

SIMULAÇÃO EM COMPUTADOR DE UM VEÍCULO
HÍBRIDO COM ARMAZENAMENTO DE
ENERGIA EM VOLANTE

24/81

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO EM COMPUTADOR DE UM VEÍCULO
HÍBRIDO COM ARMAZENAMENTO DE
ENERGIA EM VOLANTE.

Konstantinos Stavropoulou

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
de Campinas - UNICAMP como parte dos requi-
sitos necessários para obtenção do título
de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

- CAMPINAS -

1981

UNICAMP

A G R A D E C I M E N T O S

Aos Professores orientadores desta tese, Dr. HANS INGO WEBER e Dr. JAIME SZAJNER, pela imprescindível ajuda recebida.

À minha querida esposa, cujo apoio nos momentos difíceis ajudou-me a superá-los.

Ao Dr. KARL POPP, pela valiosa orientação no início deste trabalho.

Ao colega CESAR DE SOUZA LIMA, pelas produtivas discussões sobre trens de engrenagens planetários.

À ANA MARIA VIEIRA ROCHA, pelo cuidado e presteza na datilografia.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos MEUS PAIS, pelo amor e
dedicação que sempre me
deram, ofereço este traba-
lho como uma forma de agra-
decimento.

TÍTULO: "SIMULAÇÃO EM COMPUTADOR DE UM VEÍCULO HÍBRIDO
COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM VOLANTE".

S U M Á R I O

O veículo em estudo utiliza uma fonte externa de energia elétrica e um volante para armazenamento de energia a bordo. Isto permite recuperar parte da energia cinética do veículo durante a frenagem, em vez de dissipar esta energia nos freios, por atrito.

Desenvolveu-se um modelo matemático do sistema e seu comportamento foi simulado em computador digital. As simulações indicaram que é possível reduzir o consumo de energia de, aproximadamente, 40%, dependendo do ciclo de operação.

TITLE: "COMPUTER SIMULATION OF A HYBRID VEHICLE WITH ENERGY STORAGE IN FLYWHEEL".

S U M M A R Y

The vehicle under study utilizes an external supply of electric energy and an on board flywheel to store energy. This permits the recovery of part of the kinetic energy of the vehicle during braking instead of dissipating this energy on friction brakes.

A mathematical model of the system was developed and its behaviour simulated in a digital computer, showing that it is possible to reduce energy consumption by as much as 40%, depending on the driving cycle.

Í N D I C E

	<u>Pág.</u>
CAP.1. <u>INTRODUÇÃO</u>	01
CAP.2. <u>DESCRIÇÃO DO SISTEMA</u>	04
CAP.3. <u>ANÁLISE DO SISTEMA</u>	07
3.1. PERDAS EXTERNAS AO VEÍCULO	07
3.1.1. Resistência do ar	08
3.1.2. Resistência ao rolamento	08
3.1.3. Cálculo do torque, aplicado nas rodas motrizes, necessário para o veículo su- bir uma rampa com aceleração e veloci- dade dadas	09
3.1.4. Torque antes do diferencial e inércia equivalente ao veículo	13
3.2. PERDAS NO VOLANTE	16
3.2.1. Procedimento seguido para obtenção da expressão do torque resistivo em um volante	17
3.3. TRENS DE ENGRENAGENS PLANETÁRIOS	24
3.3.1. Relação entre as rotações dos eixos dos planetários	25
3.3.2. Rendimento básico e relações entre os torques nos eixos dos T.E.P.	29
3.3.3. Rendimentos e perdas dos T.E.P.	32
3.3.4. Posições dos eixos do T.E.P. em rela- ção ao sistema	38
3.4. CARACTERÍSTICAS DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS	40
CAP.4. <u>EQUAÇÕES DO MOVIMENTO</u>	47
4.1. EQUAÇÃO DO MOVIMENTO DO VOLANTE	48
4.2. EQUAÇÃO DO MOVIMENTO PARA A INÉRCIA EQUIVA- LENTE AO VEÍCULO	55

	Pág.
CAP. 5. <u>SIMULAÇÃO NO COMPUTADOR</u>	58
5.1. INTRODUÇÃO	58
5.2. EQUAÇÕES DO SISTEMA	60
5.3. PARÂMETROS DE CONTROLE	62
5.4. ESTRATÉGIA DE CONTROLE	63
5.4.1. Exemplo de estratégia de controle ..	65
5.5. FATORES QUE DETERMINAM O PERFIL DO PERCURSO DO VEÍCULO	69
 CAP. 6. <u>DESCRIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA E DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO</u>	71
6.1. DESCRIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA	71
6.2. DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS IMPRESSOS	73
6.3. EXPLICAÇÕES SOBRE O CÁLCULO DE ALGUNS VALO- RES	75
6.4. BALANÇO DE ENERGIA	82
6.5. LISTAGENS DE RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	82
 CAP. 7. <u>COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS E SUGES- TÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</u>	101
 APÊNDICE A. <u>CONVENÇÕES DE SINAIS PARA ROTAÇÕES, MOMEN- TOS E POTÊNCIAS NOS EIXOS</u>	104
 APÊNDICE B. <u>RELAÇÕES ENTRE AS ROTAÇÕES DAS INÉRCIAS E DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS</u>	108
 APÊNDICE C. <u>PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO</u>	110
C.1. SUBROTINA RKKS	111
C.2. PROGRAMA PRINCIPAL: SIMUL	113
C.3. SUBROTINA FCT	113
C.4. SUBROTINA OUTP	114
C.5. SUBROTINA UFUN	115
C.6. SUBROTINA GRAF	115

	<u>Pág.</u>
APÊNDICE D. <u>SUGESTÃO DE UMA SEQUÊNCIA PARA UMA PRIMEIRA</u> <u>ESCOLHA DOS PARÂMETROS DO SISTEMA</u>	116
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	123

INTRODUÇÃO

A crise mundial do petróleo tem estimulado uma intensa pesquisa de fontes alternativas de energia e por sistemas mais eficientes, isto é, sistemas que apresentam menores perdas de energia.

Grandes perdas ocorrem durante a frenagem de um veículo comum, quando sua energia cinética é dissipada pelos freios na forma de calor, ruídos e vibrações. Se o ciclo de operação do veículo (aceleração, manutenção da velocidade e desaceleração) ocorrer com muita frequência, haverá um elevado desperdício de energia, é o que acontece com veículos urbanos de transporte coletivo, veículos de entregas, veículos de coleta de lixo etc.

Outras perdas são inerentes aos sistemas que convertem a energia e transferem a potência ao local onde ela será utilizada. Neste sentido são muito atuais as preocupações com a baixa eficiência dos motores de combustão interna e muitas alterações estão sendo propostas e deverão ser incorporadas aos veículos nos próximos anos. Em especial este baixo rendimento se torna importante justamente no tráfego congestionado dos centros urbanos onde os veículos aceleram e desaceleram muito frequentemente.

A utilização de volante, para armazenamento de energia, incorporado ao veículo permite recuperar uma parcela considerável da energia que seria dissipada na frenagem. Esta recuperação é conseguida pelo aumento da rotação do volante durante a desaceleração do veículo. A energia assim recuperada é reutilizada durante a operação subsequente.

Outra importante vantagem de se utilizar volante é o possível nivelamento da demanda de potência da fonte, permitindo a operação nas condições de máxima eficiência.

Um sistema de propulsão de veículo é chamado normalmente de híbrido quando possui mais do que uma forma de armazenamento ou fonte de energia. Estes sistemas têm sido intensamente pesquisados nos últimos anos e vários foram os protótipos

construídos. Incluem-se vagões metroviários ou suburbanos (elétrico-volante, elétrico-turbina a gás), ônibus (elétrico-diesel, bateria-diesel, elétrico-volante, diesel-volante, diesel-hidráulico etc) veículos de entrega, taxis etc (gasolina-volante, bateria-volante, bateria-diesel-volante etc). A grande variedade possível mostra o amplo espectro sobre o qual deve ser efetuada a otimização do veículo híbrido.

O problema crucial destes sistemas é uma transmissão continuamente variável. Inexistindo tal transmissão com rendimento razoável na ampla faixa necessária recorre-se a sistemas de bifurcação de potência que permitem a operação destas transmissões em sua faixa de máximo rendimento. A bifurcação de potência é realizada normalmente numa caixa de engrenagens planetárias e a transmissão continuamente variável pode ser elétrica, hidráulica ou mecânica.

Atualmente está sendo desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica da UNICAMP um sistema híbrido de propulsão regenerativa que utiliza a rede de distribuição como fonte de energia elétrica (poder-se-ia utilizar baterias) e possui basicamente um volante, para armazenamento de energia, duas máquinas elétricas (motor-gerador) que funcionam como transmissão continuamente variável e um trem de engrenagens planetárias para a bifurcação da potência.

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo matemático do sistema que possibilite simular em computador o veículo híbrido que está sendo desenvolvido na UNICAMP. A necessidade desta simulação advém do fato do sistema ser relativamente complexo, sendo praticamente impossível prever analiticamente a influência de cada parâmetro sobre o comportamento do sistema. Deste modo, a simulação é um valioso auxiliar de projeto.

Os programas foram elaborados na linguagem FORTRAN e utilizou-se o computador PDP-10 da UNICAMP.

O desempenho do sistema é determinado pelas características dos componentes, configuração do sistema e a estratégia de controle usada para transferir energia. As características dos componentes são parâmetros de leitura dos programas, portanto podem ser facilmente alterados. Através dos dados pode-se também mudar a posição dos eixos do trem planetário em rela-

ção ao sistema e mesmo retirá-lo completamente, quando então não haverá bifurcação do fluxo de energia. A estratégia de controle pode também ser alterada; no entanto, esta modificação não é feita pelos dados de leitura e sim pelos comandos nos programas. A estratégia de controle desenvolvida e utilizada nos programas, cujos resultados são apresentados neste trabalho, ainda não é definitiva e a simulação tem contribuído para o seu aprimoramento.

Ao mesmo tempo em que é simulado o veículo com volante, simula-se também o veículo sem volante, o que nos permite verificar a economia total de energia obtida. Esta energia economizada depende de muitos fatores, entre eles estão o percurso do veículo, as perdas no volante e a estratégia de controle.

DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema cuja simulação é realizada neste trabalho, foi desenvolvido considerando o veículo como sendo um ônibus elétrico, tipo trólebus. Os resultados são extrapoláveis, todavia, para qualquer veículo ligado a uma rede de distribuição de energia elétrica, bem como, com algumas adaptações, a um veículo a baterias.

A vantagem do volante como armazenador a bordo de um veículo que se desloca no trânsito urbano é a possibilidade de reaproveitamento de energia de frenagem independente da receptividade da rede elétrica à regeneração de energia e a consequente diminuição dos desgastes dos freios e economia de energia. Paralelamente a estas aparece a vantagem de demandar-se da rede uma potência aproximadamente constante, permitindo a operação de um maior número de veículos com as subestações projetadas para um número menor de veículos elétricos convencionais.

O sistema em estudo compõe-se de um volante para armazenamento de energia, quatro transmissões simples (T.S.), um trem de engrenagens planetárias (T.E.P.) e duas máquinas elétricas de corrente contínua, ligados ao veículo como indicado na Figura 2.1.

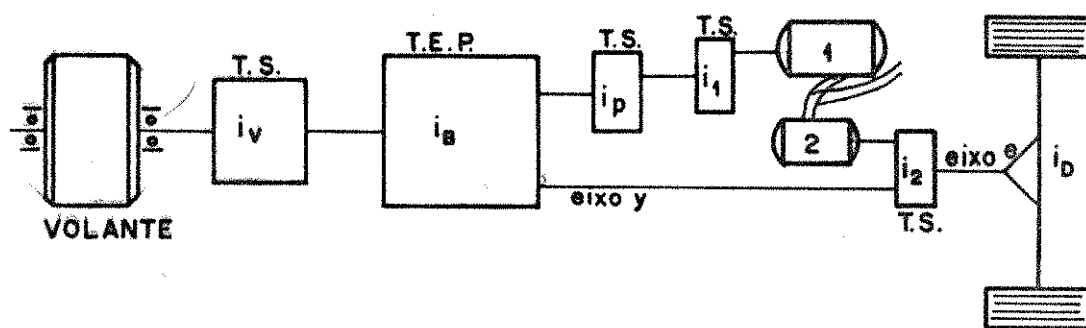


Figura 2.1

O controle do fluxo de energia no sistema é realizado pelas máquinas elétricas, de tal modo que é possível desacelerar o veículo fazendo fluir sua energia para o volante. Na aceleração, as máquinas elétricas fazem com que o volante ceda energia ao veículo.

O trem planetário tem como função principal bifurcar a potência do sistema, isto é, o T.E.P. permite que apenas uma par da potência proveniente do volante passe pelas máquinas elétricas, sendo que o restante passa pelo eixo Y. Esta bifurcação possibilita utilizar máquinas elétricas de potência menor, consequentemente, mais baratas e mais leves. A bifurcação de potência possibilita também aumentar a eficiência do sistema pois o rendimento médio da transmissão de energia pelas máquinas elétricas é menor que o rendimento do planetário.

A transmissão simples i_2 possui três eixos, porém não se trata de um planetário pois os eixos Y e e estão ligados rigidamente possuindo, portanto, sempre a mesma velocidade angular.

Para simular o veículo no computador é necessário definir numericamente cada elemento do sistema.

O volante é definido pelo seu momento de inércia e pelo torque resistivo, na velocidade angular máxima, devido ao atrito com o ar e com os mancais.

O T.E.P. é definido pela razão básica i_B , o rendimento básico η_B e a posição dos eixos do planetário em relação ao sistema.

As máquinas elétricas são caracterizadas pela corrente máxima de armadura, pela resistência de armadura, pelo fluxo magnético máximo e pela tensão máxima nos terminais da armadura.

Dois dados definem cada transmissão simples: a relação de transmissão i e o rendimento η . Caso se queira simular o veículo sem uma destas transmissões basta fazer $i=1$ e $\eta=1$.

O diferencial é também deminido pela relação de transmissão i_D e por seu rendimento η_D .

O veículo é definido pela sua massa, coeficiente de resistência aerodinâmica, coeficiente de resistência ao rolamento, raio dos pneus etc.

Pode-se também simular o veículo sem bifurcação de potência, bastando retirar o planetário e o eixo Y do sistema.

O circuito que liga as máquinas elétricas possui diversas chaves e conforme a configuração destas pode-se introduzir e energia da fonte externa, desligar uma das máquinas etc.

No laboratório do GEPROM* o veículo é substituído por uma inércia de rotação (rodeiro) ligado ao sistema como indica a Figura 2.2.

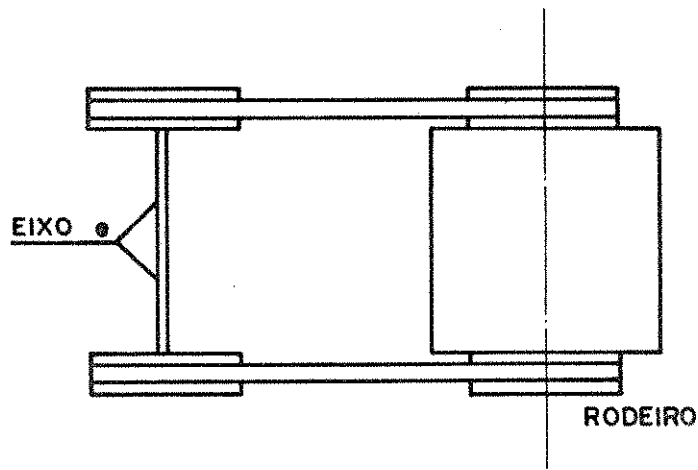


Figura 2.2

* Grupo de Estudos Especiais em Projeto Mecânico do Departamento de Engenharia Mecânica, da UNICAMP.

ANÁLISE DO SISTEMA

Neste capítulo vamos analisar o sistema, isto é, vamos decompor o sistema em partes mais simples e estudar cada uma delas. O que nos interessa é encontrar expressões ou equações que relacionem os torques, as rotações e as perdas de energia para cada uma das partes. A seguir, repetimos o esquema do sistema, Figura 3.1.

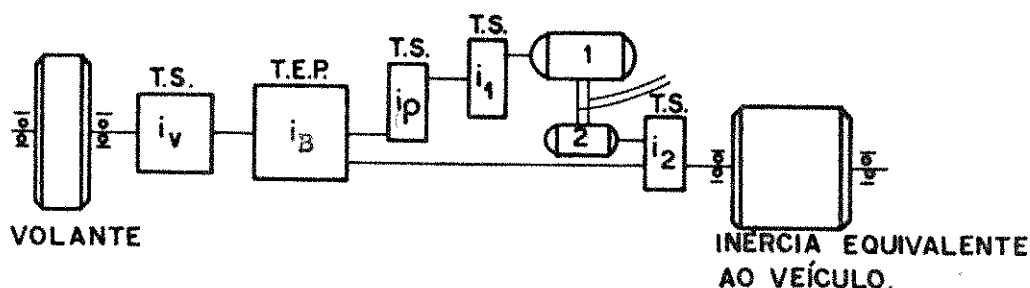


Figura 3.1

3.1. PERDAS EXTERNAS AO VEÍCULO

Sobre um veículo em movimento agem várias forças: forças que movem o veículo e forças que oferecem resistência ao seu movimento.

O principal esforço motor é o torque aplicado no eixo das rodas motrizes. Este torque é resultado da operação das máquinas internas.

As forças que oferecem resistência ao movimento do

veículo são, principalmente, devido a: resistência do ar, resistência ao rolamento e resistência à subida de uma rampa.

3.1.1. Resistência do ar

Pesquisando diversos autores [6], [3], verificamos que a clássica expressão (3.1) representa um consenso geral:

$$F_{\text{ar}} = \frac{1}{2} \rho C A v^2 \quad (3.1)$$

onde

F_{ar} = força de resistência do ar (N)

ρ = densidade do ar (kg/m^3)

c = coeficiente de forma (adimensional)

A = área frontal do veículo (m^2)

v = velocidade do veículo (m/s), considerando o ar parado.

3.1.2. Resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento deve-se: às deformações dos pneus e da pista; ao atrito dos mancais e ao atrito dos pneus sobre a pista; à adesão dos pneus à pista; às irregularidades da pista.

As deformações dos pneus e da pista representam o fator de maior influência.

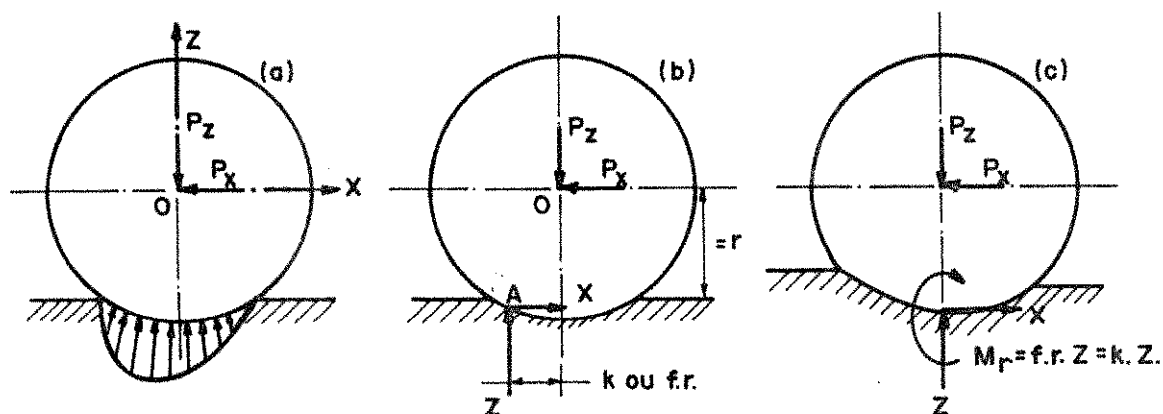


Figura 3.2

Na Figura 3.2.a estão representadas as forças que agem numa roda. As reações da pista são forças distribuídas, cuja resultante, pode ser decomposta nas direções x e z, Figura 3.2.b. O ponto A, de aplicação desta resultante, não pertence ao eixo O_z . Podemos transferir a componente reativa Z, aplicada em A, para o eixo O_z , aplicando um momento M_r de transporte. A distância k do ponto A ao eixo O_z é obtida experimentalmente. O valor de k depende de vários fatores, todos difíceis de serem medidos, não existindo uma teoria completa para a resistência ao rolamento.

Esta distância k é uma função das propriedades elásticas e plásticas dos materiais em contato, do raio da roda, da velocidade do movimento e da aspereza das superfícies. A distância k é normalmente considerada como sendo proporcional ao raio da roda, uma vez definidas as outras características. Assim:

$$k = f \cdot r \quad (3.2)$$

onde f é o coeficiente de resistência ao rolamento.

A pressão interna do pneu é um fator preponderante no valor de f, uma vez que altera a rigidez do pneu.

Para um dado par pneu-pista o valor do coeficiente de rolamento depende essencialmente da velocidade.

ARTAMONOV [6] considera a expressão:

$$f = f_0 (1 + \lambda v^2) \quad (3.3)$$

para representar esta variação, sendo:

f_0 = o coeficiente de rolamento a baixas velocidades,
($v < 14$ m/s)

λ = uma constante. ARTAMONOV sugere o valor $\lambda = \frac{1}{1500} \frac{s^2}{m^2}$

v = velocidade do veículo (m/s).

3.1.3. Cálculo do torque, aplicado nas rodas motrizes, necessário para o veículo subir uma rampa com aceleração e velocidade dadas

A Figura 3.3 apresenta os esforços que agem nos dois

eixos, dianteiro e traseiro, e na carroceria.

