inércia) e que roda a uma baixa velocidade (diminuindo a força de arrasto). A diferença entre a moto e o carro é principalmente devida à diferença nas massas.

No caso da moto, a força de tração é de 224N ($3733W \div 16,7m/s$), sendo dividida assim: 50% para vencer a força de arrasto aerodinâmico, 30% para vencer a resistência à rolagem e 20% para vencer a gravidade. Lembremos que, neste caso, não estamos considerando a energia gasta para a aceleração e que esse é o gasto energético a partir da roda, sendo que cerca de 78% da energia do combustível já foi dissipada na conversão que ocorreu no motor. Portanto, levando em conta que o motor converte apenas 22% da energia do combustível em energia mecânica, teríamos a seguinte conta: de cada 100 J de energia do combustível, 78 J se transformam em calor, 11 J (50% de 22J) são usados para

vencer a resistência aerodinâmica, 6,6 J (30% de 22 J) são usados para vencer a resistência à rolagem e 4,4 J (20% de 22 J) para vencer a gravidade. No entanto, como a massa do piloto corresponde a 35% da massa do veículo, apenas 1,5 J são usados para mover o piloto (que é o objetivo da moto!). Portanto, a eficiência de propulsão da moto, neste caso, é 0,015 (1,5%). Uma máquina com eficiência de 1,5% certamente é um fracasso do ponto de vista da engenharia!

Os carros, pesadões, tem uma eficiência de propulsão mais ridícula ainda, de menos de 1%. Costumo dizer que os carros são a grande vergonha da engenharia e o grande triunfo do marketing do século XX.

Mesmo as bicicletas não tem uma eficiência tão alta assim (cerca de 10%), principalmente porque o seu motor (o corpo humano) é tão ineficiente quanto um motor de combustão interna, e também porque a sua forma geométrica tem a pior aerodinâmica de todos os veículos considerados. Do ponto de vista energético, a melhor opção são os veículos leves de propulsão elétrica, que podem ter eficiência de propulsão de até 70%. Deve ser observado, no entanto, que a energia elétrica desses veículos precisa vir de algum lugar. Então, se for usada energia gerada por uma termoelétrica, a eficiência global não será tão alta assim.

1.3 - Referências Bibliográficas

Nesta seção eu recomendo alguns livros para quem quiser revisar, aprofundar ou estender o estudo que estamos desenvolvendo. Sobre ciclos teóricos, aplicação da primeira lei e estequiometria, vale qualquer livro de Termodinâmica Clássica aplicada à engenharia mecânica, como “Termodinâmica” (CENGEL e BOLES), “Princípios da Termodinâmica” (MORAN e SHAPIRO) ou “Fundamentos da Termodinâmica” (VAN WYLEN).

Procurando algo mais sério sobre motores, mas ainda introdutório, recomendo os seguintes livros: “Engine Testing: Theory and Practice” (MARTYR e PLINT), sobre testes de motores nos mais diversos tipos de dinamômetros; “Vehicular Engine Design” (HOAG), com várias discussões importantes sobre as escolhas durante o projeto de um motor de combustão interna; “Design and Simulation of Four Stroke Engines” (BLAIR) sobre a modelagem de motores de quatro tempos; “Four-Stroke Performance Tuning” (BELL), que traz uma discussão prática de como ajustar motores visando a performance em competições; “Internal Combustion Engine Fundamentals” (HEYWOOD), simplesmente o Novo Testamento dos motores de combustão interna; “Internal Combustion Engine in Theory and Practice” (TAYLOR), que é o Velho Testamento (esses dois últimos são antigos, então não têm muita coisa sobre controle da poluição e eletrônica); “Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems” (GUZZELLA e ONDER) e “Vehicle Propulsion Systems” (GUZZELLA e SCIARRETTA), com modelos básicos de MCI, controle, sistemas híbridos e com célula combustível; “Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions” (JACOBSON), que faz uma discussão muito bem integrada da formação de poluentes, seus efeitos e como diminuí-los; “Aerodynamics of Road Vehicles” (HUCHO), sobre a aerodinâmica de veículos terrestres, inclusive com um capítulo sobre motocicletas; “Renewable Energy Without the Hot Air” (MACKAY), explicando como são os gastos energéticos nas cidades e como poderiam ser supridos por fontes renováveis, inclusive com capítulos sobre transporte; e “Princípios da Química” (ATKINS e JONES), para entender a conversão energética durante a queima e a formação de poluentes.

Não há muitos livros sobre engenharia da motocicleta por aí, mas os poucos que existem são muito bons. Quem quiser estudar a física das motos tem que

obrigatoriamente montar essa biblioteca. “Motorcycle Dynamics” (COSSALTER) é a bíblia da teoria da ciclística das motos, mas não tem quase nada sobre motores ou sobre motos no mundo real. “The Racing Motorcycle: A Technical Guide for Constructors” (BRADLEY) é o mais básico de todos, mas com uma visão geral muito interessante, baseada na experiência. Muita coisa deste capítulo que você lê agora veio das ideias do Bradley. “Motorcycle Handling and Chassis Design: the Art and Science” (FOALE) é o complemento perfeito do Cossalter, com muitas discussões práticas, mas também com pouca coisa de motores. “Sportbike Performance Handbook” (CAMERON) é de um autor que é jornalista, escritor e fabricante de motos de competição, uma combinação que cria uma voz única no mundo das motocicletas. “Motorcycle Design and Technology” (COCCO) é um livro com teoria básica, mas com uma visão bem prática. Junto com o Bradley, o Cocco pode ser usado em um curso introdutório à engenharia da motocicleta. “Modelling, Simulation and Control of Two-Wheeled Vehicles” (TANELLI et al.) tem um conteúdo interessante sobre a modelagem da motocicleta e do piloto, além da parte de controle. “Vehicle Dynamics: Theory and Application” (JAZER) e “Motor Vehicle Dynamics” (GENTA) não são sobre motos e bicicletas, e talvez não sejam os melhores do ramo, mas sempre é bom dar uma olhada nos textos feitos para automóveis, pois em geral têm uma boa qualidade técnica, muito embora tenham também péssimo gosto para escolher o objeto de estudo.

Os últimos livros citados são bem matemáticos, e por isso precisam simplificar bastante o objeto de estudo para conseguirem fazer a modelagem. Obras sem essa preocupação analítica podem se dar ao direito de detalhar melhor as motos reais. “The Grand Prix Motorcycles” (CAMERON) conta a história das motos de velocidade (GrandPrix) de 1949 a 2008; “MotoGP Technology” (SPALDING) vem com o desenvolvimento tecnológico do MotoGP de 2002 a 2011; “Modern Motorcycle Technology” (CLARKE) mostra todas as partes das motos modernas, com seções sobre o motor, partes mecânicas, alimentação de combustível, combustão, meio ambiente, transmissão final e suspensão – este é um outro livro bem legal para formar a base de um curso introdutório, junto com o Cocco, Cossalter e o Bradley. “Motocross & Off-Road Performance Handbook”, ao falar de motos para andar em pistas onduladas e de baixo atrito, faz um bom contraponto aos outros livros, que são mais voltados às motos de velocidade.

A base da engenharia da motocicleta é a engenharia mecânica, e há uma porção de livros que podem ser usados para entender os fundamentos do projeto das motocicletas. Segue uma pequena lista de recomendações: “Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos” e “Projeto de Maquinas” (NORTON), “Resistência dos Materiais” (HIBBELER) e “Ciência e Engenharia dos Materiais” (CALLISTER).

As motos e as bicicletas têm a mesma história e a mesma dinâmica. Impossível estudar as motos sem estudar as bicicletas. “Performance Cycling” (BAIRD) é outro que tem muitas ideias que foram usadas neste capítulo, como o papel das marchas, as resistências ao movimento e a interconexão entre o motor (ciclista), o veículo (bicicleta) e as condições do deslocamento (topologia, vento); “Bicycling Science” (WILSON) é simplesmente a bíblia da ciência do ciclismo, falando sobre história, fisiologia humana, dinâmica veicular, transferência de calor, arrasto aerodinâmico, resistência à rolagem, frenagem, ciclística, transmissão, materiais, e outros veículos de propulsão humana.

O presente texto trata da potência necessária para fazer a moto andar para a frente, mas é “interessante” lembrar que para isso os pneus da moto precisam continuar no chão e o piloto precisa ser consciente do que está fazendo. “Race Tech’s Motorcycle Suspension Bible” (THEDE e PARKS) é um livro bem prático sobre a regulagem da suspensão das motos, mas que pode ser usado como introdução junto com algum outro livro geral de vibrações mecânicas e de dinâmica. “The Upper Half of the Motorcycle: On the Unity of

Rider and Machine” (SPIEGEL) é único ao discutir a “parte de cima” da motocicleta, com o comportamento psicológico dos motoqueiros.

Deve dar para perceber pelo que escrevo que sou um fervoroso defensor dos veículos elétricos, muito embora isso parta o meu coração de termodinamicista. “Reinventing the Automobile” (MITCHELL et al.) discute como serão os veículos do futuro, muito mais eficientes, limpos, práticos e seguros. Sobre veículos elétricos, “Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications” (HUGHES) tem uma introdução sobre motores elétricos e “Electric Vehicle Technology Explained” (LARMINIE e LOWRY) uma ótima teoria sobre a modelagem de veículos elétricos. “Bottled Lightning” (FLETCHER) é um livro sobre a política do desenvolvimento das baterias de lítio, que ainda têm um longo caminho para alcançarem o que precisamos quanto à eficiência, peso, preço e volume de produção. “The Great Race” (TILLEMANN) conta a história e a situação atual dos veículos elétricos. “Build Your Own Electric Motorcycle” (VOGEL) é um DIY (faça você mesmo) sobre como montar uma motocicleta elétrica com componentes disponíveis no mercado. Nada muito profundo, mas inspirador e com boas discussões.

Como comento o tempo todo, as motos, carros e bicicletas não andam sozinhos pelas ruas, como se estivessem em uma dessas propagandas enganosas. No mundo real, os veículos são limitados pelo tráfego. Há uma série de trabalhos interessantes sobre essa área. “Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation” (TREIBER e KESTING) tem a teoria básica de modelos macroscópicos, mesoscópicos e microscópicos para a modelagem do tráfego. “Modelling Transport” (ORTUZAR e WILLUMSEN) discute vários modelos para a previsão do tráfego. “Fundamentals of Traffic Simulation” (BARCELÓ) traz um bom levantamento sobre os vários softwares de tráfego existentes. Um dos livros que eu mais gosto é “The Transit Metropolis: A Global Inquiry” (CERVERO), que não tem nada a ver com motos e muito pouco com transporte individual, mas mostra um monte de experiências legais ao redor do mundo na implantação de sistemas de transporte de massa.

1.4- Motor com Potência e Rendimento Constante (ModMOT_01)

Mas vamos deixar de conversa e partir para a parte técnica. O modelo mais simples de motor que podemos imaginar é um que tem potência e rendimento constantes. Isso não é real, pois a potência de um motor varia com a rotação (aquele valor constante que aparece na propaganda, 100CV, por exemplo, é a potência máxima em uma determinada rotação). O rendimento do motor, que é a fração da energia do combustível que é convertida em energia mecânica no eixo, também não é constante, variando com a rotação e também com a carga. Agora, mesmo este nosso primeiro modelo (vamos chamar ModMOT_01: Modelo do Motor 01) sendo bastante simples, podemos usá-lo para apresentar métodos, discussões e até alguns resultados importantes.

Nas próximas seções (1.4 até 1.9), não estaremos interessados em saber para o que a potência do motor será usada. Queremos saber apenas o que acontece dentro motor. Mas nunca nos esqueçamos, como já vimos, que essa energia será usada depois para vencer as resistências: aerodinâmica, gravitacional, de rolagem e inercial. Por isso, uma discussão importante neste momento é que não queremos e não precisamos necessariamente de um motor muito potente. Só precisamos de um motor potente se o veículo for mal projetado, já que então as resistências serão muito grandes. O que queremos de um veículo não é a potência, mas sim baixo consumo e, ocasionalmente, aceleração e velocidade. As propagandas tentam nos convencer que para ter bom desempenho (aceleração e velocidade) precisamos ter potência. Não precisamos! Precisamos ter potência disponível, que é a diferença entre a potência do motor e a

potência das resistências. Então, para um mesmo desempenho, você pode ter ou um veículo bem projetado (boa aerodinâmica e leve) com baixa potência de motor, ou então um veículo mal projetado (aerodinâmica ruim e pesadão) com alta potência de motor. Portanto, toda vez que você ouvir uma fábrica se “orgulhando” que seu motor tem alta potência, pode ter certeza que é para compensar um veículo mal projetado!

A Figura 1.5 apresenta os dados e resultados usados no modelo com potência e rendimento constantes (ModMOT_01) implementado na planilha eletrônica V1C1P1Ab01. As células pintadas contêm os dados do modelo e as células brancas os resultados. Neste primeiro modelo vou tomar o cuidado de mostrar as entradas nas unidades comuns e também nas unidades do SI, mas nos próximos modelos vou apresentar os valores apenas nas unidades usuais.

01: Dados MCI				SI	
P_{mec}	kW	3,7	W	3700	
η_{motor}		0,22			
V	km/h	60	m/s	16,7	
PC_{comb}	kJ/kg	43000	J/kg	43000000	
ρ_{comb}	kg/litro	0,745	kg/m ³	745	
κ_{litro}	R\$/litro	3,5	R\$/m ³	3500	
ψ_{kg}	kg_CO2/kg_comb	3,09			

02: Dados ME				SI	
κ_j	R\$/kWh	0,6	R\$/J	1,7E-07	
η_{motor}		0,7			
ψ_j	kgCO2/kWh	0,3	kgCO2/J	8,3E-08	

03: Dados PH				SI	
PC_{comb}	kcal/kg	2800	J/kg	11720800	
κ_{kg}	R\$/kg	7,5			
η_{motor}		0,22			
ψ_{kg}	kgCO2/kg_ref	0,75			

04: Resultados MCI				SI	
P_{mec}	CV	5,0	W	3700	
P_{fonte}	kW	16,8	W	16818,18	
\dot{m}_{comb}	kg/h	1,4	kg/s	3,9E-04	
Δ	litros/h	1,9	m ³ /s	1,9E-03	
ψ	kg_CO2/h	4,3	kgCO2/s	1,2E-03	
κ_{km}	R\$/km	0,11	R\$/m	1,1E-04	
A_{esp}	km/litro	31,7	m/m ³	3,2E-02	

05: Resultados ME			
P_{mec}	CV	5,03	
P_{fonte}	kW	5,29	
P_{fonte}	kWh/h	5,29	
ψ	kg_CO2/h	1,59	
κ_{km}	R\$/km	0,05	
$\dot{m}_{comb,equiv}$	kg/h	0,44	
Δ_{equiv}	litros/h	0,59	
$A_{esp,equiv}$	km/litro_eq	101,0	

06: Resultados PH			
P_{mec}	CV	5,03	
P_{fonte}	kW	16,82	
P_{fonte}	kcal/h	14463,80	
\dot{m}_{comb}	kg/h	5,17	
ψ	kg_CO2/h	3,87	
κ_{km}	R\$/km	0,65	
$\dot{m}_{comb,equiv}$	kg/h	1,41	
Δ_{equiv}	litros/h	1,89	
$A_{esp,equiv}$	km/litro_eq	31,75	

Figura 1.5- Consumo de combustível, emissão de CO2, custo específico e autonomia específica de uma motocicleta (3,7 kW, 60 km/h) com vários sistemas de propulsão (MCI, ME e PH). (ModMOT_01, planilha V1C1P1Ab01)

Sobre a Figura 1.5, a tabela 01 mostra os dados do motor de combustão interna e alguns dados gerais, como a velocidade do veículo e a potência mecânica desejada; na tabela 02 estão os dados de um motor elétrico e na seção 03 de um sistema de propulsão humana. As tabelas 04, 05 e 06 apresentam os resultados para cada um desses sistemas de propulsão (MCI, ME e PH). Nas próximas seções vamos detalhar as equações desse modelo, aproveitando para fazer a análise dos resultados.

1.4.1 – Motor de Combustão Interna

Como os motores de combustão interna são os mais comuns e como este capítulo foi pensado para servir como uma fonte de exemplos de uma disciplina de Termodinâmica, começamos então por eles. A Equação 1.10 faz a conversão de unidades, do kW do SI (que usaremos no modelo) para o CV que aparece no manual do veículo. É a única vez que vou fazer isso. Daqui em diante, as conversões serão de responsabilidade do leitor.

$$P_{mec}[CV] = \frac{P_{mec}[kW]}{0,735} \quad (1.10)$$

O rendimento de um motor, η_{motor} , é a razão entre a energia mecânica que sai no eixo do motor e a energia usada como fonte (energia da gasolina, por exemplo). Se, por exemplo, o rendimento do motor é de 0,22 (22%) e tem potência mecânica de 3,7 kW (5,0 CV) então precisamos que o combustível libere 16,8 kW ($3,7 \text{ kW} \div 0,22$) durante a combustão.

$$P_{fonte} = \frac{P_{mec}}{\eta_{motor}} \quad (1.11)$$

Cada combustível, devido à sua composição química, libera certa quantidade de energia térmica durante a combustão. Isto é, a energia que estava armazenada nas ligações químicas é transformada em movimento das moléculas, aumentando a temperatura da mistura e, caso a combustão se dê em um volume fechado, aumentando também a pressão. É nesse aumento de pressão que estamos interessados, pois, olhando novamente na Figura 1.1, é o aumento da pressão durante a combustão (processo c-d) que aumenta a pressão no cilindro, fazendo com o que o pistão realize trabalho útil durante a expansão (processo d-e).

A energia térmica liberada durante a queima de um combustível é chamada de Poder Calorífico do combustível (PC_{comb}). Por exemplo, a queima de 1 kg de gasolina libera 43.000 kJ e a queima de 1 kg de álcool libera 27.000 kJ, aproximadamente.

Os combustíveis não são substâncias simples, mas muitas vezes misturas de vários hidrocarbonetos e aditivos. Neste capítulo vamos simplificar bastante as coisas: a gasolina será representada apenas pelo octano (C_8H_{18}) e o álcool combustível apenas pelo etanol (C_2H_5OH).