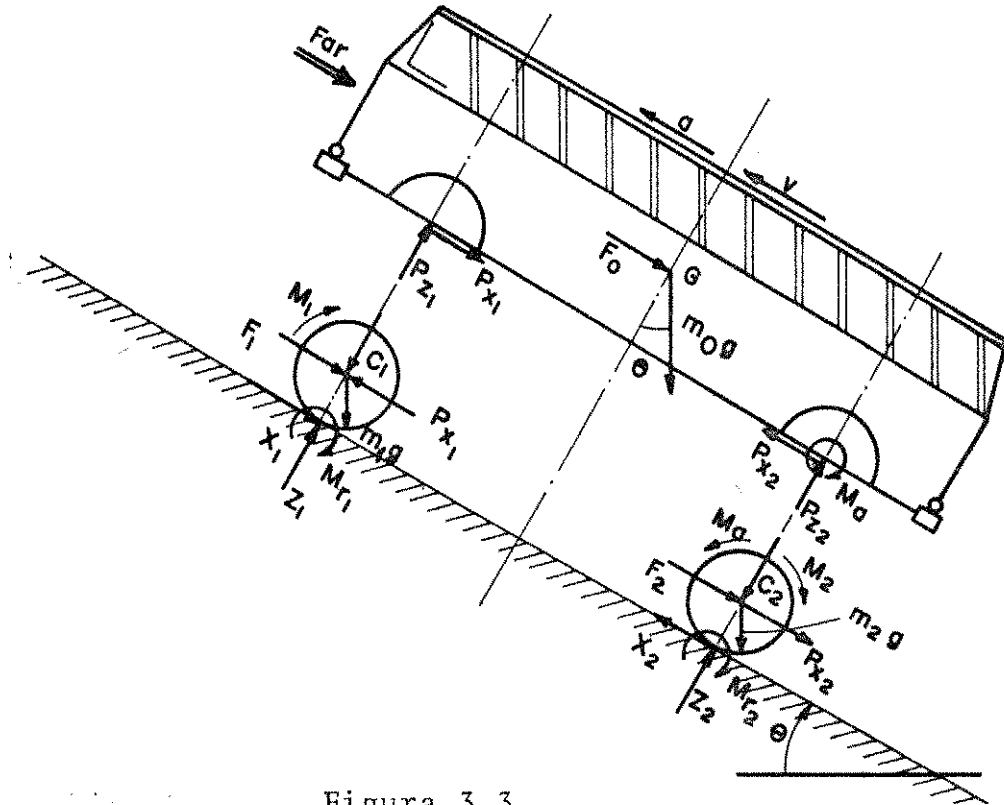


Figura 3.3

sendo:

- m_0 = massa do veículo excluindo-se a massa das rodas e eixos das rodas (kg)
- m_1 = massa do eixo e rodas dianteiras (kg)
- m_2 = massa do eixo e rodas traseiras (kg)
- $m = m_0 + m_1 + m_2$
- g = aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- F_0, F_1, F_2 = forças de inércia devido a aceleração de m_0, m_1 e m_2 respectivamente (N)
- F_{ar} = força de resistência do ar (N)
- M_{r1}, M_{r2} = momentos de resistência ao rolamento (Nm)
- M_1, M_2 = momentos fictícios devido a aceleração angular das rodas (Nm)
- a = aceleração do veículo (m/s^2)
- v = velocidade do veículo (m/s)
- r = raio dos pneus (m)
- I_1, I_2 = momentos de inércia dos eixos, dianteiro e traseiro, respectivamente (kgm^2)
- $I = I_1 + I_2$
- α = aceleração angular das rodas (rad/s^2)
- f = coeficiente de resistência ao rolamento

θ = inclinação de resistência ao rolamento

M_a = torque aplicado nas rodas motrizes (Nm)

Utilizando os princípios de D'Alembert para cada parte teremos:

i) para as rodas dianteiras:

$$\Sigma F_z = 0 \quad Z_1 - P_{z1} - m_1 g \cos \theta = 0 \quad (3.4)$$

$$\Sigma F_x = 0 \quad -F_1 - X_1 + P_{x1} - m_1 g \sin \theta = 0 \quad (3.5)$$

$$\Sigma M_c = 0 \quad M_1 + M_{r1} - X_1 r = 0 \quad (3.6)$$

de (3.6) vem

$$X_1 = \frac{M_1 + M_{r1}}{r} \quad (3.7)$$

mas

$$M_1 = I_1 \alpha_1 = I_1 \frac{a}{r} \quad (3.8)$$

e

$$M_{r1} = fr Z_1 \quad (3.9)$$

então

$$X_1 = \frac{I_1}{r^2} a + f Z_1 \quad (3.10)$$

A força da inércia é dada por:

$$F_1 = m_1 a \quad (3.11)$$

Substituindo (3.10) e (3.11) em (3.5) vem:

$$P_{x1} = \left(m_1 + \frac{I_1}{r^2} \right) a + f Z_1 + m_1 g \sin \theta \quad (3.12)$$

ii) para as rodas traseiras

$$\Sigma F_z = 0 \rightarrow Z_2 - P_{z2} - m_2 g \cos \theta = 0 \quad (3.13)$$

$$\Sigma F_x = 0 \rightarrow -P_{x2} - F_2 + X_2 - m_2 g \sin \theta = 0 \quad (3.14)$$

$$\Sigma M_{c2} = 0 \rightarrow M_2 + M_{r2} - M_a + X_2 r = 0 \quad (3.15)$$

de (3.15) temos:

$$X_2 = \frac{M_a - M_2 - M_{r2}}{r} \quad (3.16)$$

mas

$$M_2 = I_2 \alpha_2 = \frac{I_2}{r} a \quad (3.17)$$

e

$$M_{r2} = frZ_2 \quad (3.18)$$

então

$$X_2 = \frac{M_a}{r} - fZ_2 - \frac{I_2}{r^2} a \quad (3.19)$$

e

$$F_2 = m_2 a \quad (3.20)$$

Substituindo (3.19) e (3.20) em (3.14), vem:

$$P_{x2} = \frac{M_a}{r} - fZ_2 - \left(m_2 + \frac{I_2}{r^2}\right) a - m_2 g \sin \theta \quad (3.21)$$

iii) para a carroceria:

$$\Sigma F_z = 0 \rightarrow P_{z1} + P_{z2} - m_0 g \cos \theta = 0 \quad (3.22)$$

$$\Sigma F_x = 0 + -F_{ar} - F_0 - P_{x1} + P_{x2} - m_0 g \text{ sen}\theta = 0 \quad (3.23)$$

de (3.22) vem

$$P_{z1} + P_{z2} = m_0 g \text{ cos}\theta \quad (3.24)$$

e de (3.23) vem

$$P_{x2} - P_{x1} = m_0 g \text{ sen}\theta + F_{ar} + m_0 a \quad (3.25)$$

Utilizando-se (3.12) e (3.21) podemos escrever

$$P_{x2} - P_{x1} = \frac{M_a}{r} a (m_1 + m_2 + \frac{I_1 + I_2}{r^2}) - f(Z_1 + Z_2) - (m_1 + m_2) g \text{ sen}\theta \quad (3.26)$$

De (3.4), (3.13) e (3.24) vem:

$$Z_1 + Z_2 = (m_0 + m_1 + m_2) g \text{ cos}\theta \quad (3.27)$$

Substituindo-se (3.1), (3.25) e (3.27) em (3.26) e explicitando o torque aplicado no eixo das rodas motrizes, vem:

$$M_a = m a r (1 + \frac{I}{m r^2}) + m g r (\text{sen}\theta + f \text{ cos}\theta) + \frac{1}{2} \rho C A v^2 r \quad (3.28)$$

Este é o torque que se deve aplicar às rodas motrizes para imprimir uma aceleração a um veículo de massa total m , que sobe uma rampa de inclinação θ numa velocidade v .

3.1.4. Torque antes do diferencial e Inércia equivalente ao veículo.

Na simulação em laboratório é muito interessante substituir-se o veículo, uma inércia que se pretende transladar, por um grande volante, que possui uma inércia de rotação (momento de inércia) equivalente.

A Figura 3.4.a representa o eixo motor do veículo. A substituição do veículo por uma inércia de rotação pode ser feita colocando-se esta inércia no lugar do eixo motor do veículo,

de modo que a rotação da inércia equivalente seja igual à rotação ω , do eixo antes do diferencial, Figura 3.4.b.

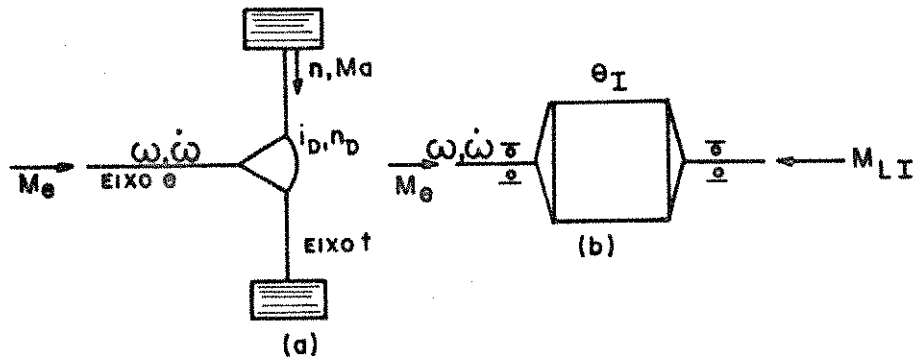


Figura 3.4

Vamos agora calcular o torque M_e , aplicado no eixo do diferencial, e a inércia equivalente ao veículo, θ_I .

O rendimento η_D do diferencial é expresso por:

$$\eta_D = \frac{M_a \cdot n}{M_e \cdot \omega} \quad (3.29)$$

sendo

M_a = o torque no eixo das rodas, (eixo t)

M_e = o torque no eixo e

n = rotação do eixo t

ω = rotação do eixo e.

O rendimento do diferencial é definido por (3.29) quando o fluxo de potência mecânica parte do interior do veículo para as rodas. Porém, quando a potência vem das rodas para dentro do veículo, o rendimento do diferencial é definido por:

$$\eta_D = \frac{M_e \cdot \omega}{M_a \cdot n} \quad (3.29.a)$$

A potência flui das rodas para o interior do veículo durante a fase de frenagem, quando se pretende recuperar parte

da energia do veículo.

Podemos sintetizar (3.29) e (3.29.a) na seguinte expressão:

$$\eta_D = \left(\frac{M_a \cdot n}{M_e \cdot \omega} \right)^e \quad (3.30)$$

Onde o expoente $e=\pm 1$ dependendo do sentido do fluxo de potência. Quando $M_e \cdot \omega > 0$ teremos a potência indo para as rodas e portanto, $e=+1$, caso contrário $e=-1$. É mais conveniente escrever (3.30) na forma:

$$\eta_D^e = \frac{M_a \cdot n}{M_e \cdot \omega} \quad (3.31)$$

Considerando que a velocidade v do veículo é

$$v = \frac{\omega r}{i_D} \quad (3.32)$$

e a aceleração é

$$a = \frac{\dot{\omega} r}{i_D} \quad (3.33)$$

sendo

$$i_D = \frac{\omega}{n} \quad (3.34)$$

e utilizando (3.28) e (3.31) podemos escrever:

$$M_e = \frac{1}{\eta_D^e} (mr^2 + I) \frac{1}{i_D^2} \dot{\omega} + mg \frac{r}{\eta_D i_D} (\text{sen}\theta + f \cos\theta) + \frac{1}{2} \rho C A \frac{\omega^2 r^3}{\eta_D^e i_D^3} \quad (3.35)$$

Este é o torque no eixo e , antes do diferencial.

Podemos definir a inércia equivalente ao veículo, por:

$$\theta_I = \frac{mr^2 + I}{i_D^2} \quad (3.36)$$

Então, podemos escrever:

$$\theta_I \dot{\omega} = M_e \eta_D^e - mgr(\sin\theta + f\cos\theta) - \frac{1}{2} \rho CA \omega^2 \frac{r^3}{i_D^3} \quad (3.37)$$

Ou então:

$$\theta_I \dot{\omega} = M_e - M_{LI}, \quad (3.38)$$

com M_{LI} definido por:

$$M_{LI} = (1 - \eta_D^e) M_e + mgr(\sin\theta + f\cos\theta) + \frac{1}{2} \rho CA \omega^2 \frac{r^3}{i_D^3} \quad (3.39)$$

Sendo que M_{LI} é o torque resistivo, que tenta impedir o movimento da inércia equivalente θ_I , e que deve ser simulado sobre a mesma para uma reprodução das condições do veículo.

3.2. PERDAS NO VOLANTE

Na simulação do veículo híbrido é necessário levar em conta as perdas de energia no volante de armazenamento de energia, uma vez que poderão ser relativamente grandes.

É conveniente colocar o volante dentro de uma carcaça, por duas razões principais: primeiramente, por proteção, pois o volante, que gira a rotações elevadas, poderá desintegrar-se; ou tra razão é a possibilidade de se diminuir as perdas por atrito aerodinâmico [12].

As perdas de energia no volante devem-se, principalmente, ao atrito nos mancais e com o fluido no interior da carcaça, sendo este último, para as altas rotações desejadas, predominante.

Para se quantificar estas perdas é suficiente investigar o torque resistivo total para cada rotação do volante. Este torque depende de diversos fatores, tais como: o fluido que está no interior da carcaça de proteção, sua densidade, viscosidade e pressão; a velocidade angular do volante; as folgas entre as paredes da carcaça e do volante; o raio, o acabamento superficial e a forma do volante; o grau de lubrificação dos mancais; o tipo de rolamentos utilizados etc.

Uma vez definidos todos estes parâmetros do volante resta encontrar a expressão do torque como função da rotação. Pa

ra obtermos esta expressão podemos realizar a seguinte experiência: levamos o volante à rotação mais alta de funcionamento e deixamos seu eixo livre. Assim o volante começará a diminuir sua rotação devido, unicamente, ao torque resistivo. Registra-se a curva rotação \times tempo. Através desta curva podemos obter a expressão desejada.

A experiência descrita foi realizada com um volante no laboratório do GEPROM, do Departamento de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Como ilustração, descreveremos a seguir o processo de obtenção da expressão do torque como função da rotação deste volante.

3.2.1. Procedimento seguido para a obtenção da expressão do torque resistivo em um volante.

As dimensões principais da carcaça e do volante estão representadas na Figura 3.5.

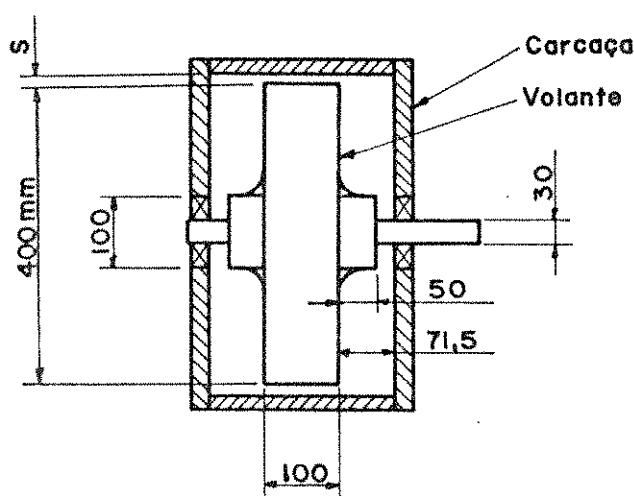


Figura 3.5

A influência da folga radial s pode ser desprezada [12]. Este volante possui uma inércia de $1,81 \text{ kgm}^2$.

No interior da carcaça havia ar à pressão atmosférica.

Depois de elevada, a rotação do volante, à aproximadamente 10.000 rpm libertou-se seu eixo de toda ação externa. Utilizando-se um sensor de velocidade pode-se registrar a curva ro-

tação×tempo, que se vê na Figura 3.6.

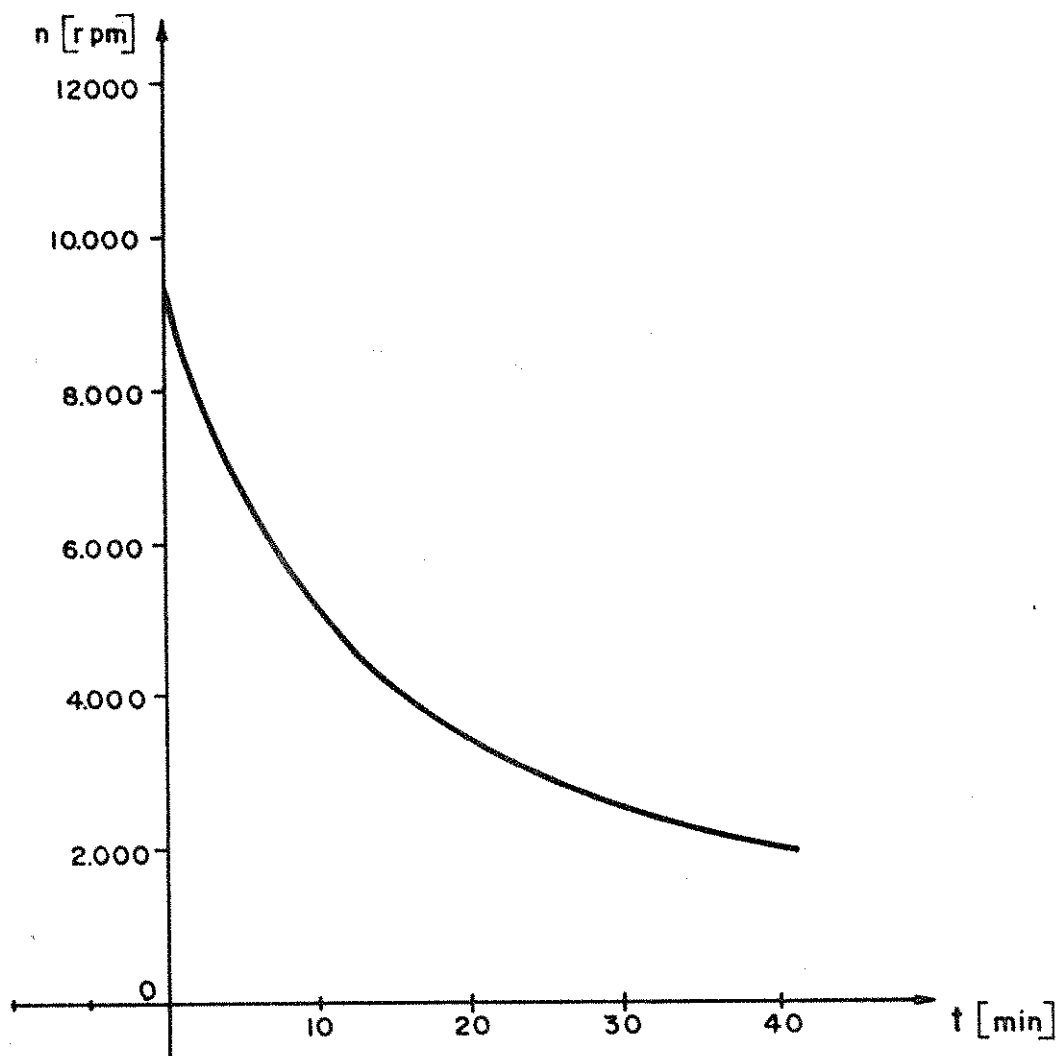


Figura 3.6

Sabemos da Mecânica que para um corpo girando em torno de um eixo fixo, é válida a expressão:

$$M = \theta_G \ddot{n} \quad (3.40)$$

sendo

M = torque aplicado ao corpo

θ_G = momento de inércia do corpo em relação ao eixo de rotação

\ddot{n} = aceleração angular do corpo

Evidentemente que a expressão (3.40) só será válida se as grandezas estiverem em unidades coerentes.

Para o volante girando com eixo livre de esforços externos, M será o resultado das ações do fluido no interior da carcaça e dos mancais de apoio. Portanto, basta investigar a

relação entre a aceleração angular \dot{n} e a rotação n .

A partir da curva experimental, Figura 3.6, da rotação como função do tempo $n(t)$, podemos chegar à expressão desejada (do torque resistivo como função da rotação $M(n)$) de duas maneiras: processo gráfico-analítico e processo analítico.

a) Processo gráfico-analítico

Podemos traçar, graficamente, tangentes à curva experimental $n(t)$, para diversos valores de n .

A inclinação das retas tangentes traçadas nos fornece a derivada \dot{n} calculada dividindo-se os valores de Δn e Δt , lidos no papel milimetrado. Desta maneira, podemos obter uma tabela de $\dot{n} \approx \Delta n / \Delta t$ e n . A partir desta tabela e utilizando métodos estatísticos podemos obter uma regressão conveniente de $\dot{n}(n)$, que multiplicada pela inércia θ_G do volante nos fornece a expressão procurada de $M(n)$.

Este processo apresenta as seguintes fontes de erros:

- i) erro na leitura de n ; pequeno.
- ii) erro no traçado da tangente; grande.
- iii) erro na leitura de Δn da tangente; médio.
- iv) erro na leitura de Δt da tangente; médio.

b) Processo analítico

Um outro procedimento que nos permite chegar à expressão desejada é o que passaremos a descrever.

Da curva experimental, Figura 3.6, retiramos um conjunto de pares n e t formando-se assim uma tabela, e através de métodos analíticos, podemos obter uma regressão analítica $n(t)$.

Derivando-se, analiticamente, a regressão encontrada $n(t)$ obtém-se uma expressão analítica de $\dot{n}(t)$.

Utilizando a expressão analítica de $n(t)$ pode-se eliminar t e conseqüentemente chegar-se à expressão analítica de $M(n)$.

As fontes de erros neste processo são:

- i) erro na leitura de n ; pequeno.
- ii) erro na leitura de t ; pequeno.

Portanto, este processo é mais preciso que o anterior. Sendo assim, optamos por sua utilização.

A seguir veremos, com mais detalhes, como aplicamos este processo.

Da curva experimental, Figura 3.6, retiramos os pares de dados n e t mostrados na Tabela 3.1.

Pela observação da forma da curva experimental notamos que a rotação n cai rapidamente no início e mais lentamente a medida que o tempo passa. Esta forma sugere que uma das seguintes expressões é adequada para o trecho que nos interessa.

Tabela 3.1

	t [min]	n [rpm]
01	0,0	9300
02	0,25	9103
03	0,50	9037
04	0,75	8707
05	1,25	8417
06	2,50	7678
07	3,75	7018
08	5,00	6464
09	6,25	6016
10	7,50	5633
11	8,75	5237
12	10,00	4947
13	11,25	4683
14	12,50	4393
15	13,75	4156
16	15,00	3957
17	17,50	3588
18	20,00	3285
19	22,50	3034
20	25,00	2797
21	30,00	2440
22	35,00	2137
23	38,25	1978

Tabela 3.2

n [rpm]	erro %
9310	+ 0,11
9118	+ 0,16
8933	- 1,15
8754	+ 0,54
8417	0,00
7671	- 0,09
7039	+ 0,30
6497	+ 0,51
6028	+ 0,20
5619	- 0,25
5258	+ 0,40
4938	- 0,18
4652	- 0,66
4396	+ 0,07
4165	+ 0,02
3956	- 0,03
3590	+ 0,06
3283	- 0,06
3021	- 0,43
2796	- 0,04
2428	- 0,49
2141	+ 0,19
1986	+ 0,40

$$n = a(t + c)^b + d; \quad b < 0 \quad (3.41)$$

$$n = ae^{bt}; \quad b < 0 \quad (3.42)$$

$$n = c + ab^t; \quad b < 1 \quad (3.43)$$

Aplicando-se logaritmos nas três equações anteriores teremos:

$$\ln(n-d) = \ln a + b \ln(t+c) \quad (3.41.a)$$

$$\ln n = \ln a + bt \quad (3.42.a)$$

$$\ln(n-c) = \ln a + t \ln b \quad (3.43.a)$$

Uma vez escolhidos os valores de c e d para a expressão (3.41.a) podemos calcular a e b através de uma regressão linear. Podemos também calcular o coeficiente de correlação linear R . Assim, para (3.41.a), R será função apenas de c e d . Através de várias tentativas pudemos escolher valores de c e d que maximizam o valor absoluto de R .

Seguindo este processo obtivemos os seguintes resultados, para a regressão do tipo (3.41) e com os dados da Tabela 3.1:

$$c = 13,8$$

$$d = 0,0$$

$$a = 197368$$

$$b = -1,16353763$$

$$R = -0,99996647$$

e substituindo os valores:

$$n = \frac{197368}{(t + 13,8)^{1,16353763}} \quad (3.41.b)$$

Procedemos de maneira análoga para as expressões (3.42) e (3.43) e obtivemos:

$$n = 8163 e^{-0,0416967t} \quad \text{com } R = -0,981764 \quad (3.42.b)$$

e,

$$n = 1570 + 7343,33.(0,9289435)^t \quad \text{com } R = 0,998780788 \quad (3.43.b)$$

Como vemos a expressão que melhor se adapta é a (3.41. b), que possui coeficiente de correlação muito próximo da unidade. Para ilustrar este fato resolvemos colocar na Tabela 3.2 os valores de n calculados através de (3.41.b) indicando também os desvios em relação aos valores da Tabela 3.1.

Vamos agora procurar uma expressão analítica para o torque resistivo como função da rotação.

Derivando (3.41) ficamos com:

$$\dot{n} = ab (t+c)^{b-1} \quad (3.44)$$

de (3.41) com $d=0$ tiramos que:

$$t+c = \left(\frac{n}{a} \right)^{\frac{b-1}{b}} \quad (3.45)$$

substituindo (3.45) em (3.44) teremos:

$$\dot{n} = ab \left(\frac{n}{a} \right)^{\frac{b-1}{b}} \quad (3.46)$$

ou

$$\dot{n} = ba \frac{1}{b} n^{\frac{b-1}{b}} \quad (3.47)$$

e substituindo os valores de a e b encontrados, teremos:

$$\dot{n} = -32,716 \times 10^{-6} n^{1,85945} \quad (3.48)$$

sendo n [rpm] e \dot{n} [rpm²].

Utilizando Ω [rad/s] e $\dot{\Omega}$ [rad/s²] e lembrando que $\theta_G = 1,81 \text{ kgm}^2$ ficaremos com:

$$M = -6,862 \times 10^{-6} \Omega^{1,85945} \quad (3.49)$$

sendo M [Nm].

Considerando que $\Omega_{\max} = 12000 \text{ rpm} = 1256,64 \text{ rad/s}$ então o torque resistivo a essa rotação será $M_{\max} = 3,975 \text{ Nm}$.

Podemos reescrever (3.49) na forma:

$$M \cong M_{\max} \cdot \left(\frac{\Omega}{\Omega_{\max}} \right)^{1,86} \quad (3.50)$$

ou

$$M \cong 4,0 \left(\frac{\Omega}{\Omega_{\max}} \right)^{1,86} \quad (3.51)$$

E a potência perdida será:

$$P \cong -6,863 \times 10^{-6} \Omega^{2,86} \quad [\text{watts}] \quad (3.52)$$

Na Figura 3.7 traçamos as curvas do torque resistivo, da potência perdida e da potência perdida por unidade de energia armazenada em função da rotação para o volante considerado.

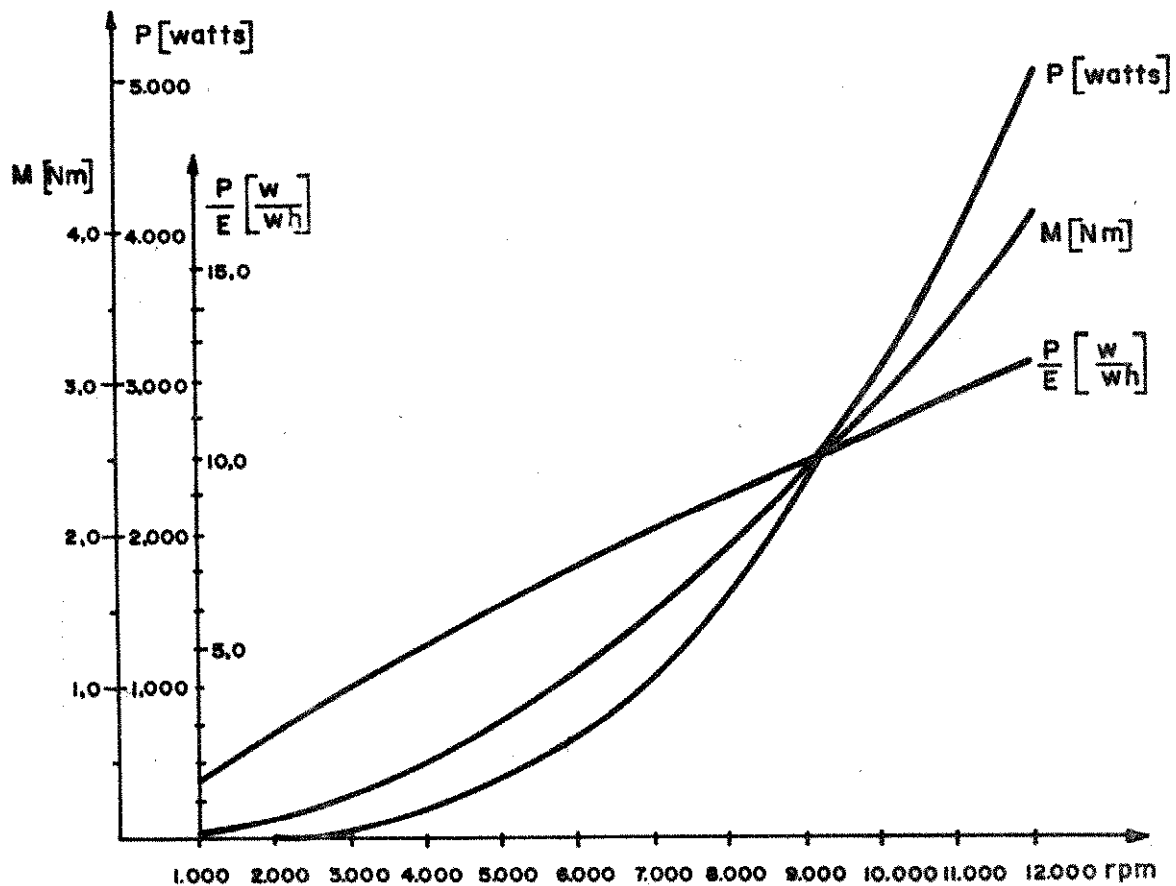


Figura 3.7

3.3. TRENS DE ENGRENAGENS PLANETÁRIOS

A principal função do trem planetário no sistema é bifurcar o fluxo de energia. Esta bifurcação tem por finalidade reduzir a potência que passa pelas máquinas elétricas e, consequentemente, diminuir as perdas de energia e o tamanho destas máquinas.

Os trens de engrenagens planetários são mecanismos relativamente complicados, tanto que o estudo de suas características tem sido tema de inúmeros artigos publicados em revistas científicas internacionais, principalmente a partir de 1949. Porém, apenas recentemente estão surgindo estudos sobre planetários na bibliografia nacional [16], inclusive uma tese de mestrado [5]. No entanto, estes estudos ainda não estão muito difundidos entre os engenheiros e pesquisadores nacionais. Sendo assim, julgamos necessário incluir, neste trabalho, a apresentação das principais características de planetários. O conhecimento destas características é essencial para o completo entendimento dos capítulos subsequentes.

Um trem de engrenagem planetário (T.E.P.) pode ser definido como sendo um mecanismo formado por engrenagens onde haja pelo menos uma, cujo centro pode mover-se. O movimento destas engrenagens é semelhante ao movimento dos planetas no sistema solar. Neste trabalho chamaremos de sol (S) a engrenagem central menor, de coroa (C) a engrenagem central maior, de planetas (P) as engrenagens cujos centros podem mover-se e de braço (B) o suporte dos planetas.

A Figura 3.8 apresenta alguns tipos de planetários.

De acordo com a classificação apresentada em [5] os T.E.P. são chamados de:

Planetários elementares, constituídos de apenas uma engrenagem central, um planeta e um braço, Figura 3.8.a.

Planetários simples, compõem-se de duas engrenagens centrais, um ou dois planetas e um braço, Figura 3.8.b,c,d,e,f. São os mais usados.

Planetários ligados, possuem mais do que duas engrenagens centrais, Figura 3.8.g.

Planetários satélites e planetas, onde as engrenagens dos planetas estão ligados a outro planetário, Figura 3.8.h.

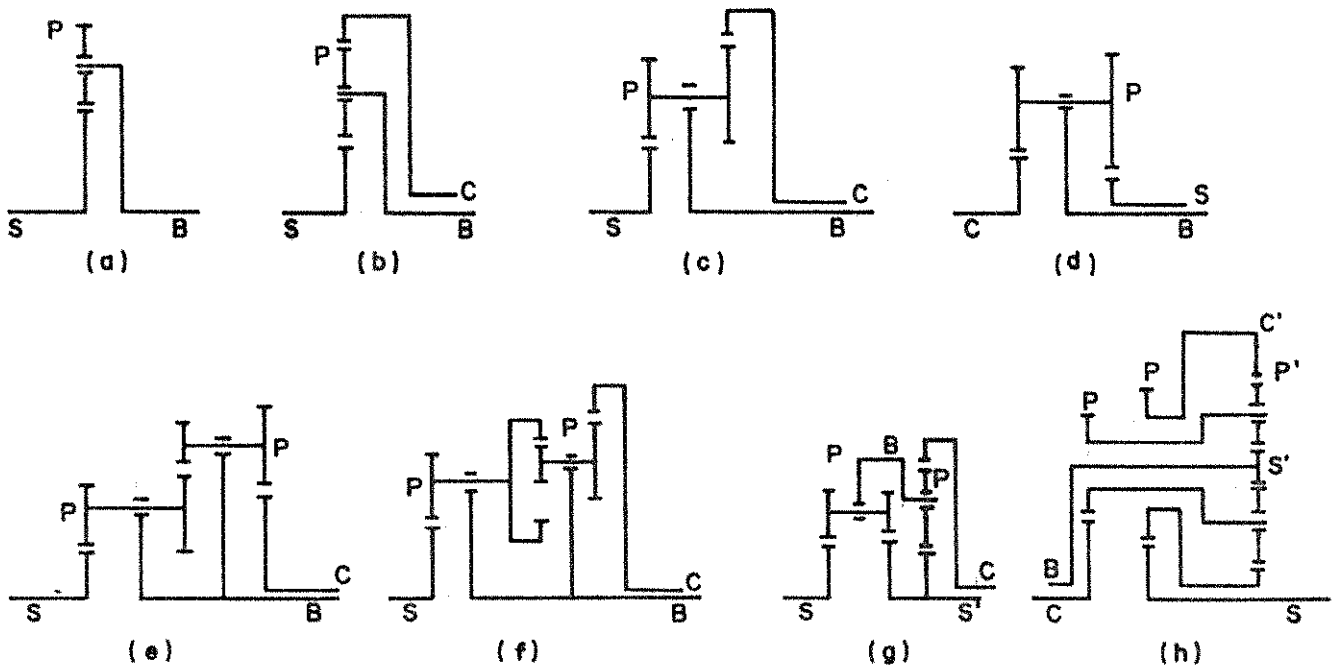


Figura 3.8

Todos os tipos de planetários podem ser obtidos através do T.E.P. simples. Retirando-se uma engrenagem central o T.E.P. simples transforma-se em T.E.P. elementar. O tipo ligado nada mais é que a ligação de dois ou mais T.E.P. simples. E finalmente o T.E.P. satélite e planeta é formado por um planetário simples cujos planetas estão ligados a um outro T.E.P. simples ou elementar.

3.3.1. Relação entre as rotações dos eixos dos planetários

A seguir, vamos deduzir a relação que existe entre as rotações dos eixos de um planetário, Figura 3.9, e apresentar a fórmula geral para os T.E.P. simples.

Utilizaremos a regra da mão direita para representar o vetor rotação de cada engrenagem, considerando positivo o sentido indicado na Figura.

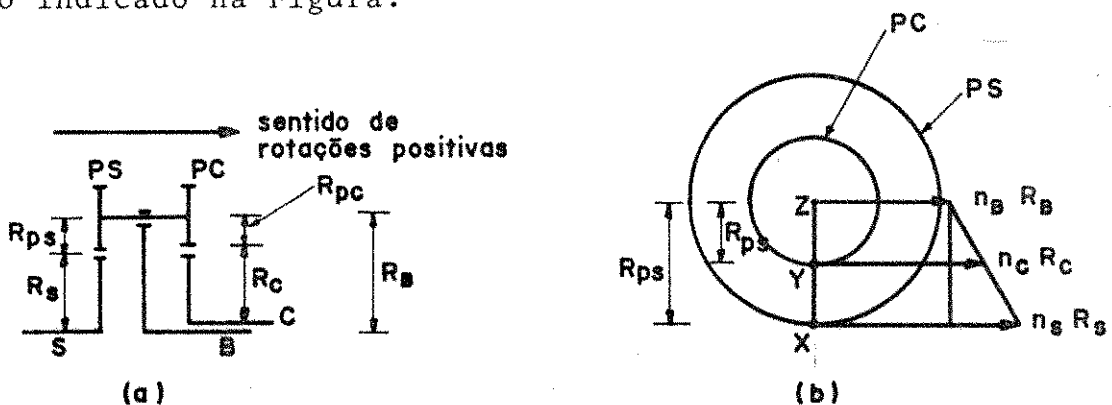


Figura 3.9

Sendo

S = a menor engrenagem central (sol)

C = a maior engrenagem central (coroa)

PS = a engrenagem do planeta em contato com o sol

PC = a engrenagem do planeta em contato com a coroa

B = o suporte do planeta (braço)

$R_S, R_C, R_B, R_{PS}, R_{PC}$ = os raios das engrenagens indicadas nos índices.

X = ponto de contato entre as engrenagens S e PS

Y = ponto de contato entre as engrenagens C e PS

Z = centro dos planetas

Na Figura 3.9.b está representado o planeta do T.E.P. da Figura 3.9.a. As velocidades dos pontos X, Y e Z do planeta são, respectivamente:

$$v_X = n_S R_S \quad (3.53)$$

$$v_Y = n_C R_C \quad (3.54)$$

$$v_Z = n_B R_B \quad (3.55)$$

mas

$$R_B = R_S + R_{PS} = R_C + R_{PC} \quad (3.56)$$

e pela linearidade do campo de velocidades do planeta podemos escrever:

$$\frac{n_S R_S - n_B R_B}{R_{PS}} = \frac{n_C R_C - n_B R_B}{R_{PC}} \quad (3.57)$$

e substituindo (3.56) em (3.57) vem

$$\frac{n_S R_S - n_B R_S - n_B R_{PS}}{R_{PS}} = \frac{n_C R_C - n_B R_C - n_B R_{PC}}{R_{PC}} \quad (3.58)$$

ou

$$(n_S - n_B) \frac{R_S}{R_{PS}} - n_B = (n_C - n_B) \frac{R_C}{R_{PC}} - n_B \quad (3.59)$$

e finalmente

$$\frac{n_C - n_B}{n_S - n_B} = \frac{R_S}{R_C} \cdot \frac{R_{PC}}{R_{PS}} = i_B \quad (3.60)$$

Onde (3.60), a relação entre as rotações dos eixos do planetário, é comumente chamada de razão básica.

Chamando de n'_C e n'_S as rotações da coroa e do sol, respectivamente, relativas ao braço, podemos escrever:

$$i_B = \frac{n'_C}{n'_S} \quad (3.61)$$

sendo

$$\begin{aligned} n'_C &= n_C - n_B \\ n'_S &= n_S - n_B \\ n'_B &= n_B - n_B = 0 \end{aligned}$$

O que significa que a relação entre as rotações da coroa e do sol relativos ao braço é uma constante (3.61) e que esta constante depende apenas da geometria do T.E.P.

Se convencionarmos que o raio de uma engrenagem de dentes internos é negativo, então a expressão da razão básica para o planetário da Figura 3.10 é também (3.60).

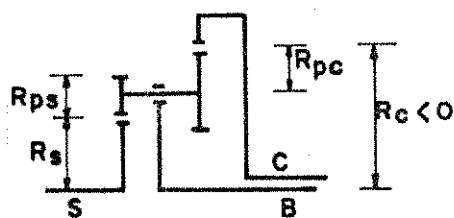


Figura 3.10

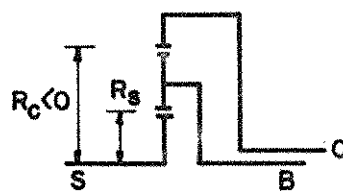


Figura 3.11

Para o T.E.P. da Figura 3.11 podemos usar (3.60) considerando $R_{PS}=R_{PC}$, então neste caso

$$i_B = \frac{R_S}{R_C} < 0 \quad (3.63)$$

Os T.E.P. simples mais complicados são aqueles que possuem dois planetas compostos e emparelhados, Figura 3.8.e, f e Figura 3.12.

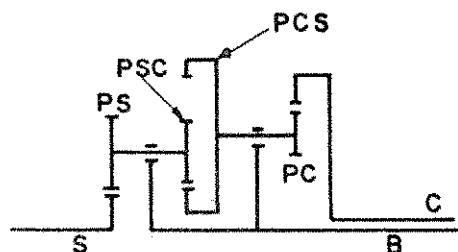


Figura 3.12

Neste caso, a razão básica, cuja demonstração omitiremos, é dada por:

$$i_B = \frac{n_C - n_B}{n_S - n_B} = \frac{R_S \cdot R_{PC} \cdot R_{PSC}}{R_C \cdot R_{PS} \cdot R_{PCS}} \quad (3.64)$$

A expressão (3.64) é a fórmula geral da razão básica para os T.E.P. simples, sendo necessário considerar o sinal algébrico do raio das engrenagens.

É interessante notar que o T.E.P. da Figura 3.12 pode ser reduzido ao da Figura 3.10, bastando fazer $R_{PCS} = -R_{PSC}$, e se ainda fizermos $R_{PC} = R_{PS}$ teremos o T.E.P. da Figura 3.11.

Com relação às rotações, os T.E.P. simples são mecanismos de dois graus de liberdade, isto é, temos que fornecer a velocidade angular de dois eixos para obtermos a rotação do terceiro.

3.3.2. Rendimento básico e relações entre os torques nos eixos dos T.E.P.

Como vimos, os T.E.P. simples possuem duas engrenagens centrais (chamadas, arbitrariamente, de sol e coroa), um ou mais planetas e um braço, que é o suporte dos planetas. Se fixarmos o braço, os centros dos planetas não poderão mais se mover. O T.E.P. funcionará então como um redutor simples, que possui apenas dois eixos externos, um de entrada e outro de saída de potência. A este modo de funcionamento dos T.E.P. chamaremos de modo básico.

Utilizaremos, nesta secção, a convenção de sinais para um sistema (CSUS), explicada no Apêndice A. De acordo com a CSUS a rotação (n) e o torque (M) serão positivos se seus vetores (usando a regra da mão direita) tiverem o sentido igual ao convencionalizado como positivo, Figura 3.13, e a potência (P) será positiva se estiver entrando no sistema.