A Equação 1.12 permite calcular o fluxo de combustível necessário para manter determinada potência. Logo, para que um motor a gasolina ($\eta_{motor}=0,22$) tenha potência mecânica, P_{mec} , de 5,0 CV, é necessária a queima de 1,4 kg/h de gasolina, ou, então, (considerando agora $\eta_{motor}=0,24$) 2,1 kg/h de álcool.

$$\dot{m}_{comb} = \frac{P_{fonte}}{PC_{comb}} \quad (1.12)$$

É comum expressar o consumo de combustível em litros, não em quilogramas (Equação 1.13). Sabendo que a massa específica (ρ_{comb}) da gasolina é 0,745 kg/litro, e que do álcool é 0,789 kg/litro, calculamos que o consumo de combustível ($\dot{\Delta}$) para o exemplo anterior seria, respectivamente, de 1,9 l/h (gasolina) e 2,6 l/h (álcool). Um motor consome mais álcool do que gasolina, para a mesma potência, porque um litro de álcool tem menos energia que um litro de gasolina.

$$\dot{\Delta} = \frac{\dot{m}_{comb}}{\rho_{comb}} \quad (1.13)$$

Na queima de um hidrocarboneto há a produção de CO_2 e H_2O , entre outros compostos que em geral não são relevantes para o cálculo energético (embora sejam importantes, como poluentes, por causa dos efeitos nocivos). O termo ψ_{kg} , na Equação 1.14, expressa

quantos quilogramas de CO₂ são produzidos na queima de cada quilograma de combustível. Cada combustível possui um valor diferente para essa emissão específica.

$$\dot{\Psi} = \dot{m}_{comb}\psi_{kg} \quad (1.14)$$

O valor usado para ψ_{kg} (kg de CO₂ por unidade de massa) ou ψ_J (kg de CO₂ unidade de energia) deve ser bem pensado. Por exemplo, no caso da gasolina, além da emissão da queima, há também a emissão na produção da gasolina. O mesmo acontece com a propulsão humana, já que a produção de alimentos precisa de tratores, o processamento precisa de calor e o seu armazenamento muitas vezes de refrigeração. Mesmo o uso da energia elétrica, que não emite localmente, pode emitir CO₂ na sua geração. O caso do álcool é mais complicado. Por um lado, a emissão (70,7 kg de CO₂ por GJ) é praticamente a mesma que a da gasolina (71,9 kg de CO₂ por GJ). Por outro lado, parte desse CO₂ emitido durante a queima do álcool será reabsorvida pela biomassa (cana-de-açúcar, no caso brasileiro) na próxima safra. Para levar em conta essas diferenças entre os vários combustíveis, e também a emissão durante a produção da energia usada no veículo, mais para frente, nos modelos mais detalhados, incluiremos um fator multiplicativo na Equação 1.14. Por enquanto deixemo-la assim.

Nos voltando agora para os gastos que teremos com combustível, e sabendo que o preço do litro do combustível é κ_{litro} , podemos calcular o custo por quilometro usando a Equação 1.15.

Muita atenção neste momento da nossa teoria, porque ninguém garante que quando esse veículo estiver em uma velocidade (V) de 60 km/h, irá precisar de 5,0 CV de potência mecânica. Por enquanto isso é um “dado”, e não necessariamente verdadeiro. Como vimos na Seção 1.2, a potência necessária depende da aerodinâmica, do relevo, etc. Consideraremos essa relação entre a potência e a velocidade novamente a partir da Seção 1.10, quando voltarmos ao modelo dinâmico do veículo. Por enquanto, usaremos essa velocidade do veículo apenas como uma referência temporária para poder analisar os resultados.

$$\kappa_{km} = \frac{\dot{\Delta}\kappa_{litro}}{V} \quad (1.15)$$

Finalmente, com a Equação 1.16, podemos calcular a autonomia específica A_{esp} do veículo. Isto é, quantos quilômetros ele faz com um litro de combustível.

$$A_{esp} = \frac{V}{\dot{\Delta}} \quad (1.16)$$

A Figuras 1.6 e 1.7 resumem os dados e os resultados do ModMOT_01 no caso da gasolina e do álcool, que foram os dois combustíveis usados nas discussões acima. Interessante notar que neste estudo consideramos várias métricas na comparação dos veículos: o rendimento, o consumo volumétrico, o gasto financeiro e a emissão de CO₂.

01: Dados MCI			SI	
P_{mec}	kW	3,7	W	3700
η_{motor}		0,22		
V	km/h	60	m/s	16,7
PC_{comb}	kJ/kg	43000	J/kg	43000000
ρ_{comb}	kg/litro	0,745	kg/m ³	745
κ_{litro}	R\$/litro	3,5	R\$/m ³	3500
ψ_{kg}	kg_CO2/kg_comb	3,09		

04: Resultados MCI			SI	
P_{mec}	CV	5,0	W	3700
P_{fonte}	kW	16,8	W	16818,18
\dot{m}_{comb}	kg/h	1,4	kg/s	3,9E-04
$\dot{\Delta}$	litros/h	1,9	m ³ /s	1,9E-03
$\dot{\psi}$	kg_CO2/h	4,3	kgCO2/s	1,2E-03
κ_{km}	R\$/km	0,11	R\$/m	1,1E-04
A_{esp}	km/litro	31,7	m/m ³	3,2E-02

Figura 1.6 - Consumo de combustível, emissão de CO2, custo específico e autonomia específica de um motor a gasolina. (ModMOT_01, planilha V1C1P1Ab01)

01: Dados MCI			SI	
P_{mec}	kW	3,7	W	3700
η_{motor}		0,24		
V	km/h	60	m/s	16,7
PC_{comb}	kJ/kg	27000	J/kg	27000000
ρ_{comb}	kg/litro	0,789	kg/m ³	789
κ_{litro}	R\$/litro	2,5	R\$/m ³	2500
ψ_{kg}	kg_CO2/kg_comb	1,91		

04: Resultados MCI			SI	
P_{mec}	CV	5,0	W	3700
P_{fonte}	kW	15,4	W	15416,67
\dot{m}_{comb}	kg/h	2,1	kg/s	5,7E-04
$\dot{\Delta}$	litros/h	2,6	m ³ /s	2,6E-03
$\dot{\psi}$	kg_CO2/h	3,9	kgCO2/s	1,1E-03
κ_{km}	R\$/km	0,11	R\$/m	1,1E-04
A_{esp}	km/litro	23,0	m/m ³	2,3E-02

Figura 1.7 - Consumo de combustível, emissão de CO2, custo específico e autonomia específica de um motor a álcool. (ModMOT_01, planilha V1C1P1Ab01)

1.4.2 - Motor Elétrico

E se usássemos um motor elétrico (ME) no lugar de um motor de combustão interna (MCI)? As equações são praticamente as mesmas, mas precisamos fazer algumas mudanças. Em primeiro lugar porque os valores da tarifa e da emissão no uso da energia elétrica são dados por unidade de energia, não por unidade volumétrica. Por isso, usamos as Equações 1.17-18.

$$\dot{\psi} = P_{fonte} \psi_J \quad (1.17)$$

$$\kappa_{km} = \frac{P_{fonte} \kappa_J}{V} \quad (1.18)$$

Outra questão prática é que estamos acostumados com veículos de combustão interna, mas não com veículos elétricos. Então, para fazer comparações, é interessante calcular quanto de gasolina estaríamos gastando se aquele motor elétrico fosse um MCI. Por exemplo, como o rendimento de um ME (70%) é bem maior que um MCI (usamos 22%

para a gasolina), a potência da fonte (neste caso energia elétrica) precisa ser apenas 5,29 kW (para os mesmos 5,0 CV de energia mecânica). Se esses 5,29 kW viessem da gasolina, estaríamos queimando 0,44 kg/h de combustível equivalente. Obviamente isso não é possível, pois a eficiência de conversão da energia da gasolina em um MCI é de apenas 22%, e não 70%. Mas é uma forma interessante para fazer comparações.

$$\dot{m}_{comb,equiv} = \frac{P_{fonte}}{PC_{comb,equiv}} \tag{1.19}$$

O mesmo raciocínio por ser usado para o cálculo do fluxo volumétrico equivalente de combustível (Equação 1.20), $\dot{\Delta}_{equiv}$,

$$\dot{\Delta}_{equiv} = \frac{\dot{m}_{comb,equiv}}{\rho_{comb,equiv}} \tag{1.20}$$

e da autonomia específica da motocicleta elétrica:

$$A_{esp,equiv} = \frac{V}{\dot{\Delta}_{equiv}} \tag{1.21}$$

A Figura 1.8 apresenta os dados e os resultados para um motor elétrico usando a gasolina como combustível equivalente. Nessa tabela, coloquei uma tarja sobre os valores que não são relevantes para o ME que discutimos agora. Comparando com a Figura 1.6, podemos ver que a autonomia específica passou de 31,7 km/l no caso do MCI_{gas} para 101,0 km/litro_{equivalente} no caso da motocicleta elétrica. Podemos notar que a razão 101,0 para 31,7, é exatamente a relação entre os rendimentos dos dois motores 101,0/31,7 = 0,70/0,22. Então não há mistério, os veículos elétricos são melhores do ponto de vista energético porque os motores elétricos são mais eficientes do que os motores de combustão interna e também do que os corpos humanos.

01: Dados MCI			SI	
P_{mec}	kW	3,7	W	3700
V	km/h	60	m/s	16,7
PC_{comb}	kJ/kg	43000	J/kg	43000000
ρ_{comb}	kg/litro	0,745	kg/m ³	745
02: Dados ME			SI	
κ_j	R\$/kWh	0,6	R\$/J	1,7E-07
η_{motor}		0,7		
ψ_j	kgCO2/kWh	0,3	kgCO2/J	8,3E-08
05: Resultados ME				
P_{mec}	CV	5,03		
P_{fonte}	kW	5,29		
P_{fonte}	kWh/h	5,29		
ψ	kg_CO2/h	1,59		
κ_{km}	R\$/km	0,05		
$\dot{m}_{comb,equiv}$	kg/h	0,44		
$\dot{\Delta}_{equiv}$	litros/h	0,59		
$A_{esp,equiv}$	km/litro_eq	101,0		

Figura 1.8 - Consumo de combustível, emissão de CO2, custo específico e autonomia específica de uma motocicleta elétrica. (ModMOT_01, planilha V1C1P1Ab01)

Comparando o preço das duas fontes energéticas (gasolina e eletricidade), e passando os valores para as mesmas bases, vemos que a gasolina custa 0,11 R\$/MJ enquanto a eletricidade custa R\$ 0,16 R\$/MJ. Mesmo assim, o menor preço energético da gasolina não compensa a grande ineficiência do MCI.

Agora, claro que a substituição dos atuais carros convencionais com MCI por carros elétricos não é uma tarefa fácil. Primeiro porque já temos toda uma indústria consolidada, de fabricação de automóveis, de produção de petróleo e de distribuição de gasolina. Mudar essa infraestrutura tem um preço. Além disso, a energia elétrica para os novos carros elétricos teria que vir de algum lugar. Nada que não se possa fazer com tempo, mas também nada que se possa fazer do dia para a noite.

Outra questão importante dos carros elétricos é o peso das baterias. Por exemplo, 100 GJ de energia mecânica no eixo do veículo pode ser armazenada em 10,6 kg gasolina, considerando $\eta_{motor}=0,22$ para o MCI. Os mesmos 100 GJ de energia mecânica no eixo de um veículo elétrico precisaria de 204 kg de baterias de íon-lítio, considerando $\eta_{motor}=0,7$ para o motor elétrico. Isso porque 1 kg de gasolina armazena 43 MJ, enquanto 1 kg de bateria de íon-lítio armazena apenas 0,7 MJ. Essa é uma grande vantagem da gasolina: sua energia específica.

Por isso, os veículos elétricos ou são mais pesados ou tem menor autonomia. Esse aumento de peso é mais sentido proporcionalmente no caso dos veículos mais leves (motocicletas e bicicletas).

No entanto, devemos sempre nos lembrar que não é uma boa prática de engenharia superdimensionar equipamentos. Por exemplo, um elevador para 100 pessoas não é uma solução de engenharia melhor do que um elevador para 10 pessoas no caso de uma necessidade de 10 pessoas. Assim como um carro com autonomia de 500 km por tanque não é uma solução melhor do que um carro com autonomia de 50 km se você só roda 50 km por dia. Ou, então, um carro com potência de 100 CV não é uma solução melhor de engenharia se você só precisa de 10 CV para rodar a 60 km/h na cidade. Essa questão, de oferecerem veículos muito maiores do que precisamos, não é uma questão de engenharia, pois os engenheiros das fábricas sabem muito bem projetar veículos mais adequados para o uso urbano (mais leves, com menor autonomia e maior eficiência). O problema está no *marketing*, que tem conseguido convencer as pessoas que é melhor ter um carro mais pesado e mais beberrão do que um carro mais inteligente e mais eficiente. Cabe aos novos engenheiros que entrarem no mercado convencer as pessoas que ser sofisticado é ser eficiente, limpo, inteligente e maneiro.

Para terminar este assunto, outra limitação atual dos veículos elétricos é o tempo de carga da bateria. Enquanto um tanque de gasolina pode ser recarregado em minutos, são necessárias horas para carregar a bateria de um carro elétrico. Isso pode ser resolvido com o desenvolvimento de novas tecnologias para as baterias, com a recarga durante o tempo em que a pessoa estiver dormindo ou trabalhando, ou então com a troca rápida de bateria nos postos. Mais uma oportunidade para os engenheiros.

1.4.3 - Propulsão Humana

O corpo humano é muito parecido com um MCI, já que transforma a energia do alimento em energia mecânica nos músculos. A diferença está no tipo de tarifa, já que compramos comida por quilograma, não por litro, e por isso é mais apropriado usar a seguinte equação:

$$\kappa_{km} = \frac{\dot{m}_{comb} \kappa_{kg}}{V} \quad (1.22)$$

Na Figura 1.9 vemos os resultados para um veículo com propulsão humana. Mas cuidado, pois usamos os mesmos valores de potência mecânica (3,7 kW) e velocidade (60 km/h) que nos outros exemplos, o que é um absurdo. Para se ter uma ideia, um ciclista urbano saudável tem potência de aproximadamente 0,1 kW. Então, esse caso estudado seria de um veículo com 37 pessoas pedalando! Talvez um ônibus dos Flintstones. Mais para frente vamos fazer as contas para uma bicicleta, mas, apesar do absurdo deste exemplo, algumas comparações são interessantes.

01: Dados MCI			SI	
P_{mec}	kW	3,7	W	3700
V	km/h	60	m/s	16,7
PC_{comb}	kJ/kg	43000	J/kg	43000000
ρ_{comb}	kg/litro	0,745	kg/m ³	745
03: Dados PH			SI	
PC_{comb}	kcal/kg	2800	J/kg	11720800
κ_{kg}	R\$/kg	7,5		
η_{motor}		0,22		
ψ_{kg}	kgCO ₂ /kg _{ref}	0,75		
06: Resultados PH				
P_{mec}	CV	5,03		
P_{fonte}	kW	16,82		
P_{fonte}	kcal/h	14463,80		
\dot{m}_{comb}	kg/h	5,17		
$\dot{\psi}$	kg _{CO2} /h	3,87		
κ_{km}	R\$/km	0,65		
$\dot{m}_{comb,equiv}$	kg/h	1,41		
$\dot{\Delta}_{equiv}$	litros/h	1,89		
$A_{esp,equiv}$	km/litro _{eq}	31,75		

Figura 1.9 - Consumo de combustível, emissão de CO₂, custo específico e autonomia específica de uma “motocicleta” com propulsão humana. (ModMOT_01, planilha V1C1P1Ab01)

Em primeiro lugar, vemos que a autonomia específica neste caso é a mesma que a da moto com gasolina, o que é de se esperar, já que usamos o mesmo rendimento nos dois casos, 22%. Segundo, teríamos que ter o consumo de 5,17 kg de comida por hora, o que não é tanto lembrando que são 37 ciclistas (150g por ciclista). O interessante é o custo específico, que agora é de 0,65 R\$/km, bem mais alto que no caso da gasolina. Isso acontece porque o alimento é uma fonte energética muito cara, 0,64 R\$/MJ.

Alguns detalhes sobre esse valor de 7,50 R\$/kg de comida. Primeiro, usei o pão como referência. Se a pessoa se alimentar em um restaurante mais caro, esse valor pode subir muito, como sabemos muito bem. Se o rapaz comer só alimentos saudáveis, livres de agrotóxicos, ou então suplementos, o céu é o limite. Outro detalhe importante é que o corpo humano usa um sistema de arrefecimento evaporativo, de perda total. Quer dizer, a água que usamos para arrefecimento precisa ser reposta o tempo todo. Se alguém comprar água mineral para esse arrefecimento, o custo operacional da propulsão humana aumenta muito. Por exemplo, digamos que a pessoa tome uma garrafa de água (500 ml, R\$ 2,00) a cada 20 quilômetros pedalados. Isso aumentaria o custo específico da bicicleta em 0,10 R\$/km, praticamente o gasto que se tem com a gasolina em uma motocicleta. Por outro lado, não necessariamente a pessoa come mais para pedalar. Muitas vezes, nas classes mais abastadas da nossa sociedade, há o costume de comermos mais que o necessário e depois queimarmos esse excesso de energia em academias. Nesse caso, o custo da fonte energética usada na bicicleta poderia ser considerado nulo.

Para deixar a discussão mais justa para o lado da bicicleta, refaçamos os cálculos apresentados até aqui para uma potência mecânica de 0,15 kW rodando a 18 km/h (Figura 1.10). Nesse caso, vemos que a bicicleta com ME continua apresentando o menor custo por quilometro, e a bicicleta o mais alto. Nas seções finais deste capítulo, vamos levar em conta o custo de aquisição dos veículos, então a bicicleta ficará bem mais atraente – como sabemos da prática.