Uma vez que

$$P = Mn \quad (3.65)$$

a potência positiva ocorrerá quando a rotação e o torque tiverem o mesmo sinal. Assim, na Figura 3.13, teremos:

$$M_S > 0; \quad n_S > 0; \quad P_S > 0$$

$$M_C > 0; \quad n_C < 0; \quad P_C < 0$$

$$M_B < 0; \quad n_B > 0; \quad P_B < 0$$

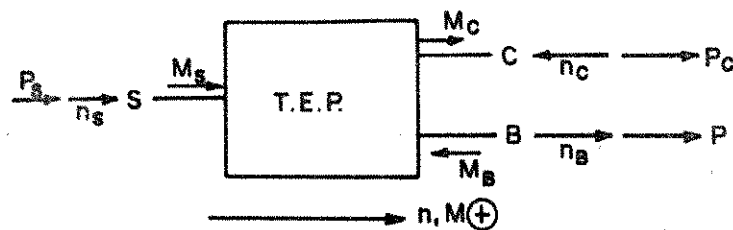


Figura 3.13

Da mesma maneira como foi feito para as rotações, na secção anterior, acrescentaremos uma linha (') às grandezas vistas por um observador que gira com o braço. Assim n'_C , n'_S e n'_B são as rotações relativas ($n'_B = 0$, evidentemente); M'_C , M'_S e M'_B são os torques nos eixos percebidos pelo observador girante e, finalmente, as potenciais P'_C , P'_S e P'_B .

Como em (3.65) podemos escrever:

$$P' = M'n' \quad (3.66)$$

É comum, por simplicidade, desprezar as inércias dos elementos do planetário. Aliás, todos os autores pesquisados procederam desta forma. Neste trabalho faremos a mesma hipótese simplificadora.

Sabemos, da Mecânica, que é nula a soma dos esforços aplicados em um corpo que não possui inércia. Portanto, o cálculo dos esforços passa a ser um problema de estática, não interessando as rotações e acelerações. Sendo assim, teremos:

$$M'_C = M_C; \quad M'_S = M_S \quad \text{e} \quad M'_B = M_B \quad (3.67)$$

O significado de (3.67) é de que os torques, vistos por um observador parado ou em movimento, são os mesmos, quando se despreza as inércias. Porém, as potências serão, em geral, diferentes, ou seja:

$$P'_C \neq P_C; \quad P'_S \neq P_S \quad \text{e} \quad P'_B \neq P_B \quad (3.68)$$

pois

$$n'_C \neq n_C; \quad n'_S \neq n_S \quad \text{e} \quad n'_B \neq n_B \quad (3.69)$$

Vejamos agora o rendimento no modo básico e as relações entre os torques nos eixos dos T.E.P. simples.

Supondo que um planetário esteja funcionando no modo básico, então, ou o fluxo de potência entra pelo sol e sai pela coroa ou o contrário. Já que $P'_B = 0$ devido a $n'_B = 0$. Supondo inicialmente que a potência entra pelo sol, o rendimento η_B será:

$$\eta_B = - \frac{P'_C}{P'_S} \quad (3.70)$$

No entanto, caso a potência entre pela coroa:

$$\eta_B = - \frac{P'_S}{P'_C} \quad (3.71)$$

Da mesma maneira que foi feito em (3.31) podemos sintetizar (3.70) e (3.71) em (3.72):

$$\eta_B^G = - \frac{P'_C}{P'_S} \quad (3.72)$$

sendo que

$$G = +1 \text{ quando } P'_S = M_S(n_S - n_B) > 0 \quad (3.72.a)$$

$$\text{e } G = -1 \text{ quando } P'_S = M_S(n_S - n_B) < 0$$

O rendimento básico η_B pode ser considerado constante, assim como o rendimento de um redutor simples.

Substituindo (3.66) e (3.67) em (3.72) vem:

$$\eta_B^G = - \frac{M_C n'_C}{M_S n'_S} \quad (3.73)$$

e utilizando (3.61) ficamos com

$$\eta_B^G = - \frac{M_C}{M_S} i_B \quad (3.74)$$

ou

$$\frac{M_C}{M_S} = - \frac{\eta_B^G}{i_B} \quad (3.75)$$

Mais adiante será mostrado que:

$$M_S + M_C + M_B = 0 \quad (3.76)$$

substituindo-se (3.75) em (3.76) teremos:

$$M_S - \eta_B^G \frac{M_S}{i_B} + M_B = 0$$

e então

$$\frac{M_B}{M_S} = \frac{\eta_B^G}{i_B} - 1 \quad (3.77)$$

de (3.75) e (3.77) vem

$$\frac{M_B}{M_C} = \frac{i_B}{\eta_B^G} - 1 \quad (3.78)$$

As expressões (3.75), (3.77) e (3.78) são as relações procuradas entre os torques nos eixos dos planetários. Como podemos ver, basta o conhecimento de um torque para se determinar os outros dois.

3.3.3. Rendimentos e perdas dos T.E.P.

O fato de estarmos desprezando as inércias dos elementos do T.E.P. tem as seguintes implicações:

- a) a energia cinética do T.E.P. é, constantemente, nula;
- b) toda a energia que entra deverá sair, uma vez que os elementos do planetário não têm a capacidade de variar sua energia.

Assim, utilizando a CSUS*, podemos escrever:

$$P_S + P_C + P_B + P_L = 0 \quad (3.79)$$

onde,

P_S = potência no eixo S

P_C = potência no eixo C

* CSUS = convenção de sinais para um sistema, ver Apêndice A.

P_B = potência no eixo B

P_L = potência perdida, sempre negativa, pois sai do T.E.P.

Na Tabela 3.3 estão representadas as seis possibilidades, quanto aos sinais das potências nos eixos.

Tabela 3.3

P_S	P_C	P_B
+	-	-
-	+	-
-	-	+
+	+	-
+	-	+
-	+	+

Para efeito de análise, vamos considerar apenas um, dentre os possíveis conjuntos de sinais das potências, uma vez que as demais análises são efetuadas de forma totalmente análoga.

Seja, por exemplo, o caso em que*:

$$P_S > 0; \quad P_C < 0; \quad P_B < 0 \quad (3.80)$$

Então, de acordo com (3.80) a potência entra pelo eixo S e sai pelos eixos C e B, Figura 3.14.

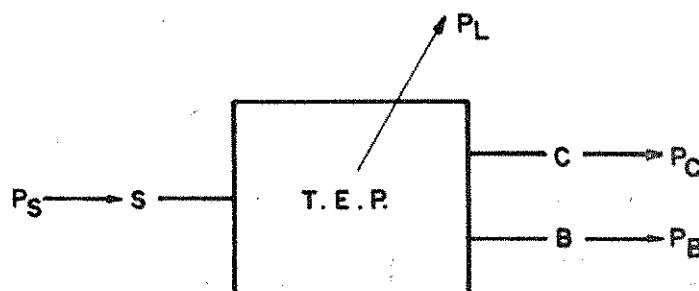


Figura 3.14

* Até o final desta seção só analisaremos a situação correspondente a (3.80).

Vamos considerar dois observadores, um parado e outro girando juntamente com o braço do T.E.P. Da mesma maneira como já foi feito, acrescentaremos uma linha (') às grandezas vistas pelo observador móvel.

O rendimento do planetário (no caso considerado) percebido pelo observador fixo é:

$$\eta_{S \rightarrow B}^C = \frac{-(P_C + P_B)}{P_S} = \frac{-(M_C n_C + M_B n_B)}{M_S n_S} \quad (3.81)$$

A notação $S \rightarrow B^C$ indica que a potência entra pelo sol e sai pela coroa e pelo braço.

Para o observador girante, o planetário está funcionando no modo básico e seu rendimento, conforme já visto, é:

$$\eta_B = \frac{-P'_C}{P'_S} = \frac{-M_C n'_C}{M_S n'_S} = \frac{-M_C (n_C - n_B)}{M_S (n_S - n_B)} \quad (3.82)$$

A expressão (3.82) é análoga a (3.81) uma vez que $P'_B=0$.

Sabemos que as potências nos eixos, quando observadas por um referencial fixo, são diferentes das percebidas pelo referencial girante. Isto porque as rotações são diferentes. Porém, como veremos a seguir, a potência perdida pelo T.E.P. é a mesma para ambos os observadores.

A potência perdida no modo básico, observada pelo referencial girante com o braço, é:

$$P'_L = P'_S (1 - \eta_B) = M_S n'_S (1 - \eta_B) \quad (3.83)$$

Para o modo geral (não básico), percebido por um observador fixo, teremos:

$$P_L = P_S (1 - \eta_{S \rightarrow B}^C) = M_S n_S (1 - \eta_{S \rightarrow B}^C) \quad (3.84)$$

Utilizando (3.81) e (3.62) podemos escrever:

$$\eta_{S \rightarrow B}^C = \frac{-M_C (n'_C + n_B) + M_B n_B}{M_S (n'_S + n_B)} \quad (3.85)$$

ou ainda,

$$\eta_{S \rightarrow B}^C = \frac{-M_C n'_C - (M_C + M_B) n_B}{M_S (n'_S + n_B)} \quad (3.86)$$

e substituindo (3.78) e (3.75) em (3.86) vem:

$$\eta_{S \rightarrow B}^C = \frac{-M_C n'_C - \left[M_C + M_C \left(\frac{i_B}{\eta_B} - 1 \right) \right] n_B}{-M_C \frac{i_B}{\eta_B} (n'_S + n_B)} \quad (3.87)$$

e cancelando-se M_C

$$\eta_{S \rightarrow B}^C = \frac{n'_C + \frac{i_B}{\eta_B} n_B}{\frac{i_B}{\eta_B} (n'_S + n_B)} \quad (3.88)$$

ou

$$\eta_{S \rightarrow B}^C = \frac{\eta_B n'_C + i_B n_B}{i_B (n'_S + n_B)} \quad (3.89)$$

e finalmente:

$$\eta_{S \rightarrow B}^C = \frac{\eta_B n_C + (i_B - \eta_B) n_B}{i_B n_S} \quad (3.90)$$

Vê-se, portanto, que ao contrário de η_B , o $\eta_{S \rightarrow B}^C$ depende das rotações dos eixos. O que significa que o rendimento no modo de funcionamento geral não é constante.

Substituindo (3.89) em (3.84) teremos:

$$P_L = M_S n_S \left[1 - \frac{\eta_B n'_C + i_B n_B}{i_B (n'_S + n_B)} \right] \quad (3.91)$$

e utilizando, novamente, (3.62):

$$P_L = M_S (n'_S + n_B) \left[1 - \frac{\eta_B n'_C + i_B n_B}{i_B (n'_S + n_B)} \right] \quad (3.92)$$

e

$$P_L = M_S (n'_S + n_B) - M_S \left(\frac{\eta_B n'_C}{i_B} + n_B \right) \quad (3.93)$$

usando a definição de i_B , (3.61):

$$P_L = M_S (n'_S + n_B) - M_S (\eta_B n'_S + n_B)$$

e finalmente

$$P_L = M_S n'_S (1 - \eta_B) \quad (3.94)$$

Como podemos ver, os lados direitos de (3.94) e (3.83) são idênticos. Portanto podemos escrever:

$$P_L = P'_L \quad (3.95)$$

O que significa que a potência perdida é a mesma, entre os modos básico e não básico, apesar dos rendimentos serem diferentes.

Este resultado pode ser melhor compreendido se observarmos que as perdas se devem ao movimento* de rolamento dos planetas sobre as engrenagens centrais.

Podemos classificar a potência transmitida, através do T.E.P., em potência de rolamento e potência de acoplamento.

Quando todos os elementos do T.E.P. estiverem girando a mesma rotação, o planetário se moverá como um corpo rígido, sem rolamento dos planetas sobre as engrenagens centrais e, também, conseqüentemente, sem perdas. Neste caso dizemos que a potência transmitida é de acoplamento puro.

Quanto a potência é transmitida apenas pelo rolamento dos planetas, sem que seus centros se desloquem, dizemos que esta potência é de rolamento puro.

* As perdas nos mancais podem ser desprezadas pois não há forças aplicadas sobre eles.

No modo básico há apenas transmissão de potência de rolamento, porém, no caso geral o T.E.P. não funciona nem do modo básico nem como um corpo rígido, o que significa que há transmissão de potência das duas formas.

A potência em cada eixo pode então ser considerada como uma soma dos dois tipos:

$$\begin{aligned} P_S &= P'_S + P''_S \\ P_C &= P'_C + P''_C \\ P_B &= P'_B + P''_B \\ P_L &= P'_L + P''_L \end{aligned} \tag{3.96}$$

A primeira das parcelas é a potência de rolamento (P') e a outra a de acoplamento (P''). Para o observador girando com o braço, os centros de todas as engrenagens não possuem movimento e portanto as potências, por ele percebidas, são de rolamento puro.

As expressões (3.96) podem ser escritas na forma:

$$M_S n_S = M_S (n_S - n_B) + M_S n_B = M_S n'_S + M_S n_B$$

$$M_C n_C = M_C (n_C - n_B) + M_C n_B = M_C n'_C + M_C n_B$$

$$M_B n_B = M_B (n_B - n_B) + M_B n_B = M_B n'_B + M_B n_B$$

Mas $n'_B = 0$ e portanto $P'_B = 0$, também.

De acordo com (3.95) podemos afirmar que:

$$P''_L = 0 \tag{3.97}$$

Conseqüentemente podemos reescrever (3.96) da seguinte forma:

$$\begin{aligned} P_S &= P'_S + P''_S \\ P_C &= P'_C + P''_C \\ P_B &= 0 + P''_B \\ P_L &= P'_L + 0 \end{aligned} \tag{3.96.a}$$

Pelas mesmas razões que pudemos escrever (3.79) podemos afirmar que

$$P'_S + P'_C + P'_L = 0 \quad (3.98)$$

Portanto,

$$P''_S + P''_C + P''_B = 0 \quad (3.99)$$

A expressão (3.99) indica, o fato já visto, que não há perdas na potência de acoplamento.

De (3.99) vem:

$$M_S n_B + M_C n_B + M_B n_B = 0 \quad (3.100)$$

e finalmente a expressão já utilizada em (3.76):

$$M_S + M_C + M_B = 0 \quad (3.101)$$

3.3.4. Posições dos eixos no T.E.P. em relação ao sistema

A relação básica (i_B) e o rendimento (η_B) caracterizam o T.E.P.; no entanto, é necessário, também, indicar a posição do planetário em relação ao sistema. Isto é, precisamos saber qual dos eixos X, Y e Z (Figura 3.15) é o sol, a coroa e o braço.

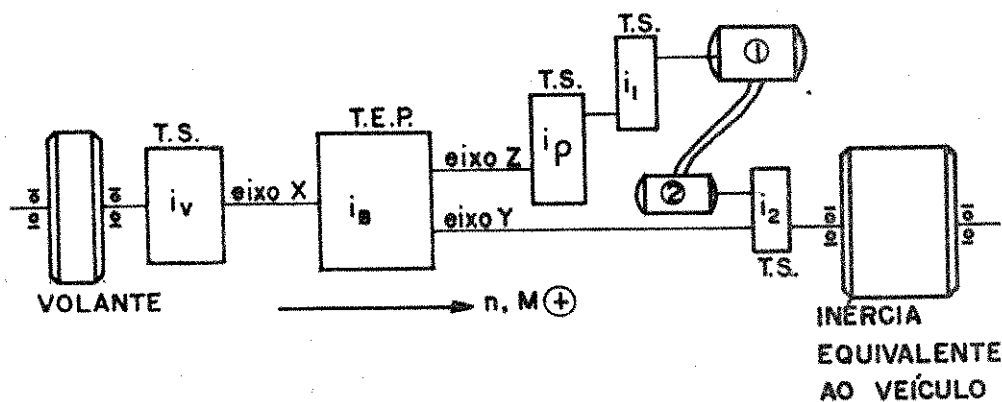


Figura 3.15

Hã seis maneiras de se ligar um dado planetário ao sistema. Na Tabela 3.4 estão, ao lado da definição dos eixos, as relações entre os torques e a relação básica.

A tabela foi construída considerando sempre as expressões (3.75), (3.77), (3.78) e (3.60). Os números da primeira coluna (JPL) serão utilizados para referenciar as posições definidas na coluna seguinte.

TABELA 3.4

JPL	DEFINIÇÃO	$\frac{M_Z}{M_X}$	$\frac{M_Y}{M_X}$	$\frac{M_Y}{M_Z}$	G = 1 quando	i_B
1	X = S Y = B Z = C	$\frac{-\eta_B^G}{i_B}$	$\frac{\eta_B^G}{i_B} - 1$	$\frac{i_B}{\eta_B^G} - 1$	$M_X(n_X - n_Y) > 0$	$\frac{n_Z - n_Y}{n_X - n_Y}$
2	X = B Y = S Z = C	$(\frac{i_B}{\eta_B^G} - 1)^{-1}$	$(\frac{\eta_B^G}{i_B} - 1)^{-1}$	$\frac{-i_B}{\eta_B^G}$	$M_Y(n_Y - n_X) > 0$	$\frac{n_Z - n_X}{n_Y - n_X}$
3	X = C Y = S Z = B	$\frac{i_B}{\eta_B^G} - 1$	$\frac{-i_B}{\eta_B^G}$	$(\frac{\eta_B^G}{i_B} - 1)$	$M_Y(n_Y - n_Z) > 0$	$\frac{n_X - n_Z}{n_Y - n_Z}$
4	X = B Y = C Z = S	$(\frac{\eta_B^G}{i_B} - 1)^{-1}$	$(\frac{i_B}{\eta_B^G} - 1)^{-1}$	$\frac{-\eta_B^G}{i_B}$	$M_Z(n_Z - n_X) > 0$	$\frac{n_Y - n_X}{n_Z - n_X}$
5	X = C Y = B Z = S	$\frac{-i_B}{\eta_B^G}$	$\frac{i_B}{\eta_B^G} - 1$	$\frac{\eta_B^G}{i_B} - 1$	$M_Z(n_Z - n_Y) > 0$	$\frac{n_X - n_Y}{n_Z - n_Y}$
6	X = S Y = C Z = B	$\frac{\eta_B^G}{i_B} - 1$	$\frac{-\eta_B^G}{i_B}$	$(\frac{i_B}{\eta_B^G} - 1)^{-1}$	$M_X(n_X - n_Z) > 0$	$\frac{n_Y - n_Z}{n_X - n_Z}$

sendo M_X , M_Y e M_Z = os torques nos eixos X, Y e Z respectivamente, na CSUS

n_X , n_Y e n_Z = as rotações nos eixos X, Y e Z.

3.4. CARACTERÍSTICAS DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS

As máquinas elétricas desempenham um papel muito importante no controle do fluxo da potência do sistema, conforme veremos no Capítulo 5. Sendo assim, examinaremos, nesta secção, alguns aspectos destas máquinas.

O veículo possui duas máquinas elétricas de corrente contínua (Figura 3.15), sendo que, ora uma funciona como gerador e a outra como motor, ora o inverso. Há instantes, também, em que ambas as máquinas estão funcionando como motor.

Na Figura 3.16 está representada uma máquina elétrica de corrente contínua, onde:

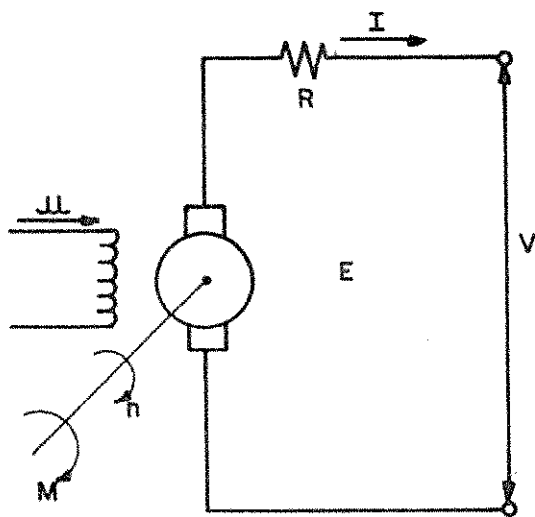


Figura 3.16

I = corrente de armadura (A)

R = resistência de armadura (Ω)

u = corrente de campo (A)

E = força eletromotriz (V)

V = tensão nos terminais da armadura (V)

M = torque, externo, aplicado no eixo da máquina (Nm)

n = rotação da máquina (rad/s)

Como já dissemos, a mesma máquina pode funcionar como motor ou gerador. Quando é operada como motor, a potência elétrica (VI) entra através dos terminais da armadura e sai pelo eixo na forma mecânica (Mn). No funcionamento como gerador entra potência mecânica pelo eixo (Mn) e sai potência na forma elétrica (VI) através dos terminais da armadura. Portanto, para a máquina funcionar como motor é necessário que a tensão nos terminais da armadura (V) seja maior que a força contra-eletromotriz (E). E para o funcionamento como gerador é preciso que a força eletromotriz (E) seja maior que a tensão nos terminais de armadura (V).

Podemos, então, escrever

$$\text{para o motor (V>E): } V = E + RI \quad (3.102)$$

$$\text{e para o motor (E>V): } V = E - RI \quad (3.103)$$

Sendo que o produto RI é a queda de tensão na armadura (lei de Ohm).

Na bibliografia sobre máquinas elétricas [4] encontram-se as seguintes relações entre as grandezas M, n, E, I e u descritas acima:

$$M = f(u) \cdot I \quad (3.104)$$

$$E = f(u) \cdot n \quad (3.105)$$

sendo f(u) uma função crescente com a corrente de campo u e proporcional ao fluxo magnético no interior da máquina. Representaremos o valor desta função pela letra f, assim:

$$f = f(u) \quad (3.106)$$

A dependência de f com a corrente de campo u é obtida experimentalmente. A Figura 3.17 mostra esta curva para as máquinas elétricas utilizadas no Laboratório GĒPROM, do Departamento de Engenharia Mecânica da UNICAMP, para a simulação em laboratório do sistema que pretendemos simular no computador.

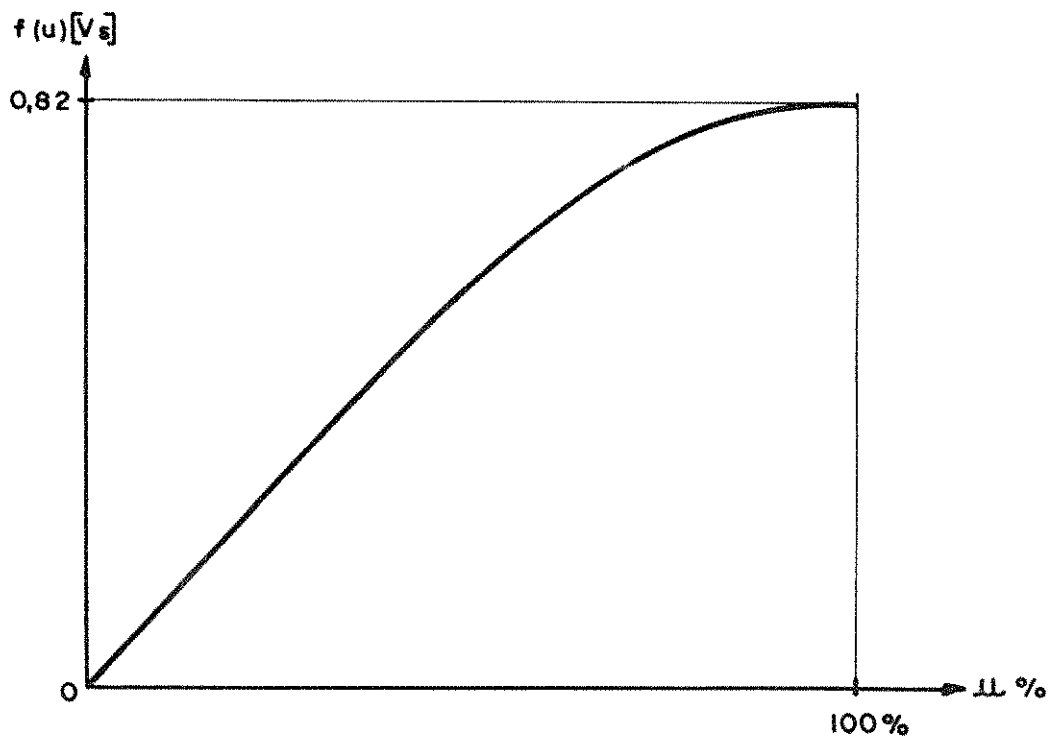


Figura 3.17

A unidade de f é volt.segundo (Vs) e u aparece em percentagem da corrente máxima. A corrente de armadura máxima, para estas máquinas é de 90A, e a resistência de armadura é $0,22\Omega$.

Utilizaremos o índice 1 para as grandezas referentes à máquina 1 e o índice 2 para os valores pertinentes à máquina 2. Então:

$$f_1 = f(u_1) \quad (3.107)$$

$$f_2 = f(u_2) \quad (3.108)$$

e também:

$$M_1 = f_1 I_1 \quad (3.109)$$

$$M_2 = f_2 I_2 \quad (3.110)$$

e

$$E_1 = f_1 n_1 \quad (3.111)$$

$$E_2 = f_2 n_2 \quad (3.112)$$

Na fase de aceleração do veículo, a máquina 1 funciona como gerador e a máquina 2 como motor, então, de (3.102), (3.103), (3.111) e (3.112) e considerando que a resistência de armadura de ambas as máquinas é a mesma, teremos:

$$V_1 = f_1 n_1 - RI_1 \quad (3.113)$$

e

$$V_2 = f_2 n_2 + RI_2 \quad (3.114)$$

Quando a corrente I_1 for negativa a máquina 1 estará funcionando como motor e, analogamente, quando I_2 for negativa a máquina 2 estará funcionando como gerador.

A seguir, explicitaremos as limitações das grandezas elétricas mencionadas.

A corrente de armadura de cada máquina deve ser menor ou igual à corrente máxima:

$$|I_1| \leq I_{\max} \quad \text{e} \quad |I_2| \leq I_{\max} \quad (3.115)$$

Da mesma maneira, a corrente de campo, e portanto o fluxo magnético, deve ser:

$$f_1 \leq f_{\max} \quad \text{e} \quad f_2 \leq f_{\max} \quad (3.116)$$

O fluxo magnético das máquinas (f_1 e f_2) é considerado sempre, positivo.

Para o motor existe também a seguinte restrição:

$$f_{\text{motor}} \geq f_{\text{base}} \quad (3.117)$$

sendo f_{base} uma característica da máquina elétrica.

Além das correntes, há limitações nas tensões nos terminais das armaduras:

$$V_1 \leq V_{\max} \quad \text{e} \quad V_2 \leq V_{\max} \quad (3.118)$$

Estas limitações serão consideradas na simulação.

As máquinas elétricas do veículo em estudo estão ligadas eletricamente, como indica a Figura 3.18.

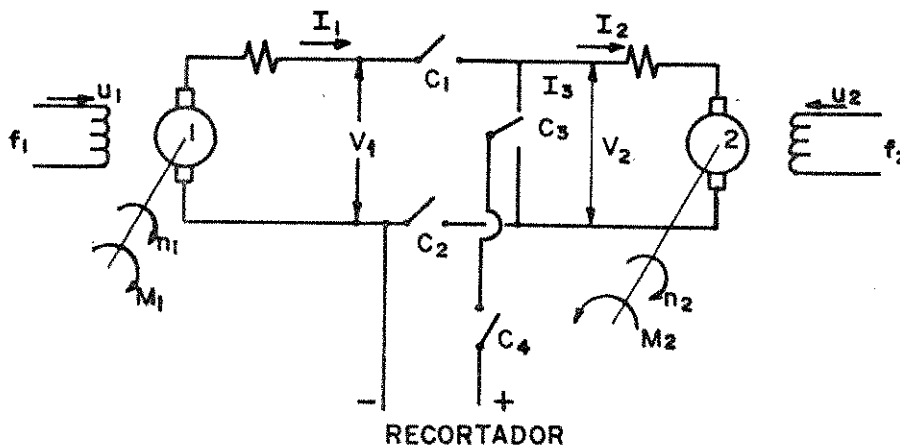


Figura 3.18

As diversas possibilidades para as posições das chaves C_1 , C_2 , C_3 e C_4 estão indicadas na Tabela 3.5, sendo

- F = fechada
- A = aberta
- S = superior
- I = inferior
- L = linha na tabela
- = indiferente

Tabela 3.5

L	C_1	C_2	C_3	C_4
1	F	F	-	A
2	F	F	S	F
3	F	A	I	F
4	F	A	S	F
5	A	F	S	F

Quando a configuração das chaves corresponde à 1a. linha (L=1) da Tabela 3.5, não haverá introdução de energia externa pois a chave do recortador (C_4) está aberta. Estando C_1 e C_2 fechada teremos:

$$V_1 = V_2$$

e

$$I_1 = I_2$$

Porém, para a posição das chaves indicada na 2a.linha (L=2) da tabela poderá haver introdução de energia externa pois C_4 está fechada. Nesta situação, o recortador está ligado em paralelo com as máquinas e:

$$V_1 = V_2$$

e

$$I_2 = I_1 + I_3$$

A corrente I_3 é introduzida pelo recortador e não pode ser negativa.

Para L=3 há, também, introdução de energia através do recortador que está ligado em série com as máquinas elétricas, então

$$V_1 = V_2 + U$$

e

$$I_1 = I_2$$

Esta configuração será utilizada nas fases finais da aceleração e da frenagem do veículo.

A ligação correspondente a L=4 equivale a desligar a máquina 2, então:

$$V_2 = 0$$

$$I_2 = 0$$

Analogamente, $L=5$ equivale a desligar a máquina 1 e, então:

$$V_1 = 0$$

$$I_1 = 0$$

Podemos sintetizar as situações onde ambas as máquinas estão ligadas ($L=1, 2$ e 3) com as relações abaixo:

$$V_1 = V_2 + U \quad (3.119)$$

$$I_2 = I_1 + I_3 \quad (3.120)$$

$$U \cdot I_3 = 0 \quad (3.121)$$

Sendo que, para

$$U = 0 \quad \text{e} \quad I_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad L = 1 \quad (\text{Não há introdução de energia})$$

$$U = 0 \quad \text{e} \quad I_3 \neq 0 \quad \Rightarrow \quad L = 2 \quad (\text{Há introdução de energia})$$

$$U \neq 0 \quad \text{e} \quad I_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad L = 3 \quad (\text{Há introdução de energia})$$

Para se evitar os picos de solicitação de energia externa faz-se a seguinte restrição para a corrente I_3 :

$$I_3 \leq I_{30} \quad (3.122)$$

onde

$$I_{30} = i_I I_{\max} \quad (3.123)$$

sendo i_I = uma constante menor que a unidade.

Quando $U=0$ teremos $V_1 = V_2 = V$ e de (3.113) e (3.114) vem:

$$f_1 n_1 - RI_2 = V = f_2 n_2 + RI_2 \quad (3.124)$$

Esta equação será muito usada na simulação e no controle da operação do veículo, conforme veremos no Capítulo 5.

EQUAÇÕES DO MOVIMENTO

Neste capítulo vamos interligar as diversas partes do sistema para obter as equações dinâmicas do movimento.

Na Figura 4.1 representamos o sistema, indicando as rotações, os momentos e as potências em todos os eixos.

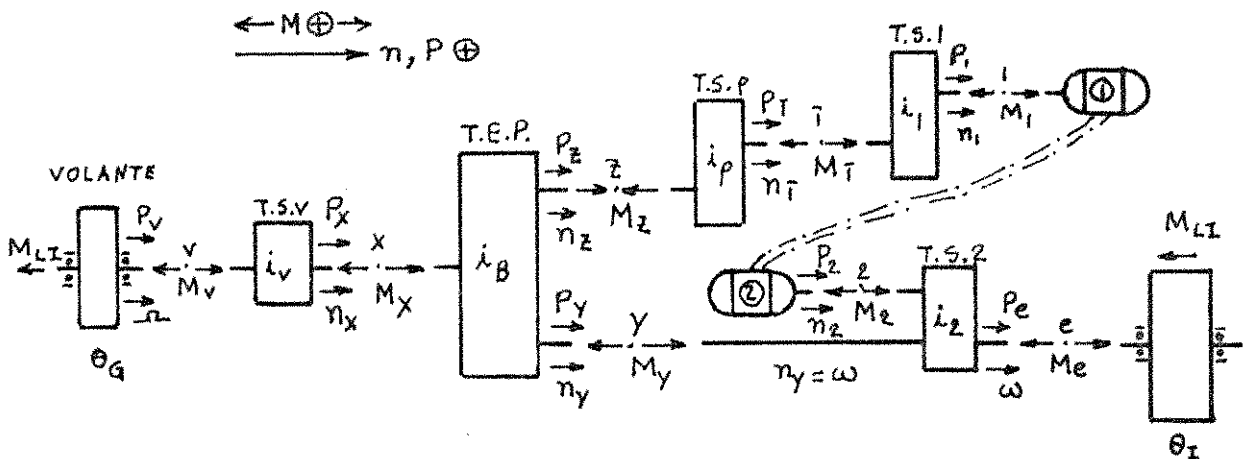


Figura 4.1

- sendo
- θ_G = inércia do volante (kgm^2)
 - θ_I = inércia equivalente ao veículo (kgm^2), definida em (3.36)
 - i_V, i_B, i_P, i_1, i_2 = relações das transmissões
 - $\Omega, n_X, n_Z, n_T, n_1, n_Y$ = rotações dos eixos (rad/s)
 - $M_V, M_X, M_Z, M_Y, M_T, M_1, M_2, M_e$ = torque nos eixos (Nm)
 - M_{LG} = momento resistivo no volante, definido em (3.50)
 - M_{LI} = momento resistivo equivalente, devido às perdas externas ao veículo, definido em (3.39)
 - $P_V, P_X, P_Z, P_Y, P_T, P_1, P_2, P_e$ = potência nos eixos

É necessário adotarmos uma convenção de sinais para as rotações, torques e potências nos eixos. No Apêndice A está descrito duas possíveis convenções de sinais. Neste capítulo se

rã utilizada a CSMS, convenção de sinais para múltiplos sistemas. De acordo com a CSMS escolhemos o sentido da esquerda para direita como positivo para as rotações e potências nos eixos e para os torques chamamos de positivo aqueles cujos vetores (ação e reação) forem divergentes, conforme indicado na Figura 4.1.

As únicas inércias consideradas são a do volante e a equivalente ao veículo. Sendo assim, teremos duas equações dinâmicas, uma para cada inércia.

4.1. EQUAÇÃO DO MOVIMENTO DO VOLANTE

A rotação do volante será sempre no mesmo sentido, pois não é interessante que a energia ($\frac{1}{2} \theta_G \dot{\Omega}^2$) acumulada no volante caia a zero. O sentido tanto poderá ser concordante como discordante do convencionalizado como positivo, indicado na Figura 4.1. No entanto, por simplicidade, vamos admitir que a rotação do volante é positiva.

A equação do movimento do volante é:

$$\theta_G \dot{\Omega} = -M_V - M_{LG} \quad (4.1)$$

sendo θ_G = inércia do volante (kgm^2)

$\dot{\Omega}$ = aceleração angular do volante (rad/s^2)

M_V = torque no eixo V (Nm)

M_{LG} = torque que se opõe à rotação do volante devido aos atritos com o ar e com os mancais (Nm)

Como vimos em (3.50) o valor de M_{LG} pode ser considerado como sendo da forma:

$$M_{LG} = M_{LG\max} \left(\frac{\Omega}{\Omega_{\max}} \right)^\alpha \quad (4.2)$$

O primeiro sinal negativo de (4.1) deve-se ao fato de que quando M_V for positivo (de acordo com a CSMS) o volante estará desacelerando, $\dot{\Omega} < 0$. A razão do outro sinal negativo é que o torque resistivo é sempre contrário à rotação.

A equação (4.1) é a equação do movimento do volante

em termos do torque no eixo V, Figura 4.1. Porém M_V é consequência do torque no eixo da máquina elétrica 1, como veremos mais adiante. É importante que as equações do movimento das inércias sejam expressas em termos dos torques nos eixos das máquinas elétricas porque sobre estes é que temos controle. Sendo assim, vamos procurar relacionar M_V e M_1 . Este último é o torque no eixo da máquina 1.

a) Para a transmissão simples V, (T.S.V.)

A relação de transmissão i_V é definida por:

$$i_V = \frac{n_X}{\Omega} \quad (4.3)$$

sendo Ω = velocidade angular do volante (rad/s)

n_X = velocidade angular do eixo X (rad/s)

O valor de i_V será positivo se Ω e n_X tiverem o mesmo sinal, caso contrário será negativo.

O rendimento desta transmissão é dado por:

$$\eta_V^\epsilon = \frac{P_X}{P_V} = \frac{M_X n_X}{M_V \Omega} = \frac{M_X i_V}{M_V} \quad (4.4)$$

com P_X = potência no eixo X

P_V = potência no eixo X

M_X = torque no eixo X

$\epsilon = +1$ quando $P_V > 0$ (CSMS) e $\epsilon = -1$ se $P_V < 0$.

Então

$$M_V = \frac{M_X \cdot i_V}{\eta_V^\epsilon} \quad (4.5)$$

b) Para o trem de engrenagem planetário (T.E.P.)

No capítulo anterior deduzimos as relações entre os torques nos eixos X, Y, Z do planetário, Tabela 3.4. Porém, foi

utilizada a CSUS e aqui nos interessa utilizar a CSMS. Para evitar confusões, vamos representar os torques pela letra T quando estiverem na CSUS e pela letra M quando estiverem de acordo com a CSMS. Assim, da simples observação da Figura 4.1, podemos escrever:

$$\begin{aligned} M_X &= T_X \\ M_Y &= -T_Y \\ M_Z &= -T_Z \end{aligned} \quad (4.6)$$

Na tabela 3.4 estão indicados os valores de $\frac{T_Z}{T_X}$, $\frac{T_Y}{T_X}$ e $\frac{T_Y}{T_Z}$. De acordo com (4.6) teremos

$$\frac{M_Z}{M_X} = - \frac{T_Z}{T_X} = ZX \quad (4.7)$$

e

$$\frac{M_Y}{M_X} = - \frac{T_Y}{T_X} = YX \quad (4.8)$$

e finalmente,

$$\frac{M_Y}{M_Z} = \frac{T_Y}{T_Z} = YZ \quad (4.9)$$

Os valores de ZX, YX e YZ, definidos por (4.7), (4.8) e (4.9) respectivamente, dependem da relação básica (i_B), do rendimento η_B , do sentido do fluxo da potência de rolamento e da posição dos eixos do TEP em relação ao sistema (JPL). Na Tabela 4.1, apresentada mais adiante, mostraremos como calcular ZX, YX e YZ levando-se em consideração todos estes fatores.

c) Para a transmissão simples ρ (T.S. ρ)

A relação de transmissão i_ρ é:

$$i_\rho = \frac{n_1}{n_2} \quad (4.10)$$

sendo $n_{\bar{1}}$ = rotação do eixo $\bar{1}$ (rad/s).

O rendimento da transmissão η_{ρ} é:

$$\eta_{\rho}^{\sigma} = \frac{P_{\bar{1}}}{P_Z} = \frac{M_{\bar{1}} n_{\bar{1}}}{M_Z n_Z} = \frac{M_{\bar{1}} i_{\rho}}{M_Z} \quad (4.11)$$

sendo $P_{\bar{1}}$ = potência no eixo $\bar{1}$

P_Z = potência no eixo Z

$\sigma = +1$ se $P_Z > 0$ e $\sigma = -1$ se $P_Z < 0$ (CSMS)

Então de (4.11) teremos:

$$M_Z = \frac{M_{\bar{1}} \cdot i_{\rho}}{\eta_{\rho}^{\sigma}} \quad (4.12)$$

d) Para a transmissão simples 1 (T.S.1)

A relação de transmissão i_1 é definida por:

$$i_1 = \frac{n_1}{n_{\bar{1}}} \quad (4.13)$$

sendo n_1 = a rotação do eixo da máquina 1.

Rendimento da transmissão η_1 :

$$\eta_1^{\sigma} = \frac{P_1}{P_{\bar{1}}} = \frac{M_1 n_1}{M_{\bar{1}} n_{\bar{1}}} = \frac{M_1 i_1}{M_{\bar{1}}} \quad (4.14)$$

sendo P_1 = a potência no eixo da máquina 1

$\sigma = 0$ expoente é o mesmo de (4.11) pois $P_1 \cdot P_Z > 0$.

Então:

$$M_{\bar{1}} = \frac{M_1 i_1}{\eta_1^{\sigma}} \quad (4.15)$$

E, finalmente, substituindo-se em (4.1) as expressões (4.2), (4.5), (4.7), (4.12) e (4.15) teremos:

$$\theta_G \dot{\Omega} = - \frac{M_1 i_1 i_V}{Z_X \eta_V^\epsilon \eta_\rho^\sigma \eta_1^\sigma} - M_{LGmax} \left(\frac{\Omega}{\Omega_{max}} \right)^\alpha \quad (4.16)$$

A equação (4.16) é a equação do movimento do volante em termos do torque da máquina 1 (M_1).

Vejamos agora, na Tabela 4.1, como calcular os valores de ZX, YX e YZ. Esta tabela foi construída a partir da Tabela 3.4 da seguinte maneira:

- i) as colunas ZX e YX equivalem às da Tabela 3.4 com o sinal trocado, de acordo com (4.7) e (4.8).
- ii) a coluna YZ é a mesma da Tabela 3.4 conforme (4.9).
- iii) a coluna seguinte equivale à da Tabela 3.4 utilizando-se (4.3) e $n_Y = \omega$.
- iv) a última coluna é obtida da anterior escrevendo-se os torques (T_X , T_Y e T_Z) em função do torque M_1 , no eixo da máquina 1, e das relações de transmissão i_1 , i_ρ e i_B . Além disso, eliminamos a rotação n_Z .

Vejamos, com um exemplo, mais detalhes sobre a construção da última coluna da Tabela 4.1.