01: Dados MCI				SI	
P_{mec}	kW	0,15	W	150	
η_{motor}		0,22			
V	km/h	18	m/s	5,0	
PC_{comb}	kJ/kg	43000	J/kg	43000000	
ρ_{comb}	kg/litro	0,745	kg/m ³	745	
κ_{litro}	R\$/litro	3,5	R\$/m ³	3500	
ψ_{kg}	kg_CO2/kg_comb	3,09			

02: Dados ME				SI	
κ_j	R\$/kWh	0,6	R\$/J	1,7E-07	
η_{motor}		0,7			
ψ_j	kgCO2/kWh	0,3	kgCO2/J	8,3E-08	

03: Dados PH				SI	
PC_{comb}	kcal/kg	2800	J/kg	11720800	
κ_{kg}	R\$/kg	7,5			
η_{motor}		0,22			
ψ_{kg}	kgCO2/kg_ref	0,75			

04: Resultados MCI				SI	
P_{mec}	CV	0,20	W	150	
P_{fonte}	kW	0,68	W	681,8182	
\dot{m}_{comb}	kg/h	0,06	kg/s	1,6E-05	
Δ	litros/h	0,08	m ³ /s	7,7E-05	
ψ	kg_CO2/h	0,18	kgCO2/s	4,9E-05	
κ_{km}	R\$/km	0,015	R\$/m	1,5E-05	
A_{esp}	km/litro	234,9	m/m ³	2,3E-01	

05: Resultados ME			
P_{mec}	CV	0,20	
P_{fonte}	kW	0,21	
P_{fonte}	kWh/h	0,21	
ψ	kg_CO2/h	0,06	
κ_{km}	R\$/km	0,007	
$\dot{m}_{comb,equiv}$	kg/h	0,02	
Δ_{equiv}	litros/h	0,02	
$A_{esp,equiv}$	km/litro_eq	747,5	

06: Resultados PH			
P_{mec}	CV	0,20	
P_{fonte}	kW	0,68	
P_{fonte}	kcal/h	586	
\dot{m}_{comb}	kg/h	0,21	
ψ	kg_CO2/h	0,16	
κ_{km}	R\$/km	0,087	
$\dot{m}_{comb,equiv}$	kg/h	0,06	
Δ_{equiv}	litros/h	0,08	
$A_{esp,equiv}$	km/litro_eq	234,92	

Figura 1.10 - Consumo de combustível, emissão de CO2, custo específico e autonomia específica de uma bicicleta (0,15 kW, 18 km/h) com vários sistemas de propulsão (MCI, ME e PH). (ModMOT_01, planilha V1C1P1Ab01)

Encerrando esta seção, apresentamos, na Figura 1.11, os resultados para um carro (11 kW, 60 km/h). A propulsão elétrica continua sendo a mais em conta.

Interessante agora comparar, para um mesmo sistema de propulsão (MCI, por exemplo), as autonomies específicas dos vários veículos simulados. A motocicleta (Figura 1.5) tem autonomia específica de 31,7 km/l, a bicicleta motorizada (Figura 1.10) de 234,9 km/l, e o carro convencional (Figura 1.11) de 10,7 km/l. Como esses três veículos usam o mesmo motor e o mesmo combustível, concluímos que a diferença está na velocidade e na potência usada por cada um para vencer as resistências. O carro consome mais porque é mais pesado.

01: Dados MCI			SI	
P_{mec}	kW	11	W	11000
η_{motor}		0,22		
V	km/h	60	m/s	16,7
$P_{C_{comb}}$	kJ/kg	43000	J/kg	43000000
ρ_{comb}	kg/litro	0,745	kg/m ³	745
κ_{litro}	R\$/litro	3,5	R\$/m ³	3500
ψ_{kg}	kg_CO2/kg_comb	3,09		

02: Dados ME			SI	
κ_j	R\$/kWh	0,6	R\$/J	1,7E-07
η_{motor}		0,7		
ψ_j	kgCO2/kWh	0,3	kgCO2/J	8,3E-08

03: Dados PH			SI	
$P_{C_{comb}}$	kcal/kg	2800	J/kg	11720800
κ_{kg}	R\$/kg	7,5		
η_{motor}		0,22		
ψ_{kg}	kgCO2/kg_ref	0,75		

04: Resultados MCI			SI	
P_{mec}	CV	15,0	W	11000
P_{fonte}	kW	50,0	W	50000
\dot{m}_{comb}	kg/h	4,2	kg/s	1,2E-03
$\dot{\Delta}$	litros/h	5,6	m ³ /s	5,6E-03
ψ	kg_CO2/h	12,9	kgCO2/s	3,6E-03
κ_{km}	R\$/km	0,33	R\$/m	3,3E-04
A_{esp}	km/litro	10,7	m/m ³	1,1E-02

05: Resultados ME			SI	
P_{mec}	CV	14,97		
P_{fonte}	kW	15,71		
P_{fonte}	kWh/h	15,71		
ψ	kg_CO2/h	4,71		
κ_{km}	R\$/km	0,16		
$\dot{m}_{comb,equiv}$	kg/h	1,32		
$\dot{\Delta}_{equiv}$	litros/h	1,77		
$A_{esp,equiv}$	km/litro_eq	34,0		

06: Resultados PH			SI	
P_{mec}	CV	14,97		
P_{fonte}	kW	50,00		
P_{fonte}	kcal/h	43000,48		
\dot{m}_{comb}	kg/h	15,36		
ψ	kg_CO2/h	11,52		
κ_{km}	R\$/km	1,92		
$\dot{m}_{comb,equiv}$	kg/h	4,19		
$\dot{\Delta}_{equiv}$	litros/h	5,62		
$A_{esp,equiv}$	km/litro_eq	10,68		

Figura 1.11 - Consumo de combustível, emissão de CO2, custo específico e autonomia específica de um carro (11 kW, 60 km/h) com vários sistemas de propulsão (MCI, ME e PH). (ModMOT_01, planilha V1C1P1Ab01)

1.5 – Ciclo Otto (ModMot_02)

Na seção anterior, nós fizemos todos os cálculos assumindo que conhecíamos (1) o rendimento do motor, (2) a potência de tração necessária para o movimento e (3) a velocidade do veículo. Isso foi interessante para chegarmos a conclusões importantes, mesmo usando um modelo muito simples. Mas a verdade é que não conhecemos aqueles valores e, por isso, a partir de agora, nos aplicaremos em calculá-los. Desta Seção 1.5 até a 1.9 nos preocuparemos exclusivamente em calcular o rendimento e a máxima potência possível para um motor. A partir da Seção 1.10 até a 1.13, iremos então calcular a potência necessária para o movimento em várias condições. Juntando esses dois modelos - do motor, para o cálculo do rendimento e da potência máxima; e do veículo, para o cálculo da potência necessária para o movimento – poderemos voltar aos cálculos das seções anteriores com dados mais realistas e até estendê-los um pouco.

O primeiro passo será o cálculo do rendimento de um motor idealizado a partir de um Ciclo Otto. Coisa que vou fazer muito rapidamente, já que qualquer livro de Termodinâmica apresenta isso. A Figura 1.12 apresenta novamente os processos que ocorrem em um motor de combustão interna de quatro tempos, coisa que já tínhamos visto na Figura 1.1.

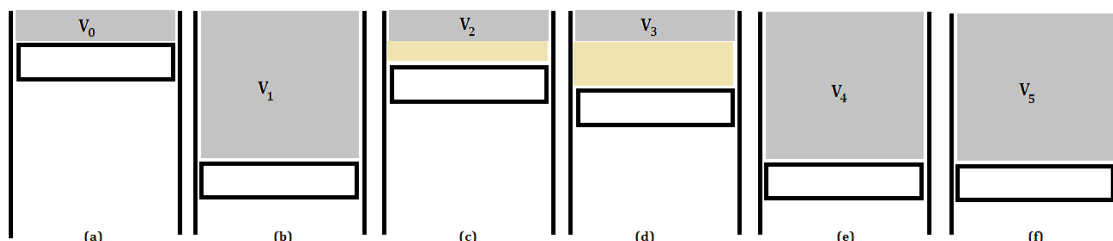


Figura 1.12 – Representação de um motor de combustão interna.

A figura 1.13 apresenta como fica esse motor quando idealizado segundo um Ciclo Otto. Fazemos as seguintes hipóteses simplificativas: (1) o fluido de trabalho é sempre o ar, (2)

o ar se comporta como gás perfeito com c_{p_0} constante, (3) a combustão é modelada como uma transferência de calor com uma fonte quente, (4) o processo que vai do início da exaustão até o final da aspiração é modelado como uma transferência de calor com uma fonte fria, (5) os processos de compressão e expansão são reversíveis e adiabáticos, logo isoentrópicos, e (6) a “queima” é instantânea, i.e., a volume constante. Chamaremos esse modelo de ModMOT_02, que está modelado na planilha V1C1P1Ab02.

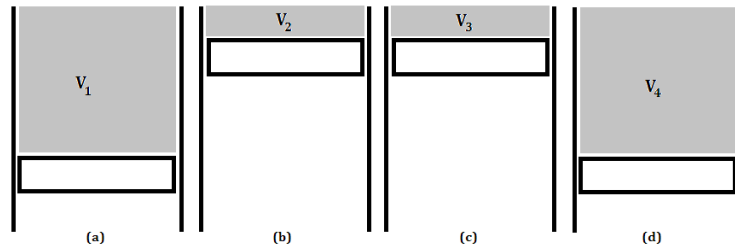


Figura 1.13 - Representação de um motor de combustão interna operando segundo um Ciclo Otto.

Como estamos considerando que o ar se comporta como gás perfeito, podemos considerar também que a diferença entre os calores específicos a pressão e a volume constante é constante.

$$c_v = c_p - R \quad (1.23)$$

Além disso, como os calores específicos estão sendo considerados constantes, o coeficiente isoentrópico também será. Essa é uma aproximação forte para um motor, já que durante todo o ciclo há um aumento muito grande de temperatura, fazendo com que os calores específicos tenham variação de até 30%.

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (1.24)$$

Quando o pistão chega ao ponto morto superior, o ponto mais próximo do cabeçote e mais distante do virabrequim, ainda resta um volume (V_2) no cilindro, como pode ser visto na Figura 1.13. Quando o pistão chega na parte inferior, o volume é máximo (V_1). A diferença entre esses dois volumes é o que é “varrido” pelo pistão durante o movimento, que é o potencial que o motor tem para aspirar a cada nova admissão. Esse volume é chamado de volume deslocado (V_{desl}), e é uma das principais características do motor. A soma dos volumes deslocados de todos os cilindros de um motor é a sua capacidade volumétrica. No caso das motos, em geral usamos ‘cc’ (cilindradas, centímetros cúbicos) e, no caso dos motores, ‘litros’. Um motor de 1000 cc tem a mesma capacidade volumétrica que um motor de 1 litro.

$$V_{desl} = V_1 - V_2 \quad (1.25)$$

Já vimos que toda a energia mecânica de um motor vem da conversão do combustível. Portanto, para aumentar a potência de um motor, ou você aumenta seu rendimento ou aumenta a quantidade de combustível que é queimada.

A quantidade de combustível queimada, como veremos mais à frente, é limitada pela quantidade de ar no cilindro. De certa forma, colocar combustível dentro do cilindro é relativamente fácil, mas não é o caso do ar. Portanto, um dos maiores limitadores da potência de um motor é a quantidade de ar que ele aspira. Essa quantidade pode ser

aumentada de três formas: melhorando a eficiência volumétrica máxima, o que pode ser feito com o uso de um turbocharger (ou supercharger) ou com um bom projeto do sistema de admissão e escape; aumentando a capacidade volumétrica do motor (fazendo então com que a cada ciclo ele aspire mais ar e, conseqüentemente, possa queimar mais combustível); ou aumentando a rotação do motor. O “acelerador” de um motor tem como objetivo restringir ou liberar a entrada de ar no motor, controlando dessa forma a sua potência. Em outras palavras, o acelerador age sobre a eficiência volumétrica do motor.

Uma característica importante de um motor é a sua taxa de compressão, r_v , que é a razão entre o volume no ponto morto inferior e no superior (Equação 1.26). Quanto maior r_v , maior o rendimento. O problema é que, ao aumentarmos muito a compressão, aumentamos também a temperatura dentro do cilindro na subida do pistão, fazendo com que a mistura ar-combustível queime antes do esperado. Isso tem dois efeitos maléficos. O primeiro é que a parte principal da queima ocorre ainda na subida do pistão, dificultando o movimento. Mas o pior é que essa queima espontânea é descontrolada, criando ondas de choque que causam irreversibilidades e erosão no pistão.

A “octanagem” é uma característica dos combustíveis que diz quanto uma mistura com aquele determinado combustível pode suportar de compressão antes de ocorra a autoignição. Quanto maior a octanagem de um combustível, maior é a sua capacidade de suportar a compressão. Logo, se um combustível tem alta octanagem, ele pode ser usado em um motor com taxa de compressão mais alta, tendo, então, um maior rendimento. Essa é a uma das razões para o motor a álcool ter um maior rendimento (na base energética, não na volumétrica) que o motor a gasolina.

Os motores que podem trabalhar com álcool e gasolina não conseguem aproveitar totalmente essa característica do álcool, já que precisam operar com a gasolina, que tem menor octanagem.

Outra distinção importante é que um combustível com maior octanagem não necessariamente tem mais energia, como é o caso do álcool, por exemplo. O conteúdo energético de um combustível é medido pelo poder calorífico, não pela octanagem.

$$r_v = \frac{V_1}{V_2} \quad (1.26)$$

Fazendo algebrismos nas Equações 1.25 e 1.26, chegamos às Equações 1.27 e 1.28, com as quais podemos calcular os volumes máximo e mínimo do cilindro a partir da taxa de compressão e da capacidade volumétrica do motor.

$$V_1 = \frac{r_v V_{desl}}{(r_v - 1)} \quad (1.27)$$

$$V_2 = \frac{V_{desl}}{(r_v - 1)} \quad (1.28)$$

Continuando na modelagem matemática, podemos calcular o volume específico aspirado usando a equação dos gases perfeitos:

$$v_{asp} = \frac{RT_1}{p_1} \quad (1.29)$$

Finalmente, podemos determinar a massa contida no cilindro no início da compressão. Neste momento faremos duas grandes simplificações: (1) há somente ar no cilindro e (2) a carga do cilindro está na temperatura ambiente. Em um motor real, no início da aspiração no cilindro, há o restante dos gases de combustão que ocupam o volume V_2 . Por isso, a mistura real é uma mistura de ar, combustível e dos produtos da combustão do ciclo anterior. Além disso, a temperatura desses produtos da queima é maior que a temperatura ambiente. Por outro lado, a temperatura da mistura de admissão é mais baixa que a ambiente por causa da evaporação do combustível. Ainda, deve-se levar em conta que essa mistura aspirada entra em contato com as paredes aquecidas do cilindro. Essa variação na composição da mistura de admissão, e o cálculo da temperatura da carga inicial, serão levados em conta em um modelo detalhado no Capítulo 3.

$$m_{cil} = \frac{V_1}{v_{asp}} \quad (1.30)$$

Deve-se perceber que a massa no cilindro no início da compressão (m_{cil}) é maior que a massa aspirada (m_{asp}), uma vez que parte da massa que será comprimida já ocupava o volume V_2 .

$$m_{asp} = \frac{V_{desl}}{v_{asp}} \quad (1.31)$$

Se nós soubermos quanto de combustível pode ser misturado no ar (relação ar combustível, AC), podemos então calcular a massa de combustível a cada aspiração. Atenção: essa massa de combustível, neste modelo simplificado, será usada apenas para determinar a potência liberada durante a queima. Para efeitos do cálculo do trabalho e da transferência de calor, vamos assumir, como já dito, que há apenas ar dentro do cilindro, que é o procedimento clássico nos cálculos de um Ciclo Otto.

$$m_{comb} = \frac{m_{ar}}{AC} \quad (1.32)$$

De posse da massa de combustível que pode ser aspirada a cada novo ciclo, podemos determinar a energia contida no cilindro, que é a multiplicação da massa do combustível pelo seu poder calorífico.

$$E_{cil} = m_{comb} PC \quad (1.33)$$

Uma variável importante sobre o motor é quanto ar ele aspira por unidade de tempo. Conhecendo a massa de ar aspirada por ciclo (m_{asp}) e a rotação do motor (ω), podemos calcular então o fluxo de ar, em kg/s. Importante lembrar que são necessárias duas rotações para realizar cada ciclo em um motor de quatro tempos.

$$\dot{m}_{asp} = \frac{m_{asp}\omega}{4\pi} \quad (1.34)$$

Com o fluxo de ar e a relação ar-combustível conhecidos, podemos então determinar a vazão de combustível que alimenta o motor:

$$\dot{m}_{comb} = \frac{\dot{m}_{ar}}{AC} \quad (1.35)$$

Como no Ciclo Otto é comum substituir a queima por uma transferência de calor externa, vamos dizer que a energia do combustível, por kg de ar, (E_{cil}/m_{cil}), virá de uma transferência de calor externa (q_h). Isso não é necessário, já que conhecemos a energia do combustível, mas pensaremos dessa forma para que a modelagem fique parecida com a convencional para um Ciclo Otto.

$$q_h = \frac{E_{cil}}{m_{cil}} \quad (1.36)$$

Partiremos agora para as equações de um ciclo padrão a ar ideal, que conhecemos tão bem dos textos clássicos de Termodinâmica. Primeiro, calculamos a temperatura ao final da compressão (se essa fosse isentrópica):

$$T_{2s} = T_1 r_v^{k-1} \quad (1.37)$$

Como neste modelo a compressão é isentrópica, então usaremos esse valor mesmo para o final da compressão (vamos mudar isso mais a frente):

$$T_2 = T_{2s} \quad (1.38)$$

Aplicando a primeira lei no processo de combustão, podemos calcular a temperatura ao final da combustão:

$$T_3 = T_2 + \frac{q_h}{c_v} \quad (1.39)$$

E então calcular a temperatura no final da expansão caso o processo fosse isentrópico:

$$T_{4s} = \frac{T_3}{r_v^{k-1}} \quad (1.40)$$

Como neste modelo a expansão é isentrópica, usamos esse mesmo valor:

$$T_4 = T_{4s} \quad (1.41)$$

Com as quatro temperaturas calculadas, podemos aplicar a primeira lei aos vários processos e calcular as transferências energéticas para cada ciclo:

$$W_{comp} = m_{cil} c_v (T_1 - T_2) \quad (1.42)$$

$$Q_h = m_{cil}c_v(T_2 - T_3) \quad (1.43)$$

$$W_{exp} = m_{cil}c_v(T_3 - T_4) \quad (1.44)$$

$$Q_l = m_{cil}c_v(T_4 - T_1) \quad (1.45)$$

O rendimento do ciclo é calculado (Equação 1.46) pela razão entre o trabalho líquido ($W_{comp} + W_{exp}$) e a transferência de calor com a fonte quente (Q_h). Interessante notar que W_{comp} é negativo, segundo a Equação 1.42 (a temperatura aumenta durante a compressão).