De (4.7) temos:

$$T_X = - \frac{T_Z}{Z_X} = \frac{M_Z}{Z_X}$$

e substituindo M_Z por (4.12) e (4.15) vem

$$T_X = \frac{M_1 i_1 i_\rho}{Z_X \eta_1^\sigma \eta_\rho^\sigma} \quad (4.17)$$

Para decidir se $G=1$ ou $G=-1$ só interessa o sinal do fluxo de potência (na CSUS). Então, usaremos a notação s para indicar que duas grandezas tem o mesmo sinal, podendo ter mōdu-

Tabela 4.1. Relações entre os torques nos eixos X, Y e Z na CSMS

JPE	DEFINIÇÃO	$ZX = \frac{M_Z}{M_X}$	$YX = \frac{M_Y}{M_X}$	$YZ = \frac{M_Y}{M_Z}$	G = 1 quando	também G = 1 quando
1	X = S Y = B Z = C	$\frac{\eta_B^G}{i_B}$	$1 - \frac{\eta_B^G}{i_B}$	$\frac{i_B}{G} - 1$	$T_X(i_V \Omega - \omega) > 0$	$M_1 i_1 i_\rho i_B (i_V \Omega - \omega) > 0$
2	X = B Y = S Z = C	$(1 - \frac{i_B}{G})^{-1} \frac{i_B}{\eta_B^G}$	$(1 - \frac{\eta_B^G}{i_B})^{-1}$	$\frac{i_B}{G} - \frac{i_B}{\eta_B^G}$	$T_Y(\omega - i_V \Omega) > 0$	$M_1 i_1 i_\rho i_B (i_V \Omega - \omega) < 0$
3	X = C Y = S Z = B	$1 - \frac{i_B}{G} \frac{i_B}{\eta_B^G}$	$\frac{i_B}{G} \frac{i_B}{\eta_B^G}$	$(\frac{\eta_B^G}{i_B} - 1)^{-1}$	$T_Y(\omega - n_Z) > 0$	$M_1 i_B (1 - i_B) (\omega i_1 i_\rho - n_1) < 0$
4	X = B Y = C Z = S	$(1 - \frac{\eta_B^G}{i_B})^{-1} \frac{i_B}{\eta_B^G}$	$(1 - \frac{i_B}{G})^{-1}$	$\frac{\eta_B^G}{i_B} - \frac{\eta_B^G}{i_B}$	$T_Z(n_Z - i_V \Omega) > 0$	$M_1 (i_V i_1 i_\rho i_B (i_V \Omega - n_1)) > 0$
5	X = C Y = B Z = S	$\frac{i_B}{G} \frac{i_B}{\eta_B^G}$	$1 - \frac{i_B}{G} \frac{i_B}{\eta_B^G}$	$\frac{\eta_B^G}{i_B} - 1$	$T_Z(n_Z - \omega) > 0$	$M_1 (i_1 i_\rho \omega - n_1) > 0$
6	X = S Y = C Z = B	$1 - \frac{\eta_B^G}{i_B}$	$\frac{\eta_B^G}{i_B}$	$(\frac{i_B}{G} - 1)^{-1}$	$T_X(i_V \Omega - n_Z) > 0$	$M_1 i_B (i_B - 1) (i_V i_1 i_\rho i_B (i_V \Omega - n_1)) > 0$

los diferentes. Portanto, devido a (4.17), podemos escrever:

$$T_X \cong \frac{M_1 i_1 i_\rho}{ZX} \quad (4.18)$$

pois $\eta_1^\sigma > 0$ e $\eta_\rho^\sigma > 0$.

Analogamente, de (4.9) vem:

$$T_Y = YZ.T_Z = YZ.M_Z$$

e, novamente, utilizando (4.12) e (4.15) temos:

$$T_Y \cong M_1 i_1 i_\rho . YZ \quad (4.19)$$

De (4.6) temos:

$$T_Z \cong - M_1 i_1 i_\rho \quad (4.20)$$

Vejamos, então, como foi construída a última coluna para, por exemplo, JPL=3.

Neste caso

$$YZ = \left(\frac{\eta_B^G}{i_B} - 1 \right)^{-1} = \left(\frac{\eta_B^G - i_B}{i_B} \right)^{-1} = \frac{i_B}{\eta_B^G - i_B}$$

Porém, na bibliografia sobre planetários [5] encontramos a seguinte restrição aos valores de i_B , para evitar o autotravamento:

$$i_B < \eta_B \quad \text{ou} \quad i_B > \frac{1}{\eta_B} \quad (4.21)$$

De (4.21) podemos dizer que:

$$YZ \cong \frac{i_B}{1 - i_B} \cong i_B (1 - i_B) \quad (4.22)$$

Devido a (4.10) e (4.13) temos:

$$n_Z = \frac{n_1}{i_1 i_\rho} \quad (4.23)$$

A condição para $G=1$ na posição JPL=3 é dada por:

$$T_Y(\omega - n_Z) > 0 \quad (4.24)$$

de acordo com a Tabela 4.1.

Substituindo (4.19), (4.22) e (4.23) em (4.24) vem

$$M_1 i_1 i_\rho i_B (1 - i_B) \left(\omega - \frac{n_1}{i_1 i_\rho} \right) < 0$$

e finalmente

$$M_1 i_B (1 - i_B) (i_1 i_\rho \omega - n_1) < 0 \quad (4.25)$$

que corresponde ao valor da última coluna da Tabela 4.1.

4.2. EQUAÇÃO DO MOVIMENTO PARA A INÉRCIA EQUIVALENTE AO VEÍCULO

A equação do movimento da inércia equivalente, já deduzida em (3.38), é aqui rerepresentada:

$$\theta_I \dot{\omega} = M_e - M_{LI} \quad (4.26)$$

sendo θ_I = inércia equivalente ao veículo, definida em (3.36)

$\dot{\omega}$ = aceleração angular da inércia equivalente (rad/s²)

M_e = torque no eixo e (Nm)

M_{LI} = torque resistivo devido às perdas externas, definido em (3.39).

Da mesma maneira como fizemos na seção anterior, vamos escrever (4.26) em termos dos torques nos eixos das máquinas elétricas.

a) Para a transmissão simples 2 (T.S.2)

A relação de transmissão i_2 é definida por:

$$i_2 = \frac{n_2}{\omega} \quad (4.27)$$

sendo n_2 = a rotação da máquina 2 (rad/s)
 ω = a rotação da inércia θ_I (rad/s)

O rendimento η_2 da transmissão é:

$$\eta_2^w = \frac{P_e - P_Y}{P_2} = \frac{M_e \omega - M_Y \omega}{M_2 n_2} = \frac{M_e - M_Y}{M_2 i_2} \quad (4.28)$$

sendo P_e = potência no eixo e
 P_Y = potência no eixo Y
 P_2 = potência no eixo da máquina 2
 M_e, M_Y, M_2 = os torques nos eixos e, Y e 2 (CSMS)
 $w = +1$ se $P_2 > 0$

então

$$M_e = M_Y + M_2 i_2 \eta_2^w \quad (4.29)$$

Finalmente, substituindo-se (4.9), (4.12), (4.15) e (4.29) em (3.37) teremos:

$$\theta_I \ddot{\omega} = \frac{M_1 Y Z i_1 i_\rho \eta_D^e}{\eta_1^\sigma \eta_\rho^\sigma} + M_2 i_2 \eta_2^w \eta_D^e - \frac{1}{2} \rho C A \frac{r^3}{i_D^3} \omega^2 - \frac{m g r}{i_D} (\sin \theta + f \cos \theta)$$

(4.30)

As equações (4.16) e (4.30) descrevem o comportamento dinâmico do sistema.

Os torques M_1 e M_2 são fornecidos pelas máquinas elétricas em função das correntes de campo e de armadura de cada

máquina (3.113) e (3.114). Através do controle destas correntes pode-se operar o sistema.

É interessante obter, também, o espaço percorrido pelo veículo em cada instante. Assim, acrescentamos a equação diferencial.

$$\dot{s} = \frac{r}{i_D} \omega \quad (4.31)$$

sendo s = espaço percorrido (m)

\dot{s} = v - velocidade do veículo (m/s)

A equação (4.31) provém da (3.32) e forma, juntamente com (4.16) e (4.30), um sistema de três equações diferenciais. A simulação consiste, basicamente, na integração deste sistema.

SIMULAÇÃO NO COMPUTADOR

5.1. INTRODUÇÃO

O veículo híbrido pode ter sua operação simulada no computador desde que estejam definidos todos os elementos do sistema, os rendimentos dos processos de transmissão de energia e a sistemática de atuação nos controles.

Pretende-se acelerar o veículo até a velocidade de regime (v_r), permanecer algum tempo (t_r) nesta velocidade, desacelerar o veículo até a parada e permanecer parado por algum tempo (t_p), quando então, completa-se o ciclo. A curva $v(t)$, velocidade do veículo em função do tempo, é aqui chamada de perfil do percurso.

Existem diversos percursos padronizados. A MAN [18] sugere um perfil do percurso na forma de trapézio isósceles, Figura 5.1.

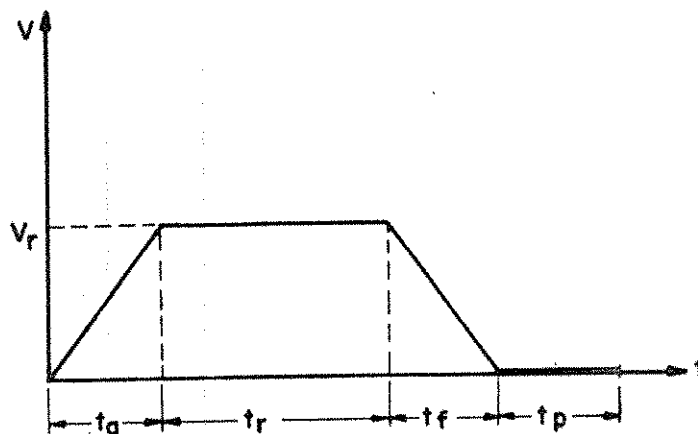


Figura 5.1

com

- $v_r = 50 \text{ km/h}$ (velocidade de regime)
- $t_a = 10,7 \text{ s}$ (tempo de aceleração)
- $t_r = 25,3 \text{ s}$ (tempo no regime)
- $t_f = 10,7 \text{ s}$ (tempo de frenagem)
- $t_p = 18,0 \text{ s}$ (tempo parado)
- $s = 500 \text{ m}$ (espaço percorrido)
- $a = 1,3 \text{ m/s}^2$ (aceleração)

A SAE [17] recomenda quatro percursos para veículos elétricos, na forma da Figura 5.2.

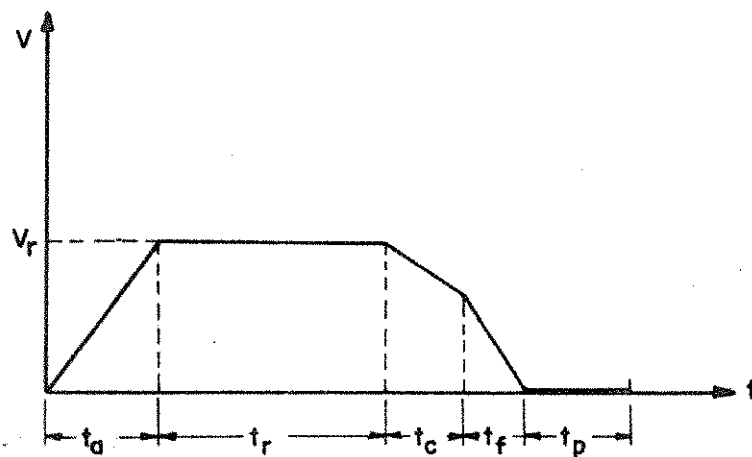


Figura 5.2

sendo v_r , t_a , t_r , t_f e t_p como na Figura 5.1 e t_c o tempo em que o veículo fica sem o esforço motriz, desacelerando devido às perdas. A Tabela 5.1 apresenta os valores que definem estes percursos.

Tabela 5.1. Percursos Padrão da SAE (J227a)

	A	B	C	D
v_r	$16 \pm 1,5 \text{ km/h}$	$32 \pm 1,5 \text{ km/h}$	$48 \pm 1,5 \text{ km/h}$	$72 \pm 1,5 \text{ km/h}$
t_a	$4 \pm 1 \text{ s}$	$19 \pm 1 \text{ s}$	$18 \pm 2 \text{ s}$	$28 \pm 2 \text{ s}$
t_c	0	$19 \pm 1 \text{ s}$	$20 \pm 1 \text{ s}$	$50 \pm 2 \text{ s}$
t_c	$2 \pm 1 \text{ s}$	$4 \pm 1 \text{ s}$	$8 \pm 1 \text{ s}$	$10 \pm 1 \text{ s}$
t_f	$3 \pm 1 \text{ s}$	$5 \pm 1 \text{ s}$	$9 \pm 1 \text{ s}$	$9 \pm 1 \text{ s}$
t_p	$30 \pm 2 \text{ s}$	$25 \pm 2 \text{ s}$	$25 \pm 2 \text{ s}$	$25 \pm 2 \text{ s}$

A curva $v(t)$ que ocorre na simulação depende, como veremos neste capítulo, da estratégia de controle adotada.

5.2. EQUAÇÕES DO SISTEMA

Vimos que as equações (4.16), (4.30) e (4.31) descrevem o comportamento do sistema como função dos torques nos eixos das máquinas elétricas. Estes torques, por sua vez, dependem das correntes de campo e armadura destas máquinas. A seguir repetimos estas equações substituindo-se os torques M_1 e M_2 por suas expressões, (3.109) e (3.110), como função das correntes elétricas.

$$\theta_G \dot{\Omega} = -M_{LG\max} \cdot \left(\frac{\Omega}{\Omega_{\max}} \right)^\alpha - \frac{i_1 i_p i_v}{ZX \cdot \eta_1^\sigma \eta_p^\sigma \eta_v^\epsilon} \cdot f_1 I_1 \quad (5.1.a)$$

$$\begin{aligned} \theta_I \dot{\omega} = & -\frac{1}{2} \rho CA \frac{r^3}{i_D^3} \omega^2 - mg \frac{r}{i_D} (\text{sen}\theta + f \cos\theta) + \frac{YZ i_1 i_p \eta_D^e}{\eta_1^\sigma \eta_p^\sigma} f_1 I_1 + \\ & + i_2 \eta_2^w f_2 I_2 \end{aligned} \quad (5.1.b)$$

$$\dot{s} = \frac{r}{i_D} \omega \quad (5.1.c)$$

- sendo:
- θ_G = inércia do volante (kgm^2)
 - θ_I = inércia equivalente ao veículo (kgm^2), definida em (3.36)
 - m = massa total do veículo (kg)
 - r = raio dos pneus (m)
 - i_D = redução do diferencial
 - Ω = rotação do volante (rad/s)
 - ω = rotação do eixo antes do diferencial (rad/s)
 - s = espaço percorrido pelo veículo, (m)
 - \dot{s} = velocidade do veículo (m/s)
 - $M_{LG\max}$ = torque resistivo no volante à rotação Ω_{\max}
 - i_1, i_ρ, i_v, i_2 = relações de transmissão
 - $\eta_1, \eta_\rho, \eta_v, \eta_2$ = rendimentos das transmissões
 - ZX = relação entre os torques nos eixos Z e X do T.E.P.
 - YZ = relação entre os torques nos eixos Y e Z do T.E.P.
 - σ, ϵ, e, w = expoentes dos rendimentos, com valores iguais a ± 1 dependendo do sentido do fluxo da potência nos diversos eixos.
 - f_1, f_2 = grandezas proporcionais ao fluxo magnético das máquinas elétricas e crescente com a corrente de campo, (Vs)
 - I_1, I_2 = são as correntes de armadura das máquinas elétricas, (A)
 - g = aceleração da gravidade, considerado $9,81 \text{ m/s}^2$
 - ρ = densidade do ar (kg/m^3)
 - A = área frontal do veículo (m^2)
 - C = coeficiente de forma do veículo para efeito de resistência aerodinâmica
 - f = resistência ao rolamento

α = expoente obtido experimentalmente

θ = inclinação da rampa (rad)

A simulação consiste em encontrar, para cada instante t , os valores das variáveis do sistema (Ω , ω e s). Isto é obtido a partir da integração numérica do sistema de equações diferenciais (5.1).

É possível, também, simular o veículo híbrido sem o planetário, isto é, sem bifurcação de energia no sistema, Fig. 4.1. Para tanto, basta cortar o eixo Y, fixando a parte ligada ao planetário e deixando a outra parte livre. As equações do sistema sem bifurcação de energia são obtidas fazendo $YZ=0$ em (5.1).

5.3. PARÂMETROS DE CONTROLE

O sentido e a intensidade do fluxo da potência no sistema é controlado pelas correntes de campo e de armadura, das máquinas elétricas. Isto é, fazendo, por exemplo, os valores de I_1, I_2, f_1 e f_2 positivos* e suficientemente grandes para que $\dot{\omega} > 0$ e $\dot{\Omega} < 0$ em (5.1), teremos o fluxo de energia no sentido do volante para o veículo.

O controle consiste em definir em cada instante os valores das grandezas elétricas I_1, I_2, f_1 e f_2 , para se poder integrar (5.1) e obter o movimento do veículo. A escolha destas variáveis determina o perfil do percurso do veículo, a regeneração de energia e o consumo de energia de fonte externa. Os valores de I_1, I_2, f_1 e f_2 devem, também, obedecer às restrições vistas na seq.3.4. Além disto, estas grandezas determinam os valores de outras grandezas elétricas (V_1, V_2, I_3 e U) que por sua vez, também possuem limitações. Estas oito variáveis ($f_1, f_2, I_1, I_2, I_3, V_1, V_2$ e U) não são independentes, pois estão relacionadas por quatro equações, vistas anteriormente:

$$\begin{aligned} f_1 n_1 - R I_1 &= V_1 \\ f_2 n_2 + R I_2 &= V_2 \\ V_1 &= V_2 + U \\ I_2 &= I_1 + I_3 \end{aligned} \tag{5.2}$$

* Em (5.1) $\frac{i_1 i_{\rho} i_v}{Z X} > 0$, $Y Z i_1 i_{\rho} < 0$ e $i_2 > 0$.

Conforme a configuração L das chaves das ligações elétricas, Fig. 3.18 e Tabela 3.5, uma ou duas destas variáveis são nulas. Então, o número de variáveis independentes (NVI), para cada configuração L, corresponde ao indicado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1.

L	NVI	Observações
1	2	$I_3=0$ e $U=0$
2	3	$U=0$
3	3	$I_3=0$
4	2	$V_2=0$ e $I_2=0$
5	2	$V_1=0$ e $I_1=0$

Portanto, é suficiente definir em cada instante a configuração das chaves elétricas L e mais NVI variáveis, sendo que as demais ficam automaticamente determinadas.

Além das restrições das grandezas elétricas há também uma limitação da aceleração do veículo:

$$|\ddot{s}| = \frac{r}{i_D} |\dot{\omega}| < a_{\max} \quad (5.3)$$

Esta limitação deve-se a exigências de conforto dos passageiros.

5.4. ESTRATÉGIA DE CONTROLE

As equações (5.1) levam em conta as perdas de energia do sistema, conseqüentemente consideram que, na aceleração apenas uma parcela da variação de energia do volante é cedida ao veículo; sendo que o restante é perdido nas transmissões mecânicas, nas máquinas elétricas e nas resistências externas. Na desaceleração, analogamente, as equações (5.1) consideram que somente parte da energia do veículo chega até o volante, sendo necessário então, introduzir energia de fonte externa, para que

o volante volte ao mesmo nível de energia inicial.

A introdução de energia de fonte externa deve satisfazer critérios de otimização da solicitação desta fonte. Em geral é conveniente que o sistema apresente uma demanda constante da fonte. Nestas condições, na realidade, não há porque limitar a injeção de energia às fases finais do ciclo. Introduzindo-se energia também durante a aceleração, o regime e a desaceleração do veículo, evita-se a queda acentuada da rotação do volante e os picos de solicitação de potência externa, possibilita também recuperar energia até a parada do veículo e atingir uma velocidade de regime mais elevada.

A escolha da estratégia de controle, isto é, dos valores das grandezas elétricas em cada instante, deve obedecer a todas as restrições mencionadas na seq.3.4 e ocasionar o ciclo de operação desejado. Neste trabalho optamos pelo seguinte ciclo de operação:

- i) O ciclo é iniciado com velocidade angular máxima do volante e o veículo em repouso;
- ii) Acelera-se o veículo até a velocidade de regime, utilizando energia do volante e da fonte externa;
- iii) Permanece-se algum tempo na velocidade de regime, suprimindo as perdas do veículo e do volante com a fonte externa;
- iv) Desacelera-se o veículo até a parada, devolvendo energia ao volante. Nesta fase também é introduzida energia externa para possibilitar a recuperação até a parada do veículo;
- v) Finalmente, introduz-se energia para restabelecer o nível inicial de energia do volante.

Uma vez estabelecido um ciclo de operação desejado, resta encontrar uma sequência de valores para as grandezas elétricas, que o produza. Considerando que o envolvimento de um programa geral de otimização para determinar a estratégia de controle iria levar a uma solução extremamente complexa, optamos pela sua determinação baseada em critérios de engenharia.

Para se observar o desempenho do veículo e ao mesmo tempo podermos escolher, indiretamente, o perfil do percurso

($v=v(t)$) do veículo é interessante, como veremos, que a sistemática de operação faça com que o veículo atinja a velocidade de regime o mais rapidamente possível, assim como, depois do período de regime, o veículo freie com a máxima desaceleração.

A aceleração do veículo é função apenas das correntes de campo e armadura das máquinas elétricas, uma vez estabelecidos todos os parâmetros do sistema. Isto é, fazendo os valores de f_1 , f_2 , I_1 e I_2 em (5.1), assumirem, em cada instante, os máximos valores possíveis teremos a máxima aceleração do veículo. Porém, devido ao fato destas variáveis possuírem limitações e não serem independentes, além de determinarem outras grandezas elétricas que também possuem limitações, a escolha dos valores destas variáveis, mesmo para obter a máxima aceleração, não é tarefa simples.

Como ilustração apresentamos a seguir um exemplo de estratégia de controle do sistema.

5.4.1. Exemplo de Estratégia de Controle

Atualmente existe montado no laboratório do GEPROM do Departamento de Engenharia Mecânica da UNICAMP o sistema que estamos simulando no computador. As características das máquinas elétricas utilizadas são:

$$\begin{aligned}
 I_{\max} &= 90 \text{ A} \\
 f_{\max} &= 0,82 \text{ Vs} \\
 f_{\text{base}} &= 0,67 \text{ Vs} \\
 n_{\max} &= 314 \text{ rad/s} \\
 R &= 0,22 \Omega \\
 V_{\max} &= 220 \text{ V}
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

No início do ciclo a máquina 1 está na rotação máxima e o eixo da máquina 2 está parado*.