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} = \frac{W_{comp} + W_{exp}}{Q_h} \quad (1.46)$$

A potência mecânica do motor pode ser obtida multiplicando o trabalho líquido para cada ciclo pelo número de ciclos por segundo.

$$P_{mec} = (W_{comp} + W_{exp}) \frac{\omega}{4\pi} \quad (1.47)$$

Analisando as Equações 1.27, 1.30, 1.42, 1.44 e 1.47, é possível perceber como a potência de um motor depende da sua capacidade volumétrica, da taxa de compressão e da rotação.

As próximas equações são as mesmas já usadas no modelo anterior, para o cálculo da potência do combustível, do consumo volumétrico, da taxa de emissão de CO2 e da autonomia específica.

$$P_{fonte} = \frac{P_{mec}}{\eta} \quad (1.48)$$

$$\dot{\Delta} = \frac{\dot{m}_{comb}}{\rho_{comb}} \quad (1.49)$$

$$\dot{\Psi} = \dot{m}_{comb}\psi_{kg} \quad (1.50)$$

$$A_{esp} = \frac{V}{\dot{\Delta}} \quad (1.51)$$

As Figuras 1.14 e 1.15 apresentam os dados e os resultados deste modelo para um motor de 150cc queimando gasolina e álcool. Como esperado, o motor a álcool tem rendimento e potência mais altos que o motor a gasolina, embora tenha um maior consumo volumétrico.

DADOS		
T_1	C	25
p_1	kPa	100
V_{desl}	cc	150
r_v		9,5
ω	rpm	4000
V	km/h	60
PC	kJ/kg	43000
ρ_{comb}	kg/litro	0,745
ψ_{kg}	kg_CO2/kg_comb	3,088
AC	kg_ar/kg_comb	15,06
R	kJ/kg.K	0,286
c_p	kJ/kg.K	1,0035

T_1	K	298,2
V_{desl}	m ³	0,0
c_v	kJ/kg.K	0,7
k		1,4
V	km/h	16,7
V_1	m ³	1,7E-04
V_2	m ³	1,8E-05
v_{asp}	m ³ /kg	0,9
m_{cil}	kg	2,0E-04
\dot{m}_{asp}	kg/s	5,86E-03
\dot{m}_{comb}	kg/s	3,89E-04
q_h	kJ/kg_ar	2555

T_1	K	298,2
T_2	K	731,4
T_3	K	4292,4
T_4	K	1749,7

W_{comp}	kJ	-0,06
Q_h	kJ	0,50
W_{exp}	kJ	0,36
Q_i	kJ	-0,20

η		0,592
η		0,592

P_{mec}	kW	9,9
P_{mec}	CV	13,5
P_{fonte}	kW	16,7
η		0,592
$\dot{\Delta}$	litros/h	1,88
$\dot{\psi}$	kg_CO2/h	4,33
A_{esp}	km/litro	31,9

Figura 1.14 - Consumo de combustível, emissão de CO2, custo específico e autonomia específica de um MCI de 150cc queimando gasolina. (ModMOT_02, planilha V1C1P1Ab02)

Agora, um ponto importante nesses resultados foi que encontramos um rendimento alto demais para um MCI: 59% para gasolina e 62% para o álcool. Esses valores são irreais, e, portanto, precisamos melhorar o modelo.

DADOS		
T_1	C	25
p_1	kPa	100
V_{desl}	cc	150
r_v		11
ω	rpm	4000
V	km/h	60
PC	kJ/kg	27000
ρ_{comb}	kg/litro	0,789
ψ_{kg}	kg_CO2/kg_comb	1,91
AC	kg_ar/kg_comb	8,96
R	kJ/kg.K	0,286
c_p	kJ/kg.K	1,0035

T_1	K	298,2
V_{desl}	m ³	0,0
c_v	kJ/kg.K	0,7
k		1,4
V	km/h	16,7
V_1	m ³	1,7E-04
V_2	m ³	1,5E-05
v_{asp}	m ³ /kg	0,9
m_{cil}	kg	1,9E-04
\dot{m}_{asp}	kg/s	5,86E-03
\dot{m}_{comb}	kg/s	6,54E-04
q_h	kJ/kg_ar	2555

T_1	K	298,2
T_2	K	775,4
T_3	K	4336,4
T_4	K	1667,3

W_{comp}	kJ	-0,07
Q_h	kJ	0,49
W_{exp}	kJ	0,37
Q_i	kJ	-0,19

η		0,616
η		0,616

P_{mec}	kW	10,1
P_{mec}	CV	13,8
P_{fonte}	kW	16,5
η		0,616
$\dot{\Delta}$	litros/h	2,99
$\dot{\psi}$	kg_CO2/h	4,50
A_{esp}	km/litro	20,1

Figura 1.15 - Consumo de combustível, emissão de CO2, custo específico e autonomia específica de um MCI de 150cc queimando álcool. (ModMOT_02, planilha V1C1P1Ab02)

1.6 – Ciclo Otto com Compressão e Expansão Reais (ModMOT_03)

Para levar em conta as irreversibilidades na compressão e expansão, basta substituir as Equações 1.38 e 1.41 pelas Equações 1.52 e 1.53 abaixo, que incluem as eficiências isoentrópicas de compressão e de expansão. “Basta” é forma de dizer, já que não é nada fácil determinar esses valores. Mas, como eu disse na introdução, o objetivo deste capítulo é detalhar os modelos, não os dados. No entanto, não custa lembrar mais uma vez que a qualidade dos resultados depende da qualidade dos dados.

$$T_2 = T_1 + \frac{(T_{2s} - T_1)}{\eta_{comp}} \quad (1.52)$$

$$T_4 = T_3 + (T_{4s} - T_3)\eta_{exp} \quad (1.53)$$

A Figura 1.16 mostra os dados e resultados do ModMOT_03 aplicado a um motor de 150cc queimando gasolina. As equações foram implementadas na planilha eletrônica V1C1P1Ab03.

DADOS		
T_1	C	25
p_1	kPa	100
$V_{d\acute{e}sl}$	cc	150
η_{comp}		0,75
η_{exp}		0,80
r_v		9,5
ω	rpm	4000
V	km/h	60
PC	kJ/kg	43000
ρ_{comb}	kg/litro	0,745
ψ_{kg}	kg_CO2/kg_comb	3,088
AC	kg_ar/kg_comb	15,06
R	kJ/kg.K	0,286
c_p	kJ/kg.K	1,0035

T_1	K	298,2
T_{2s}	K	731,4
T_2	K	875,8
T_3	K	4436,4
T_{4s}	K	1808,4
T_4	K	2334,0

W_{comp}	kJ	-0,08
Q_h	kJ	0,50
W_{exp}	kJ	0,30
Q_i	kJ	-0,29

P_{mec}	kW	7,2
P_{mec}	CV	9,8
P_{fonte}	kW	16,7
η		0,428
\dot{V}	litros/h	1,88
$\dot{\psi}$	kg_CO2/h	4,33
A_{esp}	km/litro	31,9

T_1	K	298,2
$V_{d\acute{e}sl}$	m^3	1,50E-04
c_v	kJ/kg.K	0,7
k		1,4
V	km/h	16,7
V_1	m^3	1,68E-04
V_2	m^3	1,76E-05
v_{asp}	m^3/kg	0,9
\dot{m}_{cil}	kg	2,0E-04
\dot{m}_{asp}	kg/s	5,86E-03
\dot{m}_{comb}	kg/s	3,89E-04
q_h	kJ/kg_ar	2555

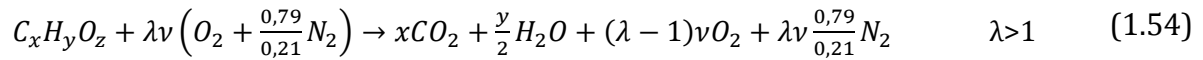
Figura 1.16 - Consumo de combustível, emissão de CO2, custo específico e autonomia específica de um MCI de 150cc queimando gasolina. (ModMOT_03, planilha V1C1P1Ab03)

Ao comparar os resultados da Figura 1.16 com a Figura 1.14, vemos como o rendimento caiu de 59% para 43%, tornando o modelo um pouco mais realista, mas ainda alto demais. Faltam dois fenômenos importantes na modelagem: as perdas térmicas no arrefecimento e as perdas por atrito no interior do motor. Antes disso, no entanto, daremos uma olhada em como calcular algumas variáveis que temos considerado como dadas.

1.7- Cálculo da relação ar-combustível (AC) e da emissão de CO2 (ψ_{kg}) (ModMOT_04)

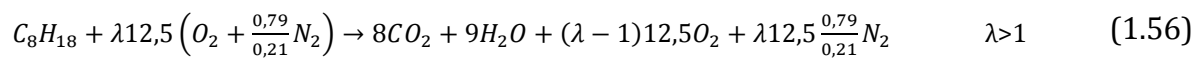
Até agora, ao usarmos qualquer um dos modelos de motor, temos assumido que conhecemos a relação ar-combustível (AC , em kg de ar por kg de combustível) e a emissão específica do combustível (ψ_{kg} , em kg de CO2 emitido por kg de combustível queimado). Mas, como esses valores são determinados? Como saber que são necessários 15,09 kg de ar para queimar 1 kg de C_8H_{18} , e que a queima dessa mistura irá produzir 3,09 kg de CO2? E se o combustível for outro, como o álcool, por exemplo? Vejamos como fazer essas contas, que não precisam de nenhum conhecimento além da estequiometria do ensino médio.

A equação da queima de um hidrocarboneto genérico $C_xH_yO_z$ é dada pela reação apresentada na Equação 1.54, na qual λ é a porcentagem de ar teórico e ν o coeficiente estequiométrico do ar (Equação 1.55).



$$\nu = x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \quad (1.55)$$

A Equação 1.54 não inclui a formação de poluentes (que não são relevantes no balanço energético) e a existência de umidade no ar de alimentação, e assume que a queima é completa (*i.e.*, há oxigênio suficiente para a queima de todo o combustível). Por exemplo, no caso do C_8H_{18} (“gasolina”), $x=8, y=18$ e $z=0$, a reação fica assim:



A massa molar do ar e do combustível podem ser calculadas a partir da composição atômica das substâncias:

$$M_{ar} = 0,21 \times 2 \times 16 + 0,79 \times 2 \times 14 \quad (1.57)$$

$$M_{comb} = x \times 12 + y \times 1 + z \times 16 \quad (1.58)$$

De posse dessas equações, fica então fácil determinar a relação ar-combustível:

$$AC = \frac{m_{ar}}{m_{comb}} = \frac{\lambda\nu M_{ar}}{M_{comb}} \quad (1.59)$$

E também a emissão específica do combustível.

$$\psi_{kg} = \frac{x(12 + 2 * 16)}{M_{comb}} \quad (1.60)$$

Vamos aproveitar que estamos fazendo essas contas para melhorar um pouco nosso modelo. Lembra que levávamos em conta o combustível para calcular a energia no cilindro, mas que a massa comprimida era apenas de ar? Vamos então considerar que o combustível também faz parte dessa mistura. Não que vá fazer tanta diferença, já que a quantidade é pequena em relação ao ar, mas é um raciocínio que depois vai nos ajudar a entender o modelo apresentado no Capítulo 3, no qual a composição química da mistura irá mudar durante todo o ciclo; desde uma mistura de ar-combustível na compressão, passando por toda a transformação durante a combustão, até a mistura dos produtos da combustão na exaustão.

Mas coloquemos os pés no chão novamente. A fração molar do combustível na mistura com o ar é dada por:

$$y_{comb} = \frac{1}{\lambda\nu(1 + 3,76) + 1} \quad (1.61)$$

Usando o Modelo de Dalton, sabemos que a pressão parcial do combustível na mistura é $p_1 y_{comb}$, o que nos permite calcular a massa correta de combustível:

$$m_{comb} = \frac{M_{comb} p_1 y_{comb} V_{desl}}{\bar{R} T_1} \quad (1.62)$$

E, da mesma forma, a massa de ar puro na mistura aspirada.

$$m_{ar,desl} = \frac{M_{ar} p_1 (1 - y_{comb}) V_{desl}}{\bar{R} T_1} \quad (1.63)$$

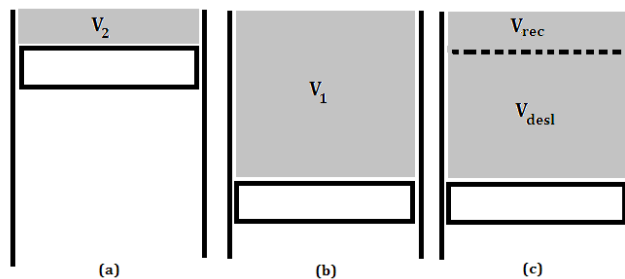


Figura 1.17 - Representação do volume residual e do volume total do cilindro.

A Figura 1.17 mostra como o volume do cilindro ao final da aspiração é a soma do volume residual (que contém os gases recirculados) e o volume deslocado (que aspira uma nova mistura de ar e combustível). A massa de gases recirculados, que continuam no cilindro após a exaustão, pode ser calculada pelo volume residual V_2 (lembrando que estamos assumindo que os gases recirculados estão na temperatura ambiente, T_1):

$$m_{ar,rec} = \frac{M_{ar} p_1 V_2}{\bar{R} T_1} \quad (1.64)$$

A massa no cilindro é a soma do ar aspirado, do combustível aspirado e dos gases recirculados que já estavam dentro do cilindro:

$$m_{cil} = m_{ar,desl} + m_{comb} + m_{ar,rec} \quad (1.65)$$

Na Figura 1.18 podemos ver os resultados do ModMOT_04 para um motor de 150cc queimando gasolina. Ao compararmos com os resultados da Figura 1.16, vemos que não há grande diferença entre os resultados (pois “por acaso” já estávamos usando os valores corretos de AC e ψ_{kg}). O importante deste modelo, no entanto, é que agora podemos estimar AC e ψ_{kg} . A Figura 1.19 apresenta os resultados para o caso da queima de álcool.

DADOS								
x	atomos de C	8	T ₁	K	298	T ₁	K	298,0
y	atomos de H	18	v		12,5	T _{2s}	K	731,0
z	atomos de O	0	M _{ar}		28,84	T ₂	K	875,4
λ		1	M _{comb}		114	T ₃	K	4228,3
T ₁	C	25	AC		15,06	T _{4s}	K	1723,6
p ₁	kPa	100	V _{dest}	m ³	1,50E-04	T ₄	K	2224,5
V _{dest}	cc	150	ψ _{kg}	kgCO2/kgcomb	3,088	W _{comp}	kJ	-0,08
η _{comp}		0,75	y _{comb}		1,65E-02	Q _h	kJ	0,49
η _{exp}		0,80	m _{comb}	kg	1,1403E-05	W _{exp}	kJ	0,29
τ _v		9,5	m _{ar,dest}	kg	1,72E-04	Q _i	kJ	-0,28
ω	rpm	4000	E _{cil}	kJ	0,49	P _{mec}	kW	7,0
V	km/h	60	c _v	kJ/kg.K	0,7	P _{mec}	CV	9,5
PC	kJ/kg	43000	k		1,4	P _{fonte}	kW	16,3
ρ _{comb}	kg/litro	0,745	V	km/h	16,7	η		0,425
R	kJ/kg.K	0,286	V ₁	m ³	1,68E-04	Δ	litros/h	1,84
c _p	kJ/kg.K	1,0035	V ₂	m ³	1,76E-05	ψ	kg_CO2/h	4,23
			v _{asp}	m ³ /kg	0,85	A _{esp}	km/litro	32,7
			m _{ar,rec}	kg	2,07E-05			
			m _{cil}	kg	2,04E-04			
			q _h	kJ/kg_ar	2406			

Figura 1.18 - Consumo de combustível, emissão de CO2, custo específico e autonomia específica de um MCI de 150cc queimando gasolina. (ModMOT_04, planilha V1C1P1Ab04)

DADOS								
x	atomos de C	2	T ₁	K	298	T ₁	K	298,0
y	atomos de H	6	v		3	T _{2s}	K	775,0
z	atomos de O	1	M _{ar}		28,84	T ₂	K	934,0
λ		1	M _{comb}		46	T ₃	K	4379,3
T ₁	C	25	AC		8,96	T _{4s}	K	1683,8
p ₁	kPa	100	V _{dest}	m ³	1,50E-04	T ₄	K	2222,9
V _{dest}	cc	150	ψ _{kg}	kgCO2/kgcomb	1,91	W _{comp}	kJ	-0,09
η _{comp}		0,75	y _{comb}		6,54E-02	Q _h	kJ	0,49
η _{exp}		0,8	m _{comb}	kg	1,8218E-05	W _{exp}	kJ	0,31
τ _v		11	m _{ar,dest}	kg	1,63E-04	Q _i	kJ	-0,27
ω	rpm	4000	E _{cil}	kJ	0,49	P _{mec}	kW	7,2
V	km/h	60	c _v	kJ/kg.K	0,7	P _{mec}	CV	9,8
PC	kJ/kg	27000	k		1,4	P _{fonte}	kW	16,4
ρ _{comb}	kg/litro	0,789	V	km/h	16,7	η		0,441
R	kJ/kg.K	0,286	V ₁	m ³	1,65E-04	Δ	litros/h	2,77
c _p	kJ/kg.K	1,0035	V ₂	m ³	1,50E-05	ψ	kg_CO2/h	4,18
			v _{asp}	m ³ /kg	0,85	A _{esp}	km/litro	21,7
			m _{ar,rec}	kg	1,76E-05			
			m _{cil}	kg	1,99E-04			
			q _h	kJ/kg_ar	2472			

Figura 1.19 - Consumo de combustível, emissão de CO2, custo específico e autonomia específica de um MCI de 150cc queimando álcool. (ModMOT_04, planilha V1C1P1Ab05)

1.8- Efeito das Perdas de Calor e do Atrito (ModMOT_05)

Sabemos dos motores reais que tanto a perda de calor no cilindro quanto o atrito mecânico diminuem a potência. O interessante é que seus efeitos são mais notados em rotações diferentes. A perda térmica é mais sentida em rotações mais baixas, pois, ao rodar mais lentamente, há mais tempo para perder calor em cada ciclo. Já o efeito do atrito é mais sentido nas rotações mais altas, onde as forças viscosas no óleo são maiores.