Se escolhessemos os valores máximos das correntes, com o intuito de obter a aceleração máxima do veículo no instante considerado, teríamos:

* $n_1 = A_1 \Omega = B_1 \omega$ e $n_2 = i_2 \omega$ ver Apêndice B.

$$f_1 = f_2 = f_{\max} = 0,82 \text{ Vs}$$

e (5.5)

$$I_1 = I_2 = I_{\max} = 90 \text{ A}$$

porém, neste instante

$$n_1 = 314 \text{ rad/s}$$

e

$$n_2 = 0$$

então, utilizando (3.113) e (3.114), teríamos:

$$V_1 = 237,8 \text{ V}$$

e

$$V_2 = 19,8 \text{ V}$$

No entanto, só é possível V_1 ser diferente de V_2 se a configuração das chaves elétricas for a correspondente a $L = 3$ na Tabela 3.5. Nesta situação, teríamos:

$$U = V_1 - V_2 = 218 \text{ V}$$

e a potência fornecida pela fonte externa seria:

$$P_3 = UI = 218 \times 90 = 19620 \text{ watts}$$

o que equivaleria a um pico de solicitação da fonte, pois esta, é, praticamente, a potência máxima que o sistema pode extrair da fonte.

Convém que a solicitação de potência externa seja pequena e praticamente constante. Sendo assim, é mais interessante, no início, utilizar outra configuração das chaves, por exemplo: $L=1$ ou $L=2$. Para estes casos $U=0$ e portanto $V_1=V_2$.

Conseqüentemente, no início não é interessante ter os valores das variáveis f_1 , f_2 , I_1 e I_2 definidos de acordo com (5.5): De fato, vimos que, na realidade, existem no máximo três variáveis independentes. Ou seja, podemos escolher no máximo os valores de três variáveis em cada instante, estando as demais, automaticamente determinadas. Então, quais variáveis escolher?

Uma vez que pretendemos maximizar a aceleração do veículo, é conveniente que as variáveis f_1 , f_2 , I_1 e I_2 se aproximem, o quanto for possível dos valores máximos. Escolheremos, portanto, três destas variáveis com o valor máximo e calcularemos a outra de acordo com (3.124). Na tabela 5.2 apresentamos os resultados destes cálculos.

Tabela 5.2.

f_1	f_2	I_1	I_2	Observações
0,82	0,82	90	1081	Impossível pois $I_2 > I_{\max}$
0,82	0,82	-1081	90	Impossível pois $ I_1 > I_{\max}$
0,82	∞	90	90	Impossível pois $f_2 > f_{\max}$
0,126	0,82	90	90	Possível

Para a única alternativa possível da Tabela 5.1 teremos

$$V_1 = V_2 = 19,8 \text{ V}$$

e

$$I_3 = 0$$

que também obedecem as restrições (3.118) e (3.112), então, iniciaremos a operação de controle com estes valores.

Ao substituirmos os valores de f_1 , f_2 , I_1 e I_2 nas equações (5.1) teremos $\dot{\Omega} < 0$ e $\dot{\omega} > 0$, conseqüentemente, a rotação do volante Ω diminuirá enquanto que a rotação da inércia equivalente ω aumentará. Podemos também dizer que a rotação n_1 da máquina 1 diminuirá e a rotação n_2 da máquina 2 aumentará seu valor. Assim, se continuarmos com os valores iniciais de f_1 , f_2 , I_1 e I_2 a equação (3.124) não será mais satisfeita, num novo instante. Podemos, todavia, aumentar um pouco o valor de f_1 , continuando com f_2 , I_1 e I_2 máximos. No instante seguinte f_1 terá de ser ainda maior. Porém, quando f_1 atingir f_{\max} não poderemos mais aumentar f_1 e teremos de mudar este procedimento, por exemplo, mantendo f_1 no máximo e fazendo com que outra grandeza passe a variar.

Tabela 5.3. Sistemática de Operação

PER	f_1	n_1	I_1	V	f_2	n_2	I_2	I_3	OBSERVAÇÕES
1	\nearrow^{13}	\searrow	$\overline{\text{max}}$	\nearrow^2	$\overline{\text{max}}$	\nearrow^5	$\overline{\text{max}}$	0	$a > 0$ L=1
2	\nearrow^3	\searrow	$\overline{\text{max}}$	$\overline{\text{max}}$	\searrow	\nearrow^5	$\overline{\text{max}}$	0	$a > 0$ L=1
3	$\overline{\text{max}}$	\searrow	\searrow	$\overline{\text{max}}$	\searrow	\nearrow^5	$\overline{\text{max}}$	\nearrow^4	$a > 0$ L=2
4	$\overline{\text{max}}$	\searrow	\searrow^5	$\overline{\text{max}}$	\searrow	\nearrow^5	\searrow	$\overline{I_{30}}$	$a > 0$ L=2
5	$\overline{\text{max}}$	\searrow	0	$\overline{\text{max}}$	\rightarrow	\rightarrow	$\overline{I_{30}}$	$\overline{I_{30}}$	$a = 0$ L=2
6	\searrow	\nearrow	$\overline{\text{max}}$	$\overline{\text{max}}$	\nearrow	\searrow	$\overline{\text{max}}$	0	$a < 0$ L=1
7	\searrow	\nearrow	$\overline{\text{max}}$	$\overline{\text{max}}$	$\overline{\text{max}}$	\searrow^9	$\overline{\text{max}}$	0	$a < 0$ L=3
8			FOI	ABCLIDO					
9	$\overline{\text{max}}$	\nearrow	\nearrow	$\overline{\text{max}}$		0		\searrow^{10}	$v = 0$ $\dot{\Omega} > 0$ L=4
10	\searrow^{11}	\nearrow	$\overline{-I_{30}}$	$\overline{\text{max}}$		0		$\overline{I_{30}}$	$v = 0$ $\dot{\Omega} > 0$ L=4
11	$\overline{\text{base}}$	\nearrow	\nearrow^{12}	$\overline{\text{max}}$		0		\searrow	$v = 0$ $\dot{\Omega} > 0$ L=4
12	$\overline{\text{base}}$	$\overline{\text{max}}$	\rightarrow	$\overline{\text{max}}$		0		\rightarrow	$v = 0$ $\dot{\Omega} = 0$ L=4
13	$\overline{\text{max}}$	\searrow	$\overline{\text{max}}$	\searrow	\searrow^{14}	\nearrow	$\overline{\text{max}}$	0	$a > 0$ L=1
14	$\overline{\text{max}}$	\searrow	\searrow	\searrow^{15}	$\overline{\text{base}}$	\nearrow	$\overline{\text{max}}$	\searrow^{15}	$a > 0$ L=2
15	$\overline{\text{max}}$	\searrow	\searrow	\searrow^{16}	$\overline{\text{base}}$	\nearrow	\searrow	$\overline{I_{30}}$	$a > 0$ L=2
16	$\overline{\text{max}}$	\searrow	\searrow	\rightarrow	$\overline{\text{base}}$	\nearrow	\searrow	\searrow^{17}	$a > 0$ L=2
17	$\overline{\text{max}}$	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	$\overline{\text{base}}$	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	$a = 0$ L=2
18	$\overline{\text{max}}$	\nearrow	$\overline{\text{max}}$	\nearrow	\nearrow^{19}	\searrow	$\overline{\text{max}}$	0	$a < 0$ L=1
19	\searrow^{20}	\nearrow	$\overline{\text{max}}$	\searrow	$\overline{\text{max}}$	\searrow	$\overline{\text{max}}$	0	$a < 0$ L=1
20	$\overline{\text{base}}$	\nearrow	$\overline{-I_{30}}$	$\overline{\text{max}}$	\searrow		$\overline{-I_{30}}$	0	$a < 0$ L=3
21	$\overline{\text{max}}$	\nearrow	$\overline{-I_{30}}$	\nearrow^{22}		0		$\overline{I_{30}}$	$v = 0$ $\dot{\Omega} > 0$ L=4
22	$\overline{\text{max}}$	\nearrow^{23}	\searrow	$\overline{\text{max}}$		0		\searrow	$v = 0$ $\dot{\Omega} > 0$ L=4
23	$\overline{\text{max}}$	$\overline{\text{max}}$	\rightarrow	$\overline{\text{max}}$		0		\rightarrow	$v = 0$ $\dot{\Omega} = 0$ L=4

a = aceleração do veículo

v = velocidade do veículo

L = ligação das chaves, ver Tabela 3.5.

Em cada fase existirão NVI* grandezas com seus valores no limite. Estas grandezas formam um conjunto de variáveis independentes (CVI). Sempre que uma variável atinge seu valor limite esta entra para o CVI retirando outra grandeza do conjunto.

Raciocinando desta maneira podemos adotar a estratégia de controle indicada na Tabela 5.3. Esta sequência foi elaborada com base na experiência, porém, ainda, não é a ideal, posto que está sendo continuamente aprimorada. A simulação no computador e em laboratório tem sido bastante útil ao aprimoramento desta sistemática de operação.

Na Tabela 5.3 as fases ou períodos são designados por números inteiros que não correspondem, necessariamente, à ordem que poderá ocorrer na simulação.

Utilizaremos os símbolos \uparrow , \downarrow e \rightarrow para valores crescentes, decrescentes e estacionários com o tempo, respectivamente.

Iniciamos a simulação pelo período 1, Tabela 5.3. Neste período as grandezas f_2 , I_1 e I_2 estão constantemente no máximo, portanto formam o CVI e as variáveis f_1 e V ($V_1=V_2=V$) começam com valores pequenos e vão aumentando à medida que n_2 cresce e n_1 decresce. No entanto, os aumentos de f_1 e V estão limitados por f_{\max} e V_{\max} . Uma vez que uma destas variáveis atinja o valor máximo, não podemos continuar com este procedimento (período), devemos então, mudar de período. Na linha do período 1, os números 13, 2 e 5 indicam os períodos que devemos seguir caso as variáveis f_1 , V , n_2^{**} respectivamente, atinjam seus limites.

A sistemática de operação da Tabela 5.3 corresponde a uma árvore de procedimentos. O caminho seguido nesta árvore depende do comportamento do sistema e este resulta dos valores de seus parâmetros.

5.5. FATORES QUE DETERMINAM O PERFIL DO PERCURSO DO VEÍCULO

A Figura 5.3 é um possível perfil do percurso.

* NVI = número de variáveis independentes, Tabela 5.1.

** $n_{2\max}$ corresponde a velocidade de regime.

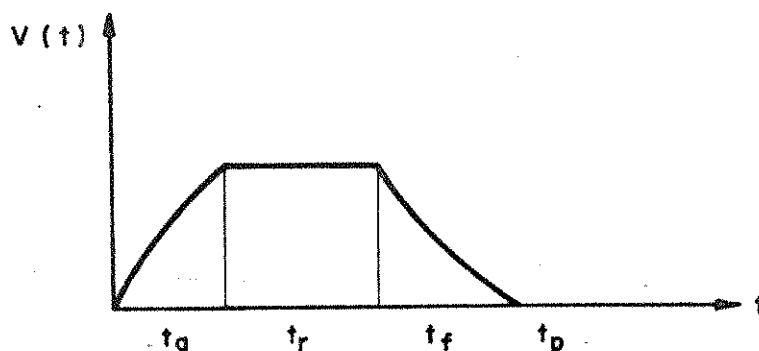


Figura 5.3

O perfil obtido na simulação do veículo híbrido depende de muitos fatores, porém, uma vez definidas as características do veículo e a estratégia de controle, a curva $v(t)$ será determinada, praticamente, por quatro dados: a corrente máxima de armadura I_{\max} , o fluxo magnético máximo f_{\max} , a velocidade de regime v_r e o tempo em que o veículo permanece em regime t_r .

Caso façamos as correntes de campo e de armadura na aceleração iguais às da desaceleração, o tempo de frenagem será menor que a duração da aceleração, pois as resistências externas ajudam a frear o veículo.

A velocidade de regime é um dado de leitura para o programa de simulação, porém, é possível que o veículo não consiga atingir a velocidade desejada, então, a velocidade máxima conseguida é considerada como sendo a velocidade de regime.

Diversos fatores limitam a velocidade do veículo, entre eles estão: a massa do veículo, a potência das máquinas elétricas, a área frontal do veículo, o coeficiente de forma que influe na resistência aerodinâmica etc.

DESCRIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA E DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

O objetivo deste capítulo é descrever os dados de entrada e explicar as saídas impressas, de tal modo que o leitor entenda como utilizar os programas e saiba interpretar os resultados.

6.1. DESCRIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

Os dados são lidos pelo programa principal, SIMUL.FOR e devem estar gravados no arquivo FORØ5.DAT no disco. Este arquivo deve conter quatro linha de dados.

A primeira linha deve ter os seguintes dados:

MASSA = massa total do veículo, (kg)

TETAG = inércia do volante, (kg.m²)

AR = área frontal do veículo, (m²)

C = coeficiente de resistência aerodinâmica

CRR = coeficiente de resistência ao rolamento

RT = raio dos pneus, (m)

TETA = soma das inércias dos eixos dianteiro e trazeiro do veículo, (kg.m²)

VELMX = velocidade máxima desejada para o veículo, (km/h)

AMX = aceleração inicial desejada, (m/s²)

ACMN = aceleração mínima permitida, (m/s²)

ADMN = desaceleração mínima permitida, (m/s²)

BOMMX = velocidade angular inicial do volante, (rpm)

DT5 = duração do regime do veículo, (S)

DT12 = duração do regime do volante, (S)

MLGMX = torque máximo resistivo no volante, (Nm)

A segunda linha de dados deve conter:

RD = relação da transmissão diferencial, definida em (3.30)

ED = eficiência do diferencial

RV = relação da transmissão v, def. em (4.3)

EV = eficiência da transmissão v

RB = relação básica do planetário, def. em (3.64)

EB = eficiência básica do planetário

R1 = relação da transmissão 1, def. em (4.13)

E1 = eficiência da transmissão 1

R2 = relação da transmissão 2, def. em (4.18)

E2 = eficiência da transmissão 2

RR = relação da transmissão ρ , def. em (4.10)

ER = eficiência da transmissão ρ .

A terceira linha deve conter:

V3 = tensões máximas nos terminais do recortador (v)

IMX = corrente de armadura máxima permitida nas máquinas, (A)

FMX1 = fluxo magnético máximo permitido na máquina 1, (Vs)

FMX2 = fluxo magnético máximo permitido na máquina 2 (Vs)

FBS1 = fluxo magnético mínimo permitido na máquina 1, quando estiver funcionando como motor (Vs)

FBS2 = idem ao anterior para a máquina 2

RA = resistência de armadura da máquina, (Ω)

II = máxima parcela, da corrente inicial nas máquinas, que é fornecida pela rede na aceleração.

IID = máxima parcela, da corrente inicial nas máquinas, que é fornecida pela rede na desaceleração do veículo.

- INICIO = instante inicial da simulação, geralmente igual a zero, (S)
- FIM = limite superior do instante final da simulação, (S)
- PASSO = passo de integração das equações do sistema, (S)

As três primeiras linhas devem estar no seguinte formato: FORMAT (16F).

A quarta linha contém os dados no formato FORMAT (15I):

- JPL = posição dos eixos do planetário em relação ao sistema, número inteiro ($1 \leq JPL \leq 6$, Tab. 3.4)
- JBIF = número inteiro que indica se há bifurcação ou não de potência no sistema. Se $JBIF > 0$, haverá bifurcação, caso contrário não.
- JOUTP = número inteiro par que acaba definindo o passo de impressão. O passo de impressão é o resultado do produto $PASSO \times JOUTP$.
- JTRES = número inteiro. Se $JTRES > 0$, haverá introdução de corrente pelo recortador desde o início do ciclo.

6.2. DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS IMPRESSOS

Os resultados da simulação são gravados em dez arquivos*. Os nomes e conteúdos destes arquivos são:

- FOR20.DAT = neste arquivo é impresso em cada instante os seguintes valores:
- N = período ou fase de operação do sistema, número inteiro, Tab. 5.3.
- T = instante correspondente da simulação, (S)
- S = espaço percorrido até o instante T, (m)
- ACR = aceleração instantânea, (m/s^2)
- ETAPL = rendimento do planetário

* Veja as listagens dos resultados da simulação no final deste capítulo.

- PR = potência nas rodas, antes do freio, (KW)
- PV = potência no eixo ligado ao volante, (KW)
- P3 = potência fornecida pela rede de distribuição, (KW)
- E3 = energia fornecida pela rede até o instante T, (Wh)
- EVEIC = energia cinética do veículo, (Wh)
- EVOLA = energia cinética no volante, (Wh)
- EPTRA = energia perdida em todas as transmissões mecânicas até o instante T, (Wh)
- EFR = energia dissipada nos freios até o instante T, (Wh)
- M1 = torque no eixo da máquina 1, (Nm)
- M2 = torque no eixo da máquina 2, (Nm)
- N1RPM = velocidade angular da máquina 1, (rpm)
- N2RPM = velocidade angular da máquina 2, (rpm)
- PZ/PX = relação entre as potências nos eixos Z e X, Fig. 3.15
- P1 = potência no eixo da máquina 1, (KW)
- P2 = potência no eixo da máquina 2, (KW)
- PFR = potência dissipada nos freios, (KW)
- EXSVL = energia que seria consumida, para percorrer o mesmo percurso, por um veículo elétrico comum, sem volante, (Wh)
- EXPER = energia perdida nas resistências externas ao veículo, (Wh)
- EPERV = energia perdida no volante, (Wh)
- EPMAQ = energia perdida nas máquinas elétricas, (Wh)
- MFRR = soma dos torques de frenagem aplicados nas rodas, (Nm)
- FOR21.DAT = contém o gráfico e os valores da velocidade do veículo em cada instante, (km/h)

- FOR22.DAT = contém o gráfico e os valores da velocidade angular do volante em cada instante , (rpm)
- FOR23.DAT = contém o gráfico e os valores da tensão nos terminais das máquinas elétricas, com excessão dos períodos 4, 7 e 20 onde aparece a tensão do recortador, (V)
- FOR24.DAT = contém o gráfico e os valores da corrente de armadura da máquina 1, (A)
- FOR25.DAT = contém o gráfico e os valores da corrente de armadura da máquina 2, (A)
- FOR26.DAT = contém o gráfico e os valores da corrente introduzida pelo recortador, (A)
- FOR27.DAT = contém o gráfico e os valores da intensidade do fluxo magnético no campo da máquina 1, (Vs)
- FOR28.DAT = contém o gráfico e os valores da intensidade do fluxo magnético no campo da máquina 2, (Vs)
- FOR29.DAT = contém uma descrição dos dados do sistema e um resumo dos resultados.

6.3. EXPLICAÇÕES SOBRE O CÁLCULO DE ALGUNS VALORES

Os valores de Ω , ω e s , respectivamente, a velocidade angular do volante, a velocidade angular da inércia equivalente e o espaço percorrido pelo veículo são calculados a cada passo pela subrotina de integração RKKS. Com estes valores e mais os valores das máquinas elétricas, I_1 , I_2 , I_3 , f_1 , f_2 , V e U escolhidos como visto no capítulo anterior, podemos a cada instante calcular uma série de grandezas que nos auxiliam a ter uma visão global do comportamento do sistema. Nesta secção, vamos explicar como é feito o cálculo de algumas das grandezas impressas. As grandezas cujo cálculo nos pareceu evidente não foram explicadas.

- a) ACR = a aceleração do veículo é obtida da eq.
(3.33)

b) ETAPL = o rendimento do planetário é calculado por:

$$\begin{aligned} \text{ETAPL} &= \frac{\text{potência de saída}}{\text{potência de entrada}} = \\ &= \frac{P_X \cdot (1 - W_X) + P_Y \cdot (1 - W_Y) + P_Z \cdot (1 - W_Z)}{P_X \cdot W_X + P_Y \cdot W_Y + P_Z \cdot W_Z} \end{aligned}$$

de acordo com a CSMS, Fig. 4.1,

se $P_X > 0$, P_X entra e $W_X = 1$; caso contrário $W_X = 0$

se $P_Y > 0$, P_Y sai e $W_Y = 0$; caso contrário $W_Y = 1$

se $P_Z > 0$, P_Z sai e $W_Z = 0$; caso contrário $W_Z = 1$

se a potência de entrada for nula consideramos $\text{ETAPL} = 1$.

c) P_R = a potência nas rodas é calculada por

$$P_R = P_e \eta_D^e = M_e \omega \eta_D^e = M_a n = M_a \frac{\omega}{i_D}$$

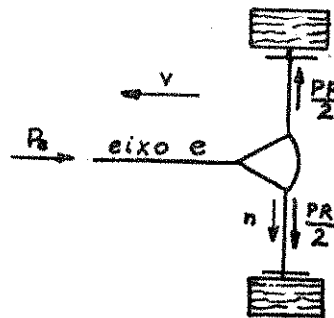


Figura 6.1

Sendo que M_a é calculado pela eq.(3.28) quando não houver torque de frenagem mecânico. Para se conseguir a desaceleração desejada do veículo pode ser necessário utilizar-se freio mecânico. Chamamos de MFRR a soma dos momentos de frenagem aplicados nas rodas. Sendo assim, ao valor de M_a da eq. (3.28) deve ser acrescido o torque devido a frenagem (MFRR).

d) PV = a potência no eixo v (Fig. 4.1) é calculada multiplicando-se o torque M_v pela velocidade angular do volante, Ω . O torque M_v é calculado utilizando-se as eq. (4.5), (4.7), (4.12) e (4.15).

e) $P3$ = a potência introduzida no sistema é calculada pelo produto da tensão V , nos terminais do recortador, - pela corrente I_3 que passa pelo recortador.

$$P3 = V \cdot I3$$

f) $E3$ = o consumo de energia da fonte externa é calculado integrando-se, numericamente, a potência $P3$. Foi utilizado o método de Simpson.

g) $EPTRA$ = a soma das perdas de energia em todas as transmissões mecânicas é calculada integrando-se a soma das perdas de potência das transmissões.