Para ao menos tentar levar em conta esses dois efeitos no nosso modelo, iremos incluir dois fatores de correção, f_{cal} para as perdas térmicas e f_{at} para as perdas por atrito. Ambos os fatores serão considerados lineares com a rotação do motor, segundo as Equações 1.67 e 1.68.

$$f_{cal} = \frac{(w - w_{min})}{(w_{max} - w_{min})} (f_{cal,max} - f_{cal,min}) + f_{cal,min} \tag{1.67}$$

$$f_{at} = \frac{(w - w_{min})}{(w_{max} - w_{min})} (f_{at,max} - f_{at,min}) + f_{at,min} \tag{1.68}$$

O novo modelo do motor, ModMOT_05, usa esses fatores da seguinte forma: o fator de transferência de calor atua na combustão, como se roubasse parte da energia do combustível,

$$T_3 = T_2 + \frac{q_h(1 - f_{cal})}{c_v} \quad (1.69)$$

e o fator de atrito rouba a potência mecânica do motor:

$$P_{mec} = (W_{comp} + W_{exp}) \frac{\omega}{4\pi} (1 - f_{at}) \quad (1.70)$$

Mais uma vez noto que, mesmo que o modelo seja bom, a qualidade dos resultados ainda depende da qualidade dos dados. Neste caso, eu assumi valores para as constantes $f_{cal,max}$, $f_{cal,min}$, $f_{at,max}$ e $f_{at,min}$, de tal forma que o comportamento do motor ficasse parecido com o que eu esperava. O que claramente eu não posso fazer se não conheço o comportamento do motor a priori. Por essa razão, muito embora este modelo sirva para fins didáticos e para nos preparar para os modelos mais avançados no Capítulo 3, ele é completamente insatisfatório na prática, uma vez que usa parâmetros constantes que eu não sei como calcular!

DADOS		
x	átomos de C	8
y	átomos de H	18
z	átomos de O	0
λ		1
T ₁	C	25
p ₁	kPa	100
V _{dest}	cc	150
η _{comp}		0,7
η _{exp}		0,75
r _c		9,5
ω	rpm	4000
V	km/h	60
PC	kJ/kg	43000
P _{comb}	kg/litro	0,745
R	kJ/kg.K	0,286
c _p	kJ/kg.K	1,0035

FATORES DE ATENUAÇÃO		
W _{min.}	rpm	1400
W _{max.}	rpm	9150
f _{cal,max}		0,45
f _{cal,min}		0,30
f _{at,min}		0,05
f _{at,max}		0,20

T ₁	K	298
v		12,5
M _{ar}		28,84
M _{comb}		114
AC		15,06
V _{dest}	m³	1,50E-04
ψ _{kg}	kgCO2/kgcomb	3,088
Y _{comb}		1,65E-02
m _{comb}	kg	1,1403E-05
m _{ar,dest}	kg	1,72E-04
E _{cil}	kJ	0,49
c _v	kJ/kg.K	0,7
k		1,4
V	km/h	16,7
V ₁	m³	1,68E-04
V ₂	m³	1,76E-05
v _{asp}	m³/kg	0,85
m _{ar,rec}	kg	2,07E-05
m _{cil}	kg	2,04E-04
q _h	kJ/kg_ar	2406

T ₁	K	298,0
T _{2s}	K	731,0
T ₂	K	916,6
T ₃	K	2961,9
T _{4s}	K	1207,4
T ₄	K	1646,0

W _{comp}	kJ	-0,09
Q _h	kJ	0,30
W _{exp}	kJ	0,19
Q _i	kJ	-0,20

P _{mec}	kW	3,0
P _{mec}	CV	4,1
P _{fonte}	kW	16,3
η		0,185
Δ	litros/h	1,84
ψ	kg_CO2/h	4,23
A _{exp}	km/litro	32,7

f _{cal}		0,39
f _{at}		0,11

Figura 1.20 - Consumo de combustível, emissão de CO2, custo específico e autonomia específica de um MCI de 150cc queimando gasolina. (ModMOT_05, planilha V1C1P1Ab06)

Na Figura 1.18 podemos ver os resultados desse modelo mais completo, com o qual finalmente conseguimos chegar a um valor mais próximo dos motores reais e fazer com que tanto o rendimento quanto a potência do motor variem com a rotação.

Um ponto importante, que destaco novamente nessa análise, é que não estamos ainda vinculando a potência à velocidade. Por isso, ao compararmos os resultados da Figura 1.20 ($\eta=0,185$ e $P_{mec}=4,1CV$) com a Figura 1.18 ($\eta=0,425$ e $P_{mec}=9,5CV$) a autonomia específica ficou inalterada: 32,7 km/litro. Isso está acontecendo porque o nosso veículo continua rodando a 60 km/h mesmo com potência mecânica bem menor. A partir da Seção 1.10 corrigiremos esse problema com a modelagem do veículo.

1.9- Comparação com Modelos Mais Realistas (ModMOT_06 e ModMOT_07)

No Capítulo 3 iremos estudar dois modelos mais precisos para o motor. O ModMOT_06 continuará nessa linha termodinâmica que estamos trilhando, mas agora levando em conta a evolução da reação química e as perdas térmicas durante todo o ciclo. Já o modelo ModMOT_07 irá por outro caminho, será uma equação empírica cúbica que ajusta os valores de motores reais.

Vamos analisar o comportamento dos nossos modelos até agora com o ModMOT_07. A Figura 1.21 apresenta o resultado do ModMOT_04, em que percebemos que, além do rendimento do motor ser muito alto, ele não varia com a rotação do motor.

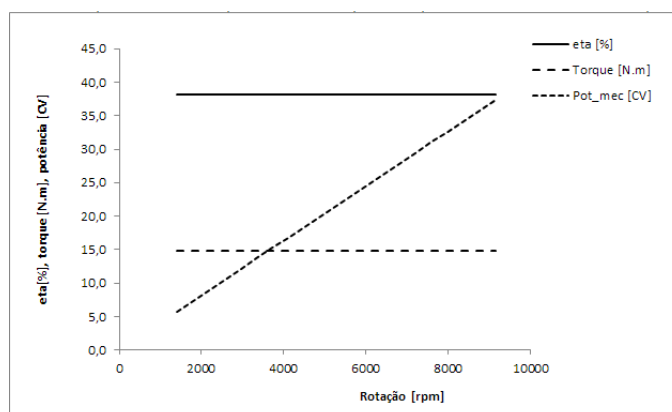


Figura 1.21 - Variação do rendimento, torque e potência com a rotação (ModMOT_04, planilha V1C1P1Ab08)

A Figura 1.22 apresenta o comportamento do ModMOT_05, no qual introduzimos os efeitos da transferência de calor e do atrito. O valor do rendimento ficou mais próximo da realidade e, além disso, observamos que o rendimento passou a variar com a rotação, o que acontece nos motores reais. No entanto, nos motores reais o rendimento também varia com a aceleração (o percentual da potência do motor que está sendo utilizada), o que não acontece nesse nosso modelo.

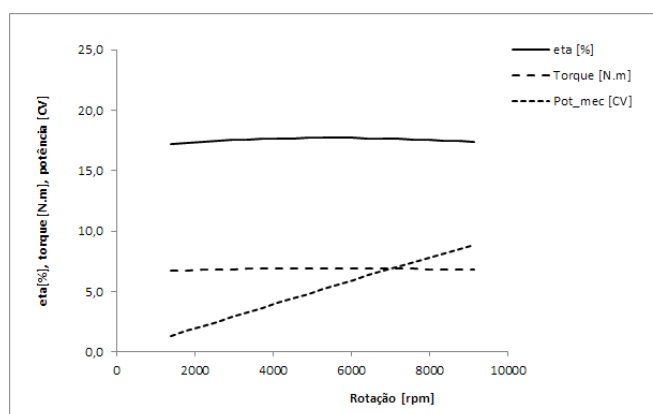


Figura 1.21 - Variação do rendimento, torque e potência com a rotação (ModMOT_05, planilha V1C1P1Ab07)

Por curiosidade, mostramos a seguir o comportamento do ModMOT_07, que ajusta empiricamente o comportamento dos motores reais. Na Figura 1.22, vemos que, para altas rotações, a potência do motor tem uma queda, o que não acontece mesmo no ModMOT_05. O formato da curva de rendimento, para aceleração máxima, no entanto, ficou bem parecida nas Figuras 1.21 e 1.22, demonstrando que o modelo desenvolvido agora não é tão ruim assim.

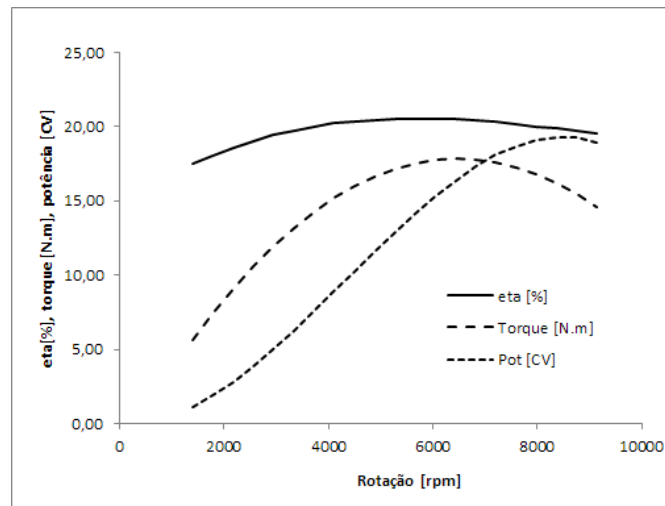


Figura 1.22 - Variação do rendimento, torque e potência com a rotação; aceleração constante (ModMOT_07, planilha V1C1P1Ab10)

A Figura 1.23 mostra como, no ModMOT_07, a potência varia tanto com a rotação quanto com a aceleração (abertura da borboleta), o que ocorre nos motores reais. Um comportamento parecido é visto na Figura 1.24, em que vemos como o rendimento varia com a rotação e com a aceleração.

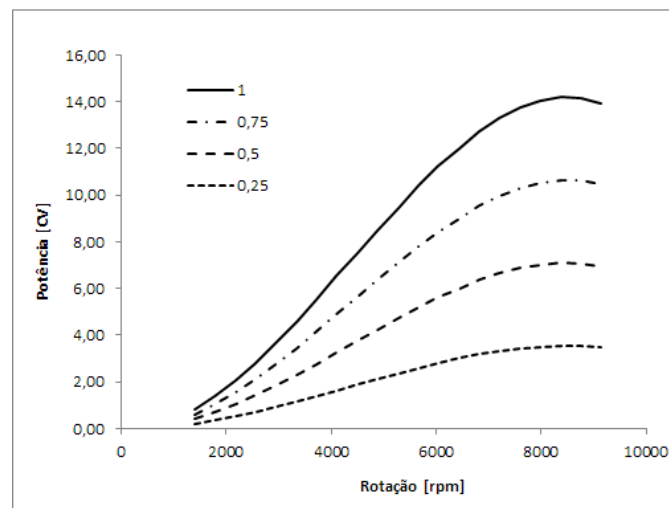


Figura 1.23 - Variação da potência com a aceleração e a rotação (ModMOT_07, planilha V1C1P1Ab10)

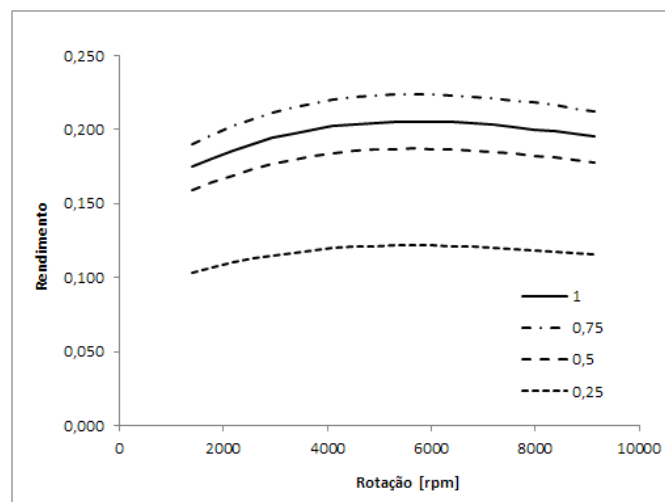


Figura 1.24 - Variação do rendimento com a aceleração e a rotação (ModMOT_07, planilha V1C1P1Ab10)

Ainda por curiosidade, adianto um pouco os resultados do modelo detalhado ModMOT_06 (também do Capítulo 3), que são mostrados na Figura 1.25. Nas duas linhas superiores de gráficos vemos o que acontece dentro do cilindro conforme o motor roda. Já a linha inferior de gráficos mostra a integração do comportamento do cilindro para cada rotação específica, gerando as curvas dos motores. Vemos, ali, que o modelo mais detalhado será capaz de gerar as curvas reais dos motores, como a variação do rendimento e da potência com a rotação. Voltaremos a esses dois modelos mais realistas no Capítulo 3.

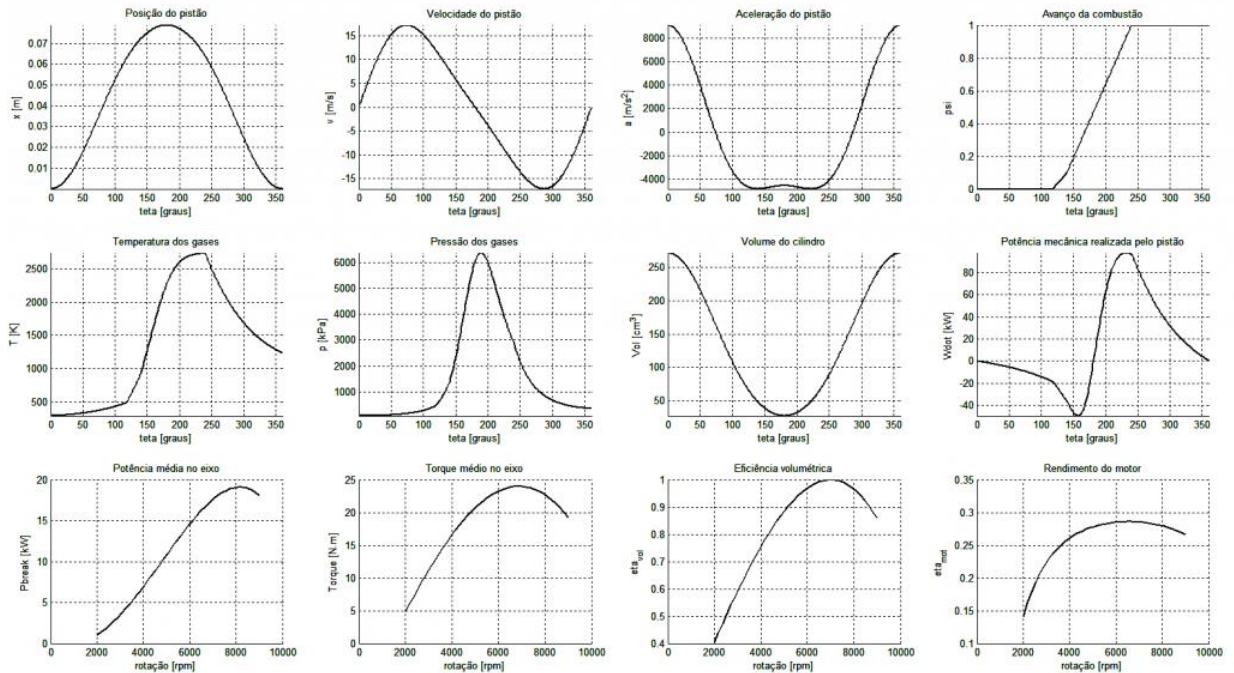


Figura 1.25 - Comportamento do modelo detalhado do motor (ModMOT_06)

1.10- Gasto Energético no Deslocamento de um Veículo de MCI em Velocidade Constante (ModVEIC_01)

Até agora estávamos interessados em calcular o rendimento e a potência de um motor específico, sem a preocupação de como esse motor iria se comportar quando instalado em um veículo. Chegou a hora de ver o que acontece. Antes, façamos uma breve revisão da Seção 1.2.