- para as transmissões simples (v , ρ , 1 e 2) estas perdas de potência são:

na transmissão $v = P_X(\eta_v^\epsilon - 1)$; ϵ definido em (4.4)

na transmissão ρ e 1 = $P_Z(1 - \eta_1^\sigma \eta_\rho^\sigma)$; σ definido em (4.11)

na transmissão 2 = $P_2(1 - \eta_2^w)$; w definido em (4.19)

- para o trem planetário a potência perdida é calculada por:

$$PPL = (1 - ETAPL) \cdot ABS(PENT)$$

sendo $ABS(PENT)$ o valor absoluto da potência que entre no planetário.

h) PFR = a potência dissipada nos freios é o produto do torque de frenagem nas rodas MFRR pela velocidade angular das rodas.

i) EFR = energia dissipada nos freios é obtida integrando-se a potência PFR.

j) EXSVL = a energia externa para o sistema sem volante é calculada integrando-se a potência externa sem volante PXSVL. Esta potência é estimada da seguinte maneira:

$$PXSVL = V2 \cdot I2 + PY / (E2 \cdot ETAMOT)$$

sendo $V2$ = a tensão nos terminais da armadura da máquina 2.

$I2$ = a corrente de armadura da máquina 2.

PY = a potência no eixo Y.

$E2$ = eficiência da transmissão 2.

$ETAMOT$ = eficiência da máquina 2, calculada por

$ETAMOT = 1 - RA \cdot I2 / V2$, sendo RA = a resistência de armadura da máquina.

k) EXPER = a energia perdida externamente, isto é, devido às resistências do ar e de rolamento é calculada integrando-se a potência perdida externamente PXPÉR. Sendo que PXPÉR é calculada por

$$PXPÉR = \frac{1}{2} \rho C A v^3 + mgfv$$

veja sec. 3-1-1 e 3-1-2.

e) EPERV = a energia perdida no volante é obtida integrando-se a potência perdida no volante PPERV. Sendo esta calculada por:

$$PPERV = MLGMX \cdot \left(\frac{\Omega}{\Omega_{max}} \right)^{1,86} \cdot \Omega$$

veja eq.(3.50).

m) EPMAQ = a energia perdida em ambas as máquinas é calculada integrando-se a soma das potências perdidas nas máquinas, PPMAQ. Foram consideradas apenas as perdas elétricas nas resistências de armadura. As perdas mecânicas das máquinas podem ser incorporadas nas perdas no volante, na resistência aerodinâmica do veículo e nas transmissões. As perdas elétricas no campo das máquinas foram desprezadas.

n) F1 MIMIMO = é o valor mínimo de f_1 quando a máquina 1 está funcionando como motor.

o) F2 MINIMO = o mesmo para a máquina 2.

p) ENERGIA ESPECIFICA = é o consumo de energia externa dividido pela massa total do veículo e pelo espaço percorrido.

q) LIMITE RECUPERAVEL DE ENERGIA = A energia enviada às rodas na fase de aceleração do veículo serve para aumentar a energia do veículo e suprir as perdas externas. Na fase de regime a energia enviada às rodas serve apenas para suprir as perdas. Durante a desaceleração do veículo não é necessário enviar energia às rodas. Assim, toda a energia enviada às rodas ocorre nas fases de aceleração e de regime. A desaceleração do veículo ocorre porque se diminui sua energia cinética. Só é possível recuperar, nas rodas, uma parcela da energia do veículo, sendo que o restante é perdido externamente. Na Fig. 6.2 está representado a potência nas rodas para um perfil trapezoidal de velocidade.

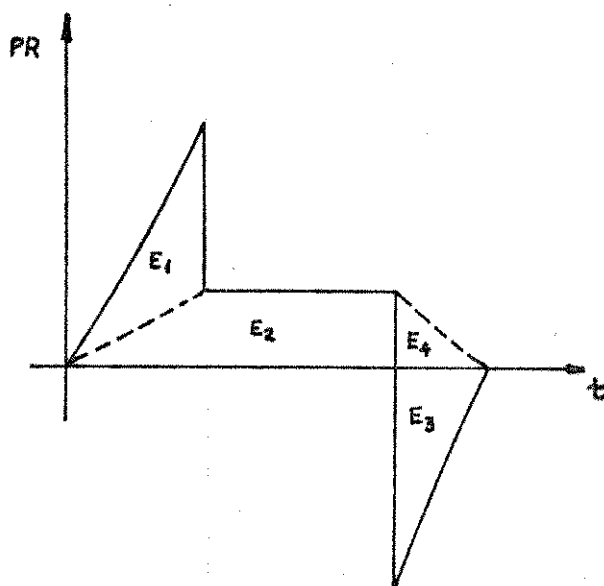


Figura 6.2

A energia enviada às rodas é $(E_1 + E_2)$ sendo E_1 a energia cinética do veículo e E_2 a energia necessária para vencer as resistências externas. A energia recuperável nas rodas é E_3 que é igual a $(E_1 - E_4)$, sendo E_4 a energia perdida externamente na desaceleração. Deste modo, definimos X_{REC} o limite recuperável de energia como sendo:

$$X_{REC} = \frac{E_3}{E_1 + E_2} \times 100$$

No programa o valor de X_{REC} é calculado por:

$$XREC = (EVEICX - EXPER + EXPER5) * 100 / (EVEIC + EXPER5)$$

sendo

EVEIC = a energia cinética máxima do veículo

EXPER = a energia perdida externamente até o final do ciclo, isto é, $EXPER = E_2 + E_4$

EXPER5 = a energia perdida externamente até o final do regime (igual à E_2)

r) ECONOMIA EFETIVA DE ENERGIA = é calculada por

$$EECON = (EXSVL - E) * 100 / EXSVL$$

t) EFICIÊNCIA NA ACELERAÇÃO = é calculada por

$$EFACR = (EVEICX + EXPERA) * 100 / (E3A + EVOLAX - EVOLAA)$$

sendo

EXPERA = a energia perdida externamente até o final da aceleração

E3A = a energia fornecida pela fonte externa até o fim da aceleração

EVOLAX = energia do volante inicial

EVOLAA = energia do volante no final da aceleração

u) EFICIÊNCIA NO REGIME = é calculada por

$$EFREG = (EXPER5 - EXPERA) * 100 / (E35 - E3A + EVOLAA - EVOLA5)$$

sendo $EXPER5$ = energia perdida externamente até o final do regime

$E35$ = energia fornecida pela fonte externa até o final do regime

$EVOLA5$ = energia do volante no final do regime

v) EFICIENCIA NA DESACELERAÇÃO = é calculada por

$$EFDES = (EVOLA7 - EVOLA5) * 100 / (E3D - E35 - EVEICX - EXPERD + EXPER5 - EFR)$$

sendo $EVOLA7$ = a energia do volante no final da desaceleração

$E3D$ = energia fornecida pela fonte externa até o final da desaceleração

$EXPERD$ = energia perdida externamente até o final da desaceleração

EFR = energia dissipada nos freios

w) EFICIENCIA NO CARREGAMENTO DO VOLANTE = é calculada por:

$$EFCARR = (EVOLAC - EVOLA7) * 100 / (E3C - E3D)$$

sendo $EVOLAC$ = energia no volante no final do carregamento do volante

$E3C$ = a energia fornecida pela fonte externa até o final do carregamento do volante.

x) VALOR EFICAZ DA CORRENTE NA MAQ.1 = é calculado por

$$I1EF = \sqrt{\frac{1}{\text{TIME}} \int_0^{\text{TIME}} I_1^2 dt}$$

sendo TIME a duração do ciclo.

y) VALOR EFICAZ DA CORRENTE NA MAQ.2 = é calculado por:

$$I2BF = \sqrt{\frac{1}{\text{TIME}} \int_0^{\text{TIME}} I_2^2 dt}$$

z) VALOR EFICAZ DA CORRENTE INTRODUZIDA = \hat{e} calculado por:

$$I_{3EF} = \sqrt{\frac{1}{\text{TIME}} \int_0^{\text{TIME}} I_3^2 dt}$$

6.4. BALANÇO DE ENERGIA

O sistema s \hat{o} pode armazenar energia no volante e no ve \acute{e} culo, pois estamos considerando que a energia el \acute{e} trica vem de fora do sistema, e tamb \acute{e} m estamos desprezando as outras in \acute{e} rcias.

Considerando dois instantes t_1 e t_2 , por ex. $t_2 > t_1$, ent \tilde{a} o podemos escrever que:

$$\begin{aligned} & \text{EVEIC}(t_1) + \text{EVOLA}(t_1) + [\text{E3}(t_2) - \text{E3}(t_1)] = \text{EVEIC}(t_2) + \\ & + \text{EVOLA}(t_2) + [\text{EPTRA}(t_2) - \text{EPTRA}(t_1)] + [\text{EPMAQ}(t_2) - \text{EPMAQ}(t_1)] + \\ & + [\text{EXPER}(t_2) - \text{EXPER}(t_1)] + [\text{EFR}(t_2) - \text{EFR}(t_1)] \end{aligned}$$

e chamando de ETOT a soma seguinte

$$\begin{aligned} \text{ETOT}(t) = & \text{EVEIC}(t) + \text{EVOLA}(t) + \text{EPTRA}(t) + \text{EPMAQ}(t) + \\ & + \text{EXPER}(t) + \text{EFR}(t) - \text{E3}(t) \end{aligned}$$

$$\text{Devemos ter } \text{ETOT}(t_1) = \text{ETOT}(t_2) = \text{EVOLAX}$$

Apesar de cada uma das parcelas de ETOT ser calculada independentemente, observamos que a soma permanece pr \tilde{a} ticamente constante. \acute{E} claro que tanto menor ser \acute{a} a varia \tilde{c} o de ETOT quanto menor o passo de integra \tilde{c} o, PASSO.

As varia \tilde{c} oes maiores geralmente ocorrem nas mudan \tilde{c} as de per \acute{e} odos de controle.

6.5. LISTAGENS DE RESULTADOS DA SIMULA \tilde{C} AO

A seguir, apresentamos duas listagens completas, uma para o sistema sem bifurca \tilde{c} o de energia e outra com bifurca \tilde{c} o de energia. Al \acute{e} m destas sa \acute{i} das, apresentamos tamb \acute{e} m uma s \acute{e} rie de resumos de resultados para diversos conjuntos de dados.

 SIMULACAO DE UM VEICULO HIPICO COM ARMazenAMENTO DE ENERGIA EM VOLANTE

PARAMETROS DO SISTEMA :

MASSA TOTAL DO VEICULO:.....15000.00 KG
 INERCIA DO VOLANTE:..... 4.50 KG.M2
 AREA FRONTAL DO VEICULO:..... 6.00 M2
 COEF. DE RESIST. AERODINAMICA:.. 0.50
 COEF. DE RESIST. AO ROLAMENTO:.. 0.0140
 RAO DOS PNEUS:..... 0.55 M
 INERCIA TOTAL DOS EIXOS:..... 450.00 KG.M2
 VELOCIDADE DE REGIME:..... 60.0 KM/H
 ACELERACAO INICIAL:..... 1.200 M/S2
 ACELERACAO MINIMA:..... 0.100 M/S2
 DESAC.HINIMA:..... 1.500 M/S2
 VEL. ANG. MAX. DO VOLANTE:..... 12000.0 RPM
 MOMENTO RESIST. MAX.NO VOLANTE:.. 0.150 N.M
 TEMPO EM REGIME:..... 5.0 S

TRANSMISSOES RELACAO EFICIENCIA
 DIFERENCIAL..... 3.551 0.96
 PLAN.FIXO..... 0.289 0.98
 PLANETARIO..... -1.042 0.97
 POLIAS MAO 1..... -1.000 0.98
 POLIAS MAO 2..... 3.500 0.98
 PLAN POLIA R..... 1.000 1.00

MOTO-GERADORES
 VOLTAGEM MAXIMA..... 550.0 V
 CORRENTE MAXIMA..... 259.3 A
 CORRENTE EXTERNA MAX..... 129.6 A
 CURR. EXT. MAX. NA DESC... 181.5 A
 F MAXIMO MAO 1..... 3.96 VS
 F MAXIMO MAO 2..... 3.96 VS
 F BASE MAO 1..... 1.31 VS
 F BASE MAO 2..... 1.31 VS
 RESISTENCIA DE ARMADURA.. 0.09 OHM

SISTEMA COM BIFURCACAO DE ENERGIA

POSICAO DOS EIXOS DO PLANETARIO= 1
 PASSO DE INTEGRACAO = 0.0250 S
 PASSO DE IMPRESSAO = 1.0000 S

CORRENTE EXTERNA I3= I30 INICIALMENTE

OUTROS VALORES:
 TETA1 = 391.9045 ALFAF = 10.0000
 KAR = 0.0067 KR = 318.8112
 ZXA = -0.9309 YZA = -2.0742
 A1 = 0.3001 B1 = -2.0420

RESUMO DOS RESULTADOS :

ACCELERACAO MAXIMA:..... 1.40 M/S2
 DESACELERACAO MAXIMA:..... 1.50 M/S2
 VELOCIDADE DE REGIME:..... 60.01 KM/H
 DURACAO DO CICLO:..... 43.02 S
 DURACAO DA ACELERACAO:..... 17.28 S
 DURACAO DO REGIME:..... 4.98 S
 DURACAO DA DESACELERACAO:..... 11.13 S
 DURACAO DO CARREGAMENTO DO VOLANTE:..... 5.52 S
 DURACAO DO REGIME DO VOLANTE:..... 5.02 S
 ESPACU PERCORRIDO:..... 341.10 M

VEL. ANG. INICIAL DA MAO 1:..... 3601.15 RPM
 VEL. ANG. MINIMA DA MAO 1:..... 165.35 RPM
 VEL. ANG. MAXIMA DA MAO 2:..... 3599.93 RPM
 VEL. ANG. MINIMA DO VOLANTE:..... 7549.73 RPM
 VEL. ANG. FINAL DO VOLANTE:..... 12000.12 RPM
 P1 MINIMO:..... 1.43 VS.
 P2 MINIMO:..... 1.43 VS.

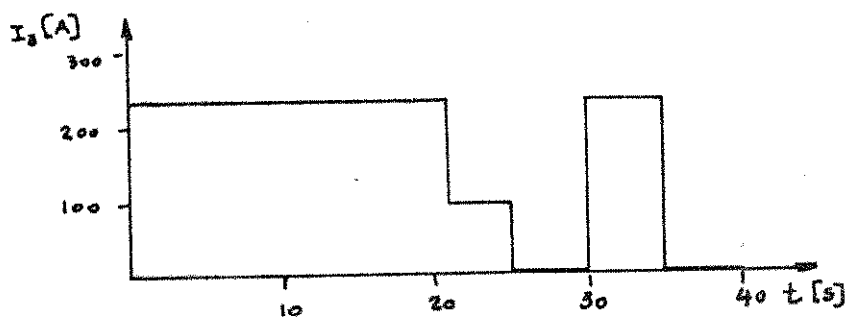
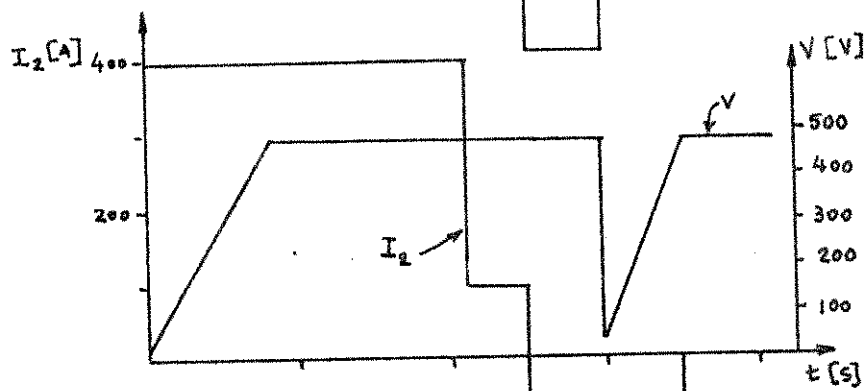
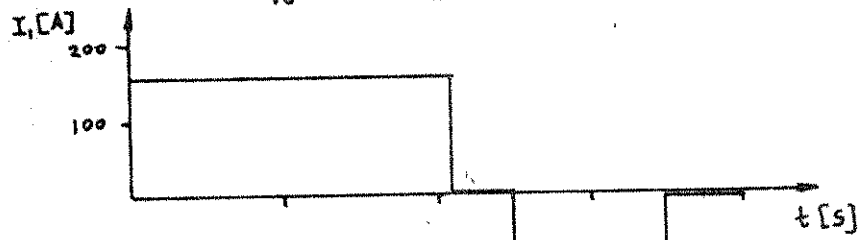
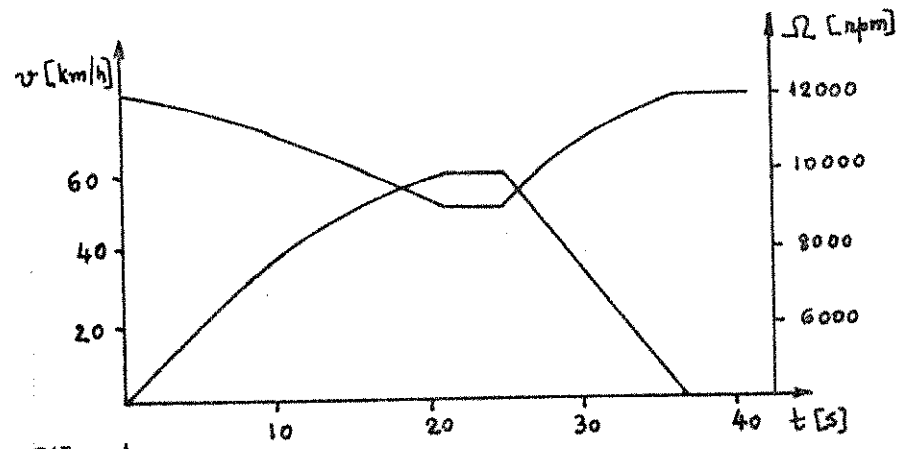
ENERGIA INICIAL DO VOLANTE:..... 986.97 WH
 VARIACAO DE ENERGIA DO VOLANTE:..... 596.30 WH
 ENERGIA MAXIMA DO VEICULO:..... 835.24 WH
 ENERGIA EXTERNA PERDIDA:..... 220.26 WH
 ENERG. EXT. PERDIDA ATE O FIM DO REGIME:.. 166.59 WH
 ENERGIA PERDIDA NO VOLANTE:..... 1.59 WH
 ENERG. PERDIDA NAS TRANSMISSOES NEC.:... 132.94 WH
 ENERGIA PERDIDA NAS MAQUINAS:..... 42.15 WH
 CONSUMO DE ENERG. EXTERNA C/VOLANTE:..... 104.00 WH
 CONSUMO DE ENERG. EXTERNA S/VOLANTE:..... 514.56 WH
 CONSUMO DE ENERG. EXTERNA S/VOLANTE:..... 100.57 WH/TON.KM
 CONSUMO DE ENERG. EXTERNA S/VOLANTE:..... 984.07 WH
 ENERGIA ESPECIFICA S/VOLANTE:..... 172.79 WH/TON.KM

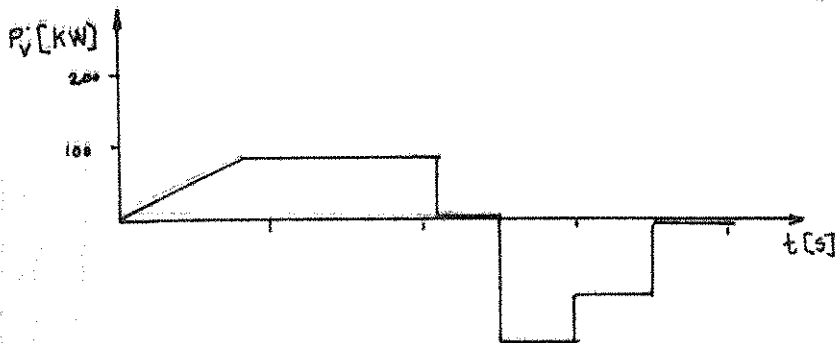
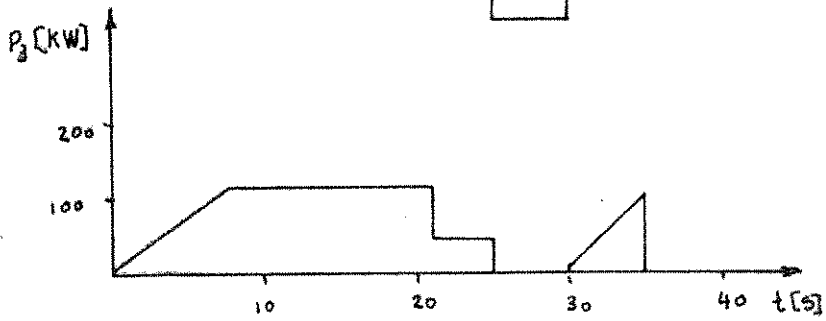