O que interessa para a dinâmica do veículo é a massa total do conjunto. Por simplicidade, vou usar apenas dois termos: m_{pil} , representando a massa útil que desejamos movimentar (*i.e.*, piloto, passageiros e carga), e m_{veic} , representando a massa que teremos que carregar junto, mesmo não querendo, (incluindo aqui a massa do próprio veículo, do lubrificante, do fluido de arrefecimento e do combustível).

$$m = m_{pil} + m_{veic} \quad (1.71)$$

As forças de resistência ao movimento são o arrasto aerodinâmico, a resistência à rolagem e a força gravitacional. Neste capítulo nós não vamos considerar variações de velocidade, então a força inercial será nula. Logo, as Equações 1.1, 1.7 e 1.8 podem ser simplificadas desconsiderando o tal termo inercial (no Capítulo 3 voltaremos ao modelo dinâmico completo):

$$F_{res} = F_{aer} + F_{rol} + F_{grav} \quad (1.72)$$

As forças que aparecem na Equação 1.72 são calculadas pelas Equações 1.3, 1.5 e 1.6. A partir do cálculo da força resistiva, é fácil determinar a potência mecânica do veículo, já que a potência é a velocidade vezes a força. Como a velocidade agora é constante, a potência também será:

$$P = V_{cruz} F_{res} \quad (1.73)$$

Vamos agora estudar o consumo, emissões e gastos de um veículo durante sua vida útil. Para tanto, vamos assumir que este vai realizar uma série de trajetos idênticos (inicialmente com velocidade constante, V_{cruz}). O deslocamento total de cada trajeto é L_2 . Logo, podemos calcular o tempo usado para cada viagem pela Equação 1.74. Por exemplo, uma moto rodando a 60 km/h leva 6 minutos para percorrer 6 km.

$$\Delta t_{traj} = \frac{L_2}{V_{cruz}} \quad (1.74)$$

A energia mecânica necessária para vencer as resistências é o produto da potência pelo tempo:

$$E_{traj,mec} = P \Delta t \quad (1.75)$$

A energia da fonte (combustível, energia elétrica ou alimento) passa por dois processos irreversíveis, que dissipam parte dessa energia: a conversão no próprio motor (MCI, ME ou PH), com rendimento η (que aprendemos como calcular nas seções anteriores), e a transmissão até a roda (considerando embreagem, caixa de marchas, corrente, etc.), que tem eficiência η_{transm} .

$$E_{traj,fonte} = \frac{E_{mec}}{\eta \eta_{transm}} \quad (1.76)$$

Inicialmente, vamos considerar o caso de um MCI, depois voltamos para ajustar as equações no caso de ME e PH, como fizemos na Seção 1.4. A massa de combustível que é queimada em cada trajeto é dada pela razão entre a energia do combustível e o seu poder calorífico.

$$m_{traj,comb} = \frac{E_{traj,fonte}}{PC} \quad (1.77)$$

O volume de combustível utilizado pode então ser determinado com o uso da massa específica:

$$\Delta_{traj,comb} = \frac{m_{traj,comb}}{\rho_{comb}} \quad (1.78)$$

E, finalmente, a autonomia é a razão entre o deslocamento e o volume de combustível queimado em cada trajeto.

$$A_{esp} = \frac{L_2}{\Delta_{traj,comb}} \quad (1.79)$$

A partir de agora vamos introduzir algumas outras métricas interessantes para comparar os vários modais (moto, bicicleta ou carro). Uma dessas métricas é o custo do tempo perdido durante o deslocamento. Por exemplo, sabemos que o ônibus é um veículo prático e relativamente barato para o usuário, mas muitas pessoas não o usam porque demora muito, tanto para chegar no ponto quanto para se deslocar. Outros aspectos importantes quanto ao ônibus são a rigidez de horários e trajetos, e, infelizmente, o baixo *status* social, que acabam fazendo com que as pessoas prefiram o transporte individual (moto, bicicleta ou carro). Agora, quando o transporte individual fica caro (tanto pelo combustível quanto pelo preço do veículo), ou então congestionado (não dá para todo mundo andar de carro), então as pessoas preferem o metrô, que é bem mais rápido que um carro em uma rua congestionada. Portanto, vemos como o tempo é importante nesse tipo de análise.

Para considerar o tempo perdido no deslocamento, vamos criar a métrica $K_{traj,tempo}$, que, considerando o salário S do trabalhador, estima quanto ele deixa de ganhar por estar se deslocando. Claro que esse é um valor aproximado, e que se ajusta melhor a um autônomo, que realmente deixa de receber se estiver parado. No caso de um assalariado, o tempo do deslocamento é subtraído do seu tempo de lazer, estudo e descanso, o que é de difícil quantificação monetária. Alguns analistas não consideram o tempo gasto quando o deslocamento é feito por bicicleta, pois consideram que esse é um “deslocamento feliz”. Sem comentários. Muito embora eu concorde que, para as classes favorecidas, o deslocamento por bicicleta pode sim estar substituindo o tempo que seria gasto em uma academia. Isso sim é quantificável (ao contrário da “felicidade” de andar de bicicleta ou a “tristeza” de andar de moto, segundo esses analistas).

Não estamos aqui considerando o tempo gasto com a procura de estacionamento no caso dos carros ou do banho no caso dos ciclistas. Lembrando ainda que a velocidade está sendo considerada constante, o que certamente não é verdade no tráfego urbano!

$$K_{traj,tempo} = \frac{S\Delta t}{3600n_{horas}n_{dias}} \quad (1.79)$$

Neste estudo, iremos somar os gastos com combustível, o custo do tempo perdido e o valor pago na aquisição do veículo. Uma alternativa para isso seria transformar todos esses gastos em tempo, somando o tempo da viagem com o tempo gasto trabalhando para pagar o veículo e o combustível. Nesse caso, usa-se uma métrica chamada *velocidade efetiva*, que é a razão entre o deslocamento físico e a soma de todos esses tempos. Essa métrica é equivalente à métrica financeira que estamos usando neste estudo. As duas levam em conta o tempo físico do deslocamento e os gastos envolvidos. Trata-se apenas de outra forma de discutir os resultados.

Quando se consideram apenas o tempo e os gastos financeiros com o veículo e combustível, a motocicleta é praticamente imbatível do ponto de vista do indivíduo – como sabemos bem da prática. No entanto, devemos lembrar que existem características adversas das motocicletas que não estamos usando nessas nossas análises, como o risco

de acidentes, o baixo *status* social, e a exposição aos elementos naturais e urbanos (*e.g.*, chuva, sol, ruído, calor).

O gasto com o combustível pode ser calculado pela multiplicação do volume queimado pela sua tarifa. Na equação 1.80 incluímos ainda um fator f_{tax} , para levar em conta acréscimos (*e.g.*, taxas, estacionamento, multas, manutenção, seguro) ou atenuações (como no caso das bicicletas quando usadas pelas classes mais abastadas, caso em que o ato de pedalar pode estar reduzindo possíveis gastos em uma academia).

$$K_{traj, fonte} = \Delta_{traj, comb} \kappa_{litro} f_{tax} \quad (1.80)$$

Como comentado anteriormente, a emissão de CO2 não ocorre apenas na conversão do combustível ou do alimento, mas também na geração da eletricidade, na fabricação dos veículos, na produção, transporte e descarte da gasolina, na plantação de cana-de-açúcar e de alimento, e muito mais. Para tanto, vamos multiplicar a emissão na conversão do motor por um fator f_{em} . Este fator pode ser menor do que a unidade, nos casos em que parte do CO2 emitido será reabsorvida, como, por exemplo, na nova safra de cana.

$$\psi_{kg} = \frac{x(12 + 2 \times 16)}{12x + y + 16z} f_{em} \quad (1.81)$$

Nas equações 1.81-82, ψ_{kg} é a emissão específica (kg de CO2 por kg de combustível) e Ψ_{traj} a emissão total (kg do CO2) no trajeto.

$$\Psi_{traj} = m_{comb} \psi_{kg} \quad (1.82)$$

Como os trajetos são repetidos várias vezes por dia e vários dias por mês, podemos calcular a energia queimada mensal e a emissão mensal:

$$E_{mensal} = E_{traj, fonte} n_{traj} n_{dias} \quad (1.83)$$

Nestes cálculos, estamos considerando que o número de dias que o piloto trabalha (por exemplo, n_{dias} na Equação 1.79) é o mesmo número de dias que ele se desloca (n_{dias} nas Equações 1.83-84, por exemplo), o que não necessariamente é verdade.

$$\Psi_{mensal} = \Psi_{traj} n_{traj} n_{dias} \quad (1.84)$$

Para poder comparar casos com trajetos diferentes, é interessante calcular a emissão de CO2 por quilometro rodado, ψ_{km} :

$$\psi_{km} = \frac{\Psi_{traj}}{L_2} \quad (1.85)$$

A parte de custos é um pouco mais complicada, pois temos que somar gastos que ocorrem em tempos diferentes. Por exemplo, temos que comprar o veículo no começo do período estudado, depois pagar o combustível mensalmente, até que parte do investimento é retomado ao final do tempo considerado, com a venda do veículo usado.

O problema de comparar um valor de hoje com um valor no futuro é que o valor do dinheiro muda, mesmo sem levar em conta a inflação (vamos simplificar aqui). Por

exemplo, digamos que você precise pagar um valor de R\$ 10.000,00 daqui cinco meses. Quanto dinheiro você precisaria ter hoje? Bem, se a poupança pagasse 1% ao mês, você precisaria ter $R\$10.000,00/(1+0,01)^5 = R\$ 9.514,66$. Você colocaria esse dinheiro na poupança, e teria $R\$9.514,66(1+0,01) = R\$9.609,80$ depois de um mês, $R\$9.609,80(1+0,01) = R\$9.705,90$ no segundo, $R\$9.705,90 (1+0,01) = R\$9.802,96$ no terceiro, $R\$9.802,96(1+0,01) = R\$9.900,99$ no quarto, e, finalmente, $R\$9.900,99(1+0,01) = R\10.000 no quinto mês, que é quando você precisa pagar os tais R\$ 10.000,00. Portanto, R\$ 9.514,66 é o VALOR PRESENTE de um VALOR FUTURO de R\$ 10.000,00.

No caso de pagamentos mensais, você precisa pegar cada pagamento e trazer para o valor presente. Por exemplo, para pagar R\$ 100,00 por mês, nos próximos três meses, eu precisaria ter HOJE: $R\$100/(1+1,01) = R\$99,01$ para pagar o primeiro mês, $R\$100/(1+1,01)^2 = R\$98,03$ para fazer o segundo pagamento, e $R\$100/(1+1,01)^3 = R\$97,06$ para o último. Quer dizer, se eu tiver hoje R\$ 294,10, posso colocar na poupança e fazer três pagamentos de R\$ 100,00. Dizemos, então, que o R\$ 294,10 é o VALOR PRESENTE de uma série de três VALORES MENSAIS de R\$ 100,00.

Quando o valor mensal é constante, a conta acima vira uma PG (progressão geométrica), e então é possível calcular o número de meses corrigido, μ , pela Equação 1.86. Por exemplo, se a taxa de juros, j_{juros} , for de 1% (0,01) ao mês e você tiver que fazer 60, n_{meses} , pagamentos mensais, μ seria aproximadamente 45. Quer dizer, se você tiver hoje o valor para fazer 45 pagamentos, pode colocar isso na poupança e, com os juros recebidos, fazer os 60 pagamentos mensais.

Para quem estiver mais interessado sobre essa questão da mudança do valor do dinheiro, e também do preço dos equipamentos, com o tempo, recomendo dois livros: "Design of Thermal Systems" (STOECKER) e "Thermal Design and Optimization" (BEJAN, TSATSARONIS e MORAN), que usamos nas disciplinas "Projeto de Sistemas Térmicos" (grad) e "Otimização de Sistemas Térmicos" (pós).

$$\mu = \frac{(1 + j_{juros})^{n_{meses}} - 1}{j_{juros}(1 + j_{juros})^{n_{meses}}} \quad (1.86)$$

Nós poderíamos continuar com essa forma convencional de fazer comparações financeiras, mas chegaríamos a resultados distantes da nossa realidade. Por exemplo, poderíamos concluir que o VALOR PRESENTE do uso de uma bicicleta é de R\$ 13.610,00 e o de uma motocicleta é de R\$ 11.237,85, considerando aqui a aquisição do veículo no início, pagamento da gasolina ou alimento, prejuízo salarial com o tempo perdido no deslocamento e revenda ao final do estudo. Melhor trazer tudo isso para um VALOR MENSAL, que fica mais próximo da nossa experiência no dia a dia.

Para fazer essa comparação mensal, vamos utilizar a Equação 1.86 invertida, para, na Equação 1.87, poder calcular o VALOR MENSAL do valor de aquisição do veículo, VI . Por exemplo, o pagamento inicial de R\$ 10.000,00 em uma motocicleta corresponde a 60 valores mensais de R\$ 222,22 ($=R\$10.000,00/45$). Ou, então, a compra de uma bicicleta por R\$ 800,00 equivale a pagamentos mensais de R\$ 17,80.

$$V_{mensal,VI} = \frac{VI}{\mu} \quad (1.87)$$

O objetivo deste capítulo não é fazer nada sofisticado financeiramente, já que não estamos levando em conta a inflação, juros por empréstimos e variações nos valores das tarifas. O

importante aqui é que percebamos a importância de levar em conta tanto valores de aquisição dos veículos quanto de valores pagos durante a sua operação.

Como a revenda do veículo é feita no final do estudo, na Equação 1.88 nós transformamos primeiro o VALOR FUTURO em um VALOR PRESENTE, e depois esse em um VALOR MENSAL. Voltando ao exemplo da motocicleta, uma revenda por R\$ 6.000,00 daqui 60 meses corresponde a R\$ 3.302,70 hoje, o que corresponde a R\$ 73,47 mensais.

$$V_{mensal,VR} = \frac{VR}{\mu(1 + j_{juros})^{n_{meses}}} \quad (1.88)$$

Podemos facilmente calcular o valor mensal da operação pela Equação 1.89, e o valor mensal do tempo perdido pela Equação 1.90.

$$V_{mensal,oper} = K_{traj,fonte} n_{dias} n_{traj} \quad (1.89)$$

$$V_{mensal,tempo} = K_{traj,tempo} n_{dias} n_{traj} \quad (1.90)$$

Finalmente, o valor mensal para o uso de determinado veículo é dado pela Equação 1.91, que inclui o valor de compra, o valor de revenda, o valor pago pelo combustível e o valor do tempo perdido com o deslocamento.

$$V_{mensal} = V_{mensal,VI} - V_{mensal,VR} + V_{mensal,oper} + V_{mensal,tempo} \quad (1.91)$$

Para facilitar as comparações com outros deslocamentos, é interessante calcular o custo por trajeto, κ_{traj} , e o custo por km, κ_{km} .

$$\kappa_{traj} = \frac{V_{mensal}}{n_{dias} n_{traj}} \quad (1.92)$$

$$\kappa_{km} = \frac{V_{mensal}}{n_{dias} n_{traj} L_2} \quad (1.93)$$

Importante salientar que, embora estejamos chamando as variáveis de “mensais”, ou “por trajeto”, ou “por quilometro”, estamos levando em conta o investimento inicial feito na aquisição do veículo.

Todas as equações apresentadas nesta seção foram implementadas na planilha eletrônica V1C1P2Ab01. A Figura 1.26 apresenta os dados e os resultados para uma motocicleta rodando a 60 km/h, 12 km por dia ($L_2=6000$ m, $n_{traj}=2$), em uma elevação de 2 metros a cada 100 m rodados ($I=0,02$ m/m).

DADOS		
V_{ini}	60	km/h
V_{cruz}	60	km/h
m_{pil}	80	kg
m_{veic}	150	kg
k_a	0,4	kg/m
C_R	0,03	
n_{acel}	20	
L_2	6000	m
I_2	0,02	m/m
η	0,22	
η_{transm}	0,85	
PC	43000000	J/kg
ρ_{comb}	0,745	kg/litro
K_{litro}	3,5	R\$/litro
x	8	
y	18	
z	0	
VI	10000	R\$
VR	6000	R\$
j_{juros}	0,01	(mensal)
n_{meses}	60	meses
S	1500,0	R\$/mês
n_{dias}	21	dias
n_{horas}	8	horas
n_{traj}	2	trajetos por dia
f_{tax}	1,3	
f_{em}	1,05	
g	9,816	m/s ²

RESULTADOS POR TRAJETO		
V_{cruz}	16,7	m/s
m	230	kg
F_{aer}	111,1	N
F_{rol}	67,7	N
F_{grav}	45,2	N
F_{res}	224,0	N
P	3733,3	W
P	5,1	CV
Δt_{traj}	360,0	s
$E_{traj,mec}$	1343970,7	J
$E_{traj,fonte}$	7187008,9	J
$m_{traj,comb}$	0,167	kg
$\Delta_{traj,comb}$	0,224	litros
A_{asp}	26,744	km/litro
$K_{traj,tempo}$	0,893	R\$
$K_{traj,fonte}$	1,021	R\$
ψ_{kg}	3,242	kgCO2/kgCOMB
ψ_{traj}	0,542	kgCO2

RESULTADOS POR MÊS		
E_{mensal}	301854374	J
ψ_{mensal}	22,8	kgCO2
ψ_{traj}	0,542	kgCO2/trajeto
ψ_{km}	0,090	kgCO2/km
μ	45,0	meses corrigidos
$V_{mensal,VI}$	222,44	R\$ (mensal)
$V_{mensal,VR}$	73,47	R\$ (mensal)
$V_{mensal,oper}$	42,87	R\$ (mensal)
$V_{mensal,tempo}$	37,50	R\$ (mensal)
V_{mensal}	229,35	R\$ (mensal)
K_{traj}	5,46	R\$/trajeto
K_{km}	0,91	R\$/km

Figura 1.26 - Planilha de gastos com uma motocicleta em velocidade contante (ModVEIC_01, planilha V1C1P2Ab01).

Analisando a tabela superior à direita (resultados por trajeto), podemos ver a distribuição das forças resistivas, o que nos diz para onde está indo a energia do combustível: 49,6% (111,1/224,0) para vencer o arrasto aerodinâmico, 30,2 % (67,7/224,0) para resistência à rolagem, e 20,2% (45,2/224,0) para a resistência gravitacional. A potência mecânica na roda é de 5,1 CV (3733,3 W). A moto leva 360 segundos para cada trajeto de 6 km. O consumo de combustível em cada trajeto é de 7,2 MJ, ou 0,17 kg, ou 0,22 litros de gasolina, o que corresponde a uma autonomia específica de 26,7 km/litro. Considerando apenas a operação, o piloto gasta R\$ 1,02 de gasolina e deixa de receber R\$ 0,89 por não estar trabalhando. A emissão de CO2 no trajeto é de 0,54 kg.

Na tabela inferior à direita (resultados por mês), vemos que essa moto emite 22,8 kgCO2, o que corresponde a 0,54 kg por trajeto (o que já tínhamos visto na tabela superior) ou 0,09 kg por quilometro rodado. Trazendo todos os valores para VALORES MENSAIS, vemos que a aquisição da moto corresponde a R\$ 222, a revenda permitirá o retorno de R\$ 73 (também transformado em VALOR MENSAL), o piloto gasta R\$ 43 com combustível e deixa de receber R\$ 37 por estar em trânsito. Somando tudo, a escolha da motocicleta como modal de transporte, nesse caso, corresponde a um valor mensal de R\$229,00, ou R\$ 5,46 por trajeto, ou R\$ 0,91 por quilometro.

Interessante que esses R\$ 5,46 podem ser comparados com o uso de um ônibus, que, para o usuário, não tem valor de aquisição ou revenda. Por exemplo, digamos que cada trajeto (6 km) de ônibus leve 18 minutos (20 km/h) e que a tarifa seja de R\$ 2,50. Neste caso, o valor do tempo perdido, $K_{traj,tempo}$, é de R\$ 2,68 por trajeto. Logo, o uso do ônibus apresenta um custo de R\$ 5,17, menor, portanto, que o custo da motocicleta, que é de R\$ 5,46 por trajeto. Claro que temos que lembrar que a moto representa um alto risco de acidentes e que não protege dos elementos, mas que por outro lado é um veículo que pode ser usado para lazer nos finais de semana. Já no caso do ônibus, não estamos considerando o tempo esperando na parada, nem o calor e a superlotação, que podem ser consideráveis.

1.11 - Gasto Energético no Deslocamento de um Veículo de MCI Considerando a Aceleração (ModVEIC_02)

Um dos maiores gastos energéticos no tráfego urbano está nas acelerações, que ocorrem, por exemplo, nas relargadas depois de cada parada no semáforo. O modelo da seção anterior não levava esse efeito em conta, já que considerava a velocidade constante. Para calcular o consumo energético em um movimento real, com velocidade variável, é necessário integrar a Equação 1.7, o que foge do escopo deste capítulo. Voltaremos a esse modelo mais completo no Capítulo 3, inclusive considerando um modelo realista para o motor, com mudança de marchas e outros fenômenos.

Mas, para não deixarmos de considerar a inércia no consumo de combustível, vou propor um modelo simplificado, descrito pela Equação 1.94. Nela, nós somamos a energia gasta durante o cruzeiro (o primeiro termo, como calculado pela Equação 1.75) com a energia necessária para acelerar o veículo de V_{ini} a V_{cruz} um determinado número de vezes (n_{acel}) durante o trajeto. Esse modelo tem duas grandes limitações. A primeira é que superestima a força de resistência aerodinâmica, uma vez que considera (Equações 1.3 e 1.72) que a velocidade sempre é a de cruzeiro, V_{cruz} , o que não é verdade, já que no início do trajeto, durante a aceleração, a velocidade é menor. A segunda limitação é que não nos preocupamos em saber se a potência requerida para tal aceleração é possível, seja por limitação da potência do motor, por perda de atrito nas rodas ou então porque a moto empinaria com tal mudança de velocidade.

$$E_{traj,mec} = P\Delta t + \frac{1}{2}n_{acel}m(V_{cruz}^2 - V_{ini}^2) \quad (1.94)$$

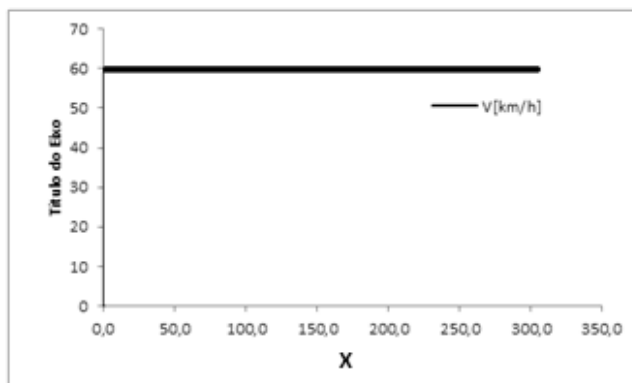


Figura 1.27 - Evolução da velocidade no ModVEIC_01 (velocidade constante)

As Figuras 1.27-28 mostram a diferença entre os dois modelos. No ModVEIC_01 a velocidade é constante durante todo o trajeto, enquanto no ModVEIC_02 há uma aceleração instantânea no início, seguida de um percurso em velocidade de cruzeiro.

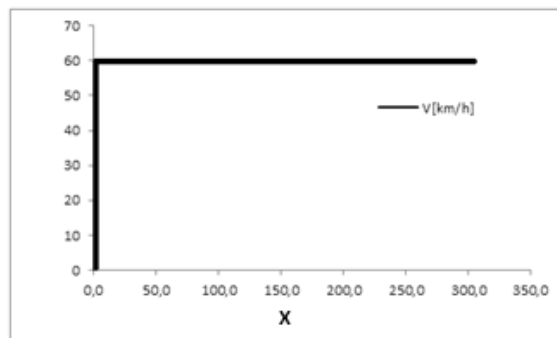


Figura 1.28 - Evolução da velocidade no ModVEIC_02 (aceleração instantânea na largada)

A Figura 1.29 apresenta os resultados para esse segundo modelo. Ao compará-la com a Figura 1.26 (modelo sem aceleração), vemos que a única diferença nos dados é V_{ini} . Nessa tabela, a potência mecânica que aparece nos resultados do modelo (5,1 CV) corresponde apenas à necessária para manter a moto em cruzeiro a 60 km/h, não para acelerar a moto, uma vez que o efeito da inércia aparece apenas no cálculo de $E_{traj,mec}$ (Equação 1.94). Vemos que, se a moto acelerar apenas uma vez ($n_{acel}=1$) de 0 a 60 km/h (V_{ini} a V_{cruz}) no trajeto de 6000 m, o aumento do consumo energético ($E_{traj,fonte}$) seria de 2% (de 7,19 MJ para 7,36 MJ por trajeto), reduzindo muito pouco a autonomia específica, de 26,7 para 26,1 km/l.

DADOS		
V_{ini}	0	km/h
V_{cruz}	60	km/h
m_{pil}	80	kg
m_{veic}	150	kg
k_a	0,4	kg/m
C_R	0,03	
n_{acel}	1	
L_2	6000	m
I	0,02	m/m
η	0,22	
η_{transm}	0,85	
PC	43000000	J/kg
ρ_{comb}	0,745	kg/litro
κ_{litro}	3,5	RS/litro
x	8	
y	18	
z	0	
VI	10000	RS
VR	6000	RS
J_{juros}	0,01	(mensal)
n_{meses}	60	meses
S	1500,0	RS/mês
n_{dias}	21	dias
n_{horas}	8	horas
n_{traj}	2	trajetos por dia
f_{ax}	1,3	
f_{em}	1,05	
g	9,816	m/s ²

RESULTADOS POR TRAJETO		
V_{cruz}	16,7	m/s
m	230	kg
F_{aer}	111,1	N
F_{rol}	67,7	N
F_{grav}	45,2	N
F_{res}	224,0	N
P	3733,3	W
P	5,1	CV
Δt_{traj}	360,0	s
$E_{traj,mec}$	1375915,1	J
$E_{traj,fonte}$	7357834,8	J
$m_{traj,comb}$	0,171	kg
$\Delta_{traj,comb}$	0,230	litros
A_{esp}	26,123	km/litro
$K_{traj,tempo}$	0,893	RS
$K_{traj,fonte}$	1,045	RS
ψ_{kg}	3,242	kgCO2/kgCOMB
ψ_{traj}	0,555	kgCO2

RESULTADOS POR MÊS		
E_{mensal}	309029062	J
ψ_{mensal}	23,3	kgCO2
ψ_{traj}	0,555	kgCO2/trajeto
ϵ_{km}	0,092	kgCO2/km
μ	45,0	meses corrigidos
$V_{mensal,VI}$	222,44	RS (mensal)
$V_{mensal,VR}$	73,47	RS (mensal)
$V_{mensal,oper}$	43,89	RS (mensal)
$V_{mensal,tempo}$	37,50	RS (mensal)
V_{mensal}	230,37	RS (mensal)
K_{traj}	5,48	RS/trajeto
K_{km}	0,91	RS/km

Figura 1.29 – Planilha de gastos com uma motocicleta em velocidade constante, considerando uma aceleração por trajeto. (ModVEIC_01, planilha V1C1P2Ab01).

DADOS		
V_{ini}	0	km/h
V_{cruz}	60	km/h
m_{pil}	80	kg
m_{veic}	150	kg
k_a	0,4	kg/m
C_R	0,03	
n_{acel}	20	
L_2	6000	m
I	0,02	m/m
η	0,22	
η_{transm}	0,85	
PC	43000000	J/kg
ρ_{comb}	0,745	kg/litro
κ_{litro}	3,5	RS/litro
x	8	
y	18	
z	0	
VI	10000	RS
VR	6000	RS
J_{juros}	0,01	(mensal)
n_{meses}	60	meses
S	1500,0	RS/mês
n_{dias}	21	dias
n_{horas}	8	horas
n_{traj}	2	trajetos por dia
f_{ax}	1,3	
f_{em}	1,05	
g	9,816	m/s ²

RESULTADOS POR TRAJETO		
V_{cruz}	16,7	m/s
m	230	kg
F_{aer}	111,1	N
F_{rol}	67,7	N
F_{grav}	45,2	N
F_{res}	224,0	N
P	3733,3	W
P	5,1	CV
Δt_{traj}	360,0	s
$E_{traj,mec}$	1982859,6	J
$E_{traj,fonte}$	10603527,0	J
$m_{traj,comb}$	0,247	kg
$\Delta_{traj,comb}$	0,331	litros
A_{esp}	18,127	km/litro
$K_{traj,tempo}$	0,893	RS
$K_{traj,fonte}$	1,506	RS
ψ_{kg}	3,242	kgCO2/kgCOMB
ψ_{traj}	0,799	kgCO2

RESULTADOS POR MÊS		
E_{mensal}	445348135	J
ψ_{mensal}	33,6	kgCO2
ψ_{traj}	0,799	kgCO2/trajeto
ϵ_{km}	0,133	kgCO2/km
μ	45,0	meses corrigidos
$V_{mensal,VI}$	222,44	RS (mensal)
$V_{mensal,VR}$	73,47	RS (mensal)
$V_{mensal,oper}$	63,25	RS (mensal)
$V_{mensal,tempo}$	37,50	RS (mensal)
V_{mensal}	249,73	RS (mensal)
K_{traj}	5,95	RS/trajeto
K_{km}	0,99	RS/km

Figura 1.30 – Planilha de gastos com uma motocicleta considerando 20 acelerações instantâneas por trajeto. (ModVEIC_02, planilha V1C1P2Ab01).

Na Figura 1.30 apresentamos os resultados para o caso em que a moto faz uma aceleração a cada 300m ($n_{acel}=20$). Nesse caso, o consumo energético aumenta em 47% (de 7,19 MJ

para 10,6 MJ)), fazendo com que a autonomia específica caia para 18,1 km/l. A Figura 1.31 apresenta essas comparações em forma de tabela.

Modelo	L [m]	n _{rep}	L1 [m]	L2 [m]	Δ [litros]	Δt [s]	A _{esp} [km/litro]	V _{med} [km/h]
Sem aceleração	6000	1	---	6000	0,224	360	26,79	60,0
Aceleração instantânea	6000	1	---	6000	0,230	360	26,09	60,0
	6000	20	---	300	0,331	360	18,13	60,0

Figura 1.31 - Comparação entre os modelos ModVEIC_01 e ModVEIC_02

1.12 - Comparação com um Modelo mais Realista (ModVEIC_03)

Como já dito várias vezes, no Capítulo 3 iremos estudar um modelo dinâmico mais detalhista, que integra a Equação 1.7 levando em conta a variação de velocidade ao longo de percurso e as características reais do motor. Vou adiantar um pouco os resultados desse modelo ModVEIC_03 para avaliar os erros que estamos cometendo com os modelos dinâmicos deste capítulo. Para facilitar a comparação com os casos estudados aqui, usei uma versão simplificada do ModVEIC_03 considerando um motor com rendimento constante.

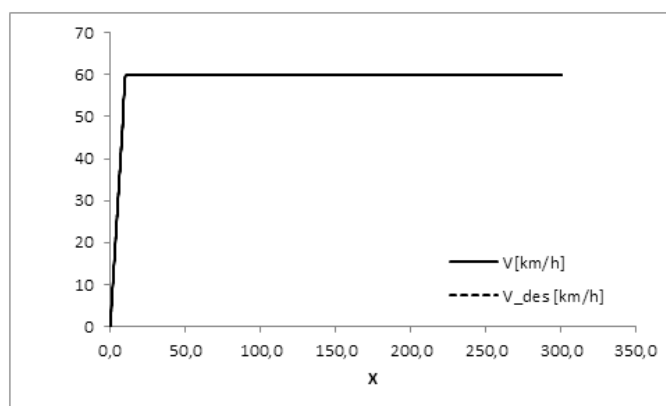


Figura 1.32 - Evolução da velocidade no ModVEIC_03 (aceleração gradual em 10m, potência ilimitada)

Para tanto, vamos simular três casos com o modelo completo ModVEIC_03. No primeiro, mostrado na Figura 1.32, a aceleração de 0 a 60 km/h é extremamente rápida (0,9 segundos), em 10 metros apenas. Nesse estudo inicial, consideramos que a moto sempre tem a potência máxima necessária para essa aceleração (165 CV!), e que não empina, e que não perde a tração.

No segundo estudo, mostrado na Figura 1.33, a moto acelera de 0 a 60 km/h em 100 metros, ainda sem qualquer preocupação se isso é possível para aquela moto específica (necessitaria de uma potência máxima de 23 CV), levando 9 segundos para atingir a velocidade de cruzeiro desejada.

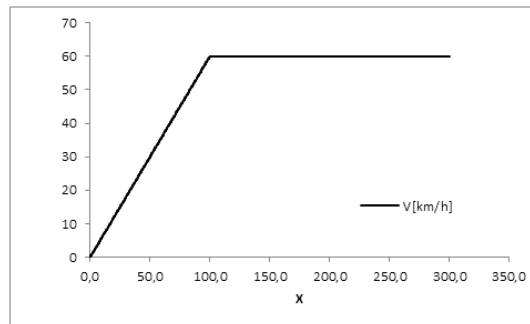


Figura 1.33 – Evolução da velocidade no ModVEIC_03 (aceleração gradual em 100m, potência ilimitada)

O último estudo leva em conta que a potência da moto é limitada a 14,2 CV. Vemos, na figura 1.34, que, mesmo que o piloto desejasse acelerar de 0 a 60 km/h em 10 metros, com essa potência máxima a aceleração levaria 65 metros, em 7,5 segundos.

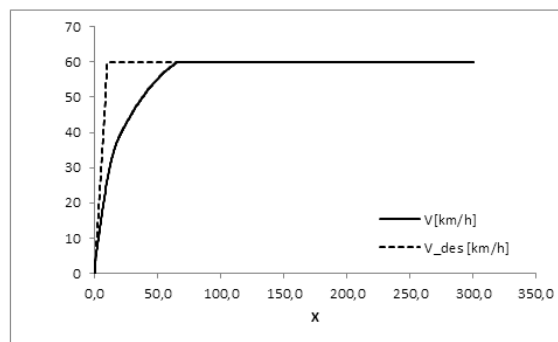


Figura 1.34 – Evolução da velocidade em um modelo realista (aceleração desejada em 10m, potência limitada)

A Figura 1.35 mostra uma compilação dos resultados dos vários modelos, com a qual podemos avaliar os erros cometidos ao considerar a aceleração instantânea (ModVEIC_02). Na tabela, L é o trajeto completo (sempre 6.000m), que será dividido em n_{acel} repetições. Cada repetição tem comprimento L_2 , e a distância usada para a aceleração em cada repetição é L_1 .

Em primeiro lugar, vemos que, para uma única aceleração no trajeto (linhas 1, 2, 4 e 5 da Figura 1.35), o erro é relativamente pequeno, tanto no consumo de combustível (variação de 0,224 a 0,228 litros por trajeto: 2%) quanto no tempo de deslocamento (variação de 360 a 371 segundos por trajeto: 3%). Isso porque a moto passa a maior parte do tempo em cruzeiro. Mesmo para várias repetições (linhas 3, 6, 7 e 8), o consumo de combustível também é da mesma ordem (0,306 a 0,331 litros: 10%).

O problema no ModVEIC_03 (aceleração instantânea), é que ele subestima o tempo da viagem, principalmente quando a moto passa boa parte do trajeto acelerando ($n_{acel} \times L_1$). Se a moto levar 100m a cada 300m acelerando, o tempo total de viagem será de 933 segundos, e não de 360 segundos, um erro de 159%. Tentando ser mais realista, usando como referência a aceleração com potência limitada (última linha), vemos que o erro no tempo de deslocamento é de 20%. Essa diferença tem impacto no cálculo do tempo perdido no caso de acelerações muito lentas.

Modelo	L [m]	nacel	L1 [m]	L2 [m]	Δ [litros]	Δt [s]	Aasp [km/litro]	Vmed [km/h]
Sem aceleração	6000	1	---	6000	0,224	360	26,79	60,0
Aceleração instantânea	6000	1	---	6000	0,230	360	26,09	60,0
	6000	20	---	300	0,331	360	18,13	60,0
Aceleração gradual (pot. ilim.)	6000	1	10	6000	0,227	361	26,43	59,8
	6000	1	100	6000	0,228	371	26,32	58,2
	6000	20	10	300	0,325	390	18,45	55,4
	6000	20	100	300	0,306	933	19,63	23,2
Aceleração gradual (pot. lim.)	6000	20	10	300	0,320	429	18,75	50,3

Figura 1.35 – Comparação entre os modelos ModVEIC_01 (velocidade de cruzeiro), ModVEIC_02 (aceleração instantânea) e ModVEIC_03 (aceleração gradual).

Espero que fique claro porque estamos usando um modelo mais simples (ModVEIC_02) quando temos à disposição um mais completo (ModVEIC_03). Primeiro, porque este material tem finalidade didática e, portanto, é interessante ir progredindo aos poucos, cada vez tornando o modelo mais realista. Ainda mais que, caso o veículo atinja logo a velocidade de cruzeiro (o que é comum na pilotagem de motos e bicicletas), o erro é pequeno. Mas, principalmente, é interessante usar modelos mais simples porque eles trazem a essência dos fenômenos. É a partir desses modelos simples que podemos conseguir o verdadeiro conhecimento. Como veremos no Capítulo 3, os resultados do modelo mais detalhado são complexos, envolvendo tudo o que acontece no motor e no veículo, que variam de comportamento ponto a ponto na trajetória. Embora naquele caso o valor integral do consumo ou do tempo sejam mais precisos que os calculados por este modelo mais simples, é quase impossível compreender a causa de certos comportamentos, com tantas variáveis envolvidas. Por isso, é bom ter os dois tipos de modelos, os mais simples com a essência, que trazem o verdadeiro conhecimento (por exemplo, se a inércia ou o arrasto aerodinâmico tem ou não impacto no consumo mensal), e os modelos mais detalhados com a precisão (*e.g.*, que impacto mensal é esse) que nos trazem os valores corretos para tomar as decisões.

1.13 – Estudo de Casos: Comparação entre Vários Veículos

Como última seção técnica deste capítulo, vamos agora comparar vários veículos usando o modelo ModVEIC_02 (aceleração instantânea), que, embora traga alguns erros para trechos muito longos de reacelerações, permite o cálculo das métricas sem a necessidade de integrar a Equação 1.7 (já falei que faremos isso no Capítulo 3?).

DADOS		
V_{ini}	0	km/h
V_{cruz}	60	km/h
m_{pil}	80	kg
m_{moto}	150	kg
k_a	0,4	kg/m
C_R	0,03	
n_{acel}	20	
L_2	6000	m
L^2	0,02	m/m
η	0,23	
η_{transm}	0,85	
PC	28000000	J/kg
ρ_{comb}	0,785	kg/litro
K_{litro}	2,5	R\$/litro
x	2	
y	6	
z	1	
VI	10000	R\$
VR	6000	R\$
j_{juros}	0,01	(mensal)
n_{meses}	60	meses
S	1500	R\$/mês
n_{dias}	21	dias
n_{horas}	8	horas
n_{traj}	2	trajetos por dia
f_{tax}	1,3	
f_{tm}	0,9	
g	9,816	m/s ²

RESULTADOS POR TRAJETO		
V_{cruz}	16,7	m/s
F_m	230	kg
F_{dep}	111,1	N
F_{pol}	67,7	N
F_{grav}	45,2	N
F_{rps}	224,0	N
P	3733,3	W
P	5,1	CV
Δt_{traj}	360,0	s
$E_{traj,mec}$	1982859,6	J
$E_{traj,fonte}$	10142504,1	J
$m_{traj,comb}$	0,362	kg
$\Delta_{traj,comb}$	0,461	litros
A_{asp}	13,003	km/litro
$K_{traj,tempo}$	0,893	R\$
$K_{traj,fonte}$	1,500	R\$
ψ_{kg}	1,722	kgCO2/kgCOMB
ψ_{traj}	0,624	kgCO2

RESULTADOS POR MÊS		
E_{mensal}	425985173	J
ψ_{mensal}	26,2	kgCO2
ψ_{traj}	0,624	kgCO2/trajeto
ψ_{km}	0,104	kgCO2/km
μ	45,0	meses corrigidos
$V_{mensal,VI}$	222,44	R\$ (mensal)
$V_{mensal,VR}$	73,47	R\$ (mensal)
$V_{mensal,oper}$	62,99	R\$ (mensal)
$V_{mensal,tempo}$	37,50	R\$ (mensal)
V_{mensal}	249,46	R\$ (mensal)
K_{traj}	5,94	R\$/trajeto
K_{km}	0,99	R\$/km

Figura 1.35 – Planilha de gastos com uma motocicleta a álcool considerando 20 acelerações instantâneas por trajeto. (ModVEIC_02, planilha V1C1P2Ab02).

A Figura 1.35 traz os resultados para uma motocicleta igual à usada na Figura 1.30, mas agora a álcool. Como as motos são as mesmas, mudando apenas o motor, valem as mesmas conclusões que havíamos chegado nas Seções 1.4, 1.5 e 1.7, ou seja, que para os dados utilizados, a moto a álcool tem menor consumo energético, maior consumo volumétrico, emite menos CO₂ e tem o mesmo custo por quilometro rodado (para as tarifas usadas neste exemplo).

Passamos agora a estudar um veículo elétrico. Assim como na Seção 1.4, é necessário modificar algumas equações. Não porque a dinâmica em linha reta dessas máquinas seja diferente, mas porque os dados em geral são fornecidos em outras formas. Lembrando que compramos a gasolina por litro e pagamos a conta de luz por kWh. As Equações 1.95-100 devem substituir as equivalentes utilizadas na modelagem do veículo com MCI.

$$m_{traj,comb,equiv} = \frac{E_{traj,fonte}}{PC_{equiv}} \quad (1.95)$$

$$\Delta_{traj,comb,equiv} = \frac{m_{traj,comb,equiv}}{\rho_{comb,equiv}} \quad (1.96)$$

$$A_{esp} = \frac{L_2}{\Delta_{traj,equiv,comb}} \quad (1.97)$$

$$K_{traj,fonte} = E_{traj,fonte} \kappa_J f_{tax} \quad (1.98)$$

$$\psi_J = f_{em} \quad (1.99)$$

$$\Psi_{traj} = E_{traj,fonte} \psi_J \quad (1.100)$$

Agora vamos aplicar essas equações a um ciclomotor elétrico (dados e resultados na Figura 1.36). As grandes diferenças entre este ciclomotor e a motocicleta são menor peso e velocidade de cruzeiro, e valor inicial mais alto. Esses dois últimos fatores tem um grande impacto financeiro, fazendo com que esse veículo seja mais caro por quilometro do que a motocicleta convencional. No entanto, a emissão de CO₂ é bem menor. Lembro que esse resultado não deve ser usado para dizer que ciclomotores elétricos são mais caros por quilometro, pois a escolha das métricas foi relativamente arbitrária e os dados são meramente qualitativos.

DADOS		
V_{ini}	0	km/h
V_{cruz}	40	km/h
m_{pil}	80	kg
m_{veic}	100	kg
k_a	0,3	kg/m
C_R	0,02	
n_{acel}	20	
L_2	6000	m
l	0,02	m/m
η	0,7	
η_{transm}	0,95	
K_j	0,6	RS/kWh
PC_{equiv}	43000000	J/kg
$\rho_{comb,equiv}$	0,745	kg/litro
VI	20000	RS
VR	10000	RS
j_{juros}	0,01	(mensal)
n_{meses}	60	meses
S	1500	RS/mês
n_{dias}	21	dias
n_{horas}	8	horas
n_{traj}	2	trajetos por dia
f_{tax}	1,3	
f_{em}	0,3	kgCO2/kWh
g	9,816	m/s ²

RESULTADOS POR TRAJETO		
Vcruz	V_{cruz}	m/s
m_{tot}	m	kg
Fa	F_{aer}	N
Fr	F_{rol}	N
Fg	F_{grav}	N
Fres	F_{res}	N
P	P	W
P	P	CV
Dt	Δt_{traj}	s
Emec	$E_{traj, mec}$	J
Ecomb	$E_{traj, fonte}$	kWh
m_{comb}	$m_{traj, comb, equiv}$	kg eq
V_{comb}	$\Delta_{traj, comb, equiv}$	litros eq
AutEsp	A_{esp}	km/litro eq
KAPPA_tempo	$K_{traj, tempo}$	RS
KAPPA_fonte	$K_{traj, fonte}$	RS
psi_j	ψ_j	kgCO2/kWh
PSI	ψ_{traj}	kgCO2

RESULTADOS POR MÊS		
E_{mensal}	15,2	kWh
ψ_{mensal}	4,6	kgCO2
ψ_{traj}	0,109	kgCO2/trajeto
ϵ_{km}	0,018	kgCO2/km
μ	45,0	meses corrigidos
$V_{mensal, VI}$	444,89	RS (mensal)
$V_{mensal, VR}$	122,44	RS (mensal)
$V_{mensal, oper}$	11,88	RS (mensal)
$V_{mensal, tempo}$	56,25	RS (mensal)
V_{mensal}	390,58	RS (mensal)
K_{traj}	9,30	RS/trajeto
K_{km}	1,55	RS/km

Figura 1.36 - Planilha de gastos com um ciclomotor elétrico considerando 20 acelerações instantâneas por trajeto. (ModVEIC_02, planilha V1C1P2Ab03).

Algumas equações também precisam ser modificadas para o caso das bicicletas, já que os dados são fornecidos em outra forma. As Equações 1.101-103, no caso das bicicletas, devem substituir as Equações 1.80-82 que haviam sido usadas no caso do veículo movido por MCI.

$$K_{traj, fonte} = \frac{E_{traj, fonte}}{PC} \kappa_{kg} f_{tax} \tag{1.101}$$

$$\psi_{kg} = f_{em} \tag{1.102}$$

$$\psi_{traj} = \frac{E_{traj, fonte}}{PC} \psi_{kg} \tag{1.103}$$

Na Figura 1.37 podemos ver os dados e os resultados da bicicleta. Valores que se destacam são a menor velocidade e potência quando comparados com a motocicleta. O alto valor mensal da bicicleta é causado pelo preço do alimento e pelo custo do tempo perdido. Mais uma vez, é importante notar que, em alguns casos, poderíamos considerar que esse alimento seria queimado de qualquer forma em uma academia, e que essa pessoa não precisaria de exercício adicional à bicicleta. Essa é uma forma de analisar os ciclistas de classe média, mas talvez o apresentado aqui seja mais adequado à grande maioria de ciclistas trabalhadores. Outro detalhe é que não estamos levando em conta o gasto com água no caso da bicicleta, que pode ser relativamente alto. Pontos importantes para pensar caso a caso quando vocês forem usar este modelo.

DADOS		
V_{ini}	0	km/h
V_{cruz}	18	km/h
m_{pil}	80	kg
m_{veic}	20	kg
k_a	0,45	kg/m
C_R	0,02	
n_{acel}	20	
L_2	6000	m
I	0,02	m/m
η	0,22	
η_{transm}	0,93	
PC	2000000	cal/kg
κ_{kg}	20	RS/kg
PC_{equiv}	43000000	J/kg
$\rho_{comb,equiv}$	0,745	kg/litro
VI	800	RS
VR	100	RS
J_{juros}	0,01	(mensal)
n_{meses}	60	meses
S	1500	RS/mês
n_{dias}	21	dias
n_{horas}	8	horas
n_{traj}	2	trajetos por dia
f_{tax}	1	
f_{em}	0,75	kgCO2/kg
g	9,816	m/s ²

RESULTADOS POR TRAJETO		
V_{cruz}	5,0	m/s
m	100	kg
F_{aer}	11,3	N
F_{rol}	19,6	N
F_{grav}	19,6	N
F_{ras}	50,5	N
P	252,6	W
p	0,3	CV
Δt_{traj}	1200,0	s
$E_{traj,mec}$	328084,0	J
$E_{traj,fonte}$	383,1	kcal
$m_{traj,comb,equiv}$	0,037	kg eq
$\Delta_{traj,comb,equiv}$	0,050	litros eq
A_{esp}	119,866	km/litro eq
$K_{traj,tempo}$	2,976	RS
$K_{traj,fonte}$	3,831	RS
ψ_{kg}	0,75	kgCO2/kgcomida
ψ_{traj}	0,144	kgCO2

RESULTADOS POR MÊS		
E_{mensal}	16089	kcal
ψ_{mensal}	6,0	kgCO2
ψ_{traj}	0,144	kgCO2/trajeto
ψ_{km}	0,024	kgCO2/km
μ	45,0	meses corrigidos
$V_{mensal,VI}$	17,80	RS (mensal)
$V_{mensal,VR}$	1,22	RS (mensal)
$V_{mensal,oper}$	160,89	RS (mensal)
$V_{mensal,tempo}$	125,00	RS (mensal)
V_{mensal}	302,46	RS (mensal)
K_{traj}	7,20	RS/trajeto
K_{km}	1,20	RS/km

Figura 1.37 – Planilha de gastos com uma bicicleta considerando 20 acelerações instantâneas por trajeto. (ModVEIC_02, planilha V1C1P2Ab04).

A Figura 1.38 mostra um resumo das Figuras 1.30 (moto a gasolina), 1.35 (moto a álcool), 1.36 (ciclomotor elétrico) e 1.37 (bicicleta). Na tabela superior direita aparecem os dados comuns, como massa do piloto, salário, trajeto e inclinação da pista.

Os resultados comparativos são extremamente sensíveis a estes valores. Por exemplo, se diminuirmos o trajeto diário, o custo de aquisição dos equipamentos passa a ter uma maior importância, favorecendo assim a bicicleta. No Capítulo 2 faremos uma série de estudos paramétricos mostrando esse tipo de relação entre dados e resultados.

A tabela à esquerda mostra os dados que são diferentes para cada veículo, como velocidade de cruzeiro, tarifa de combustível, valor de aquisição, emissão específica e outros. Finalmente, na tabela inferior direita, vemos uma comparação entre os resultados. O ciclomotor elétrico é o que consome menos energia e, ao lado da bicicleta, que emite menos CO2. Quanto ao gasto com a fonte de energia, o ciclomotor é o mais econômico, enquanto a bicicleta é a mais cara (o alimento é muito caro!). A grande vantagem da motocicleta é a velocidade, que diminui bastante o custo do tempo perdido.

DADOS				
	Moto (gas)	Moto (alc)	Ciclo (elet)	Bicicleta
V_{cruz} km/h	60	60	40	18
m_{veic} kg	150	150	100	20
k_a kg/m	0,4	0,4	0,3	0,45
C_R	0,03	0,03	0,02	0,02
η	0,22	0,23	0,7	0,22
η_{transm}	0,85	0,85	0,95	0,93
PC (1)	43000000	28000000		2000000
ρ_{comb} kg/litro (2)	0,745	0,785		
κ	3,5	2,5	0,6	20
x	8	2		
y	18	6		
z	0	1		
VI	10000	10000	20000	800
VR	6000	6000	10000	100
f_{tax} (3)	1,3	1,3	1,3	1,0
f_{em} (3)	1,05	0,9	0,3	0,75

DADOS COMUNS		
V_{ini}	0	km/h
m_{pil}	80	kg
n_{acel}	20	
L_2	10000	m
I	0,02	m/m
J_{juros}	0,01	(mensal)
n_{meses}	60	meses
S	1500,0	RS/mês
n_{dias}	21	dias
n_{horas}	8	horas
n_{traj}	2	trajetos por dia
g	9,816	m/s ²

RESULTADOS					
	Moto (gas)	Moto (alc)	Ciclo (elet)	Bicicleta	
$E_{traj,fonte}$	Mj/trajeto	10,6	10,1	1,3	1,6
A_{esp}	km/litro (4)	18,1	13,0	147,2	119,9
ψ_{mensal}	kgCO2	34	26	5	6
$V_{mensal,oper}$	RS (mensal)	63	63	12	161
$V_{mensal,tempo}$	RS (mensal)	38	38	56	125
$V_{mensal,VI} = V_{mensal,VR}$	RS (mensal)	149	149	322	17
V_{mensal}	RS (mensal)	250	249	391	302
$K_{traj,fonte}$	RS/trajeto	1,51	1,50	0,28	3,83
$K_{traj,tempo}$	RS/trajeto	0,89	0,89	1,34	2,98
K_{traj}	RS/trajeto	5,95	5,94	9,30	7,20
K_{km}	RS/km	0,99	0,99	1,55	1,20

(1) Gasolina e álcool (J/kg), comida (cal/kg)
 (2) Gasolina e álcool (RS/litro), eletricidade (RS/kWh), comida (RS/kg)
 (3) Gasolina e álcool (fator mult.), eletricidade e comida (próprio fator)
 (4) Ciclo (elet) e bicicleta usam a gasolina como combustível equivalente

Figura 1.38 – Comparação entre motocicleta a gasolina, motocicleta a álcool, ciclomotor elétrico e bicicleta, considerando 20 acelerações instantâneas. (ModVEIC_01, planilha V1C1P2Ab05).

1.14 - Conclusão

Este capítulo teve três objetivos. Primeiro, o de apresentar exemplos para os estudantes de Termodinâmica treinarem seus conhecimentos. Segundo, demonstrar como a Termodinâmica pode nos ajudar a compreender o consumo energético em um veículo de transporte e, desta forma, saber onde devemos agir: diminuição da massa, redução da velocidade, melhoria aerodinâmica, troca de fonte energética e outras possíveis ações. Terceiro, demonstrar a importância das métricas na análise dos veículos. Quero dizer, do ponto de vista da eficiência energética, o ciclomotor pode ser melhor, mas pelo custo de aquisição a melhor opção é a bicicleta, enquanto pelo custo total por quilometro é melhor usar uma motocicleta, e para emitir menos CO₂ novamente devemos escolher o elétrico. Ou seja, dependendo da métrica, um ou outro veículo é o melhor.

Como o objetivo era despertar as discussões e treinar o uso de uma teoria geral, preferimos usar modelos simples para o motor e para o veículo, além de limitarmos os estudos realizados. Os próximos capítulos compensarão essa escolha. No Capítulo 2 continuaremos usando estes modelos simples, mas com um extenso estudo paramétrico e o uso de técnicas de otimização para determinar em que situações um veículo é melhor que o outro. No Capítulo 3 detalharemos os modelos do motor e da dinâmica, tornando-os mais realistas. Até o final do Capítulo 3, todo o comportamento terá sido estudado a partir de uma tal “velocidade desejada” pelo condutor do veículo. No entanto, sabemos que “desejo” não é algo muito relevante, principalmente em avenidas com fluxo intenso. É o tráfego que limita a nossa velocidade, muito antes das leis e dos nossos desejos. Por isso, no Capítulo 4, veremos um modelo para prever a velocidade de um veículo quando este estiver circulando em uma rua com outros veículos. Finalmente, no Capítulo 5, vamos fazer um resumo das questões técnicas discutidas nos primeiros capítulos e também estender a análise para outros fenômenos além do movimento e do gasto energético, como acidentes, fabricação de quadros e como devem ser os veículos para que sejam realmente úteis aos seus usuários.

No mais, lembro que essa é uma coleção eletrônica, que pode e que deve ser constantemente atualizada. Se você descobriu algum erro, se acha que algo deve ser cortado ou mais bem explicado, se pensa que pode ajudar em uma revisão do texto, talvez colaborar no desenvolvimento das planilhas ou, melhor ainda, se descobriu que quer escrever um capítulo só seu, tenho apenas uma coisa a dizer: fique à vontade, a casa é de todos nós.



SOBRE O AUTOR

Fábio Magnani é editor-chefe do *website* Equilíbrio em Duas Rodas e professor no Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE. Mais informações no *website*: www.fabiomagnani.com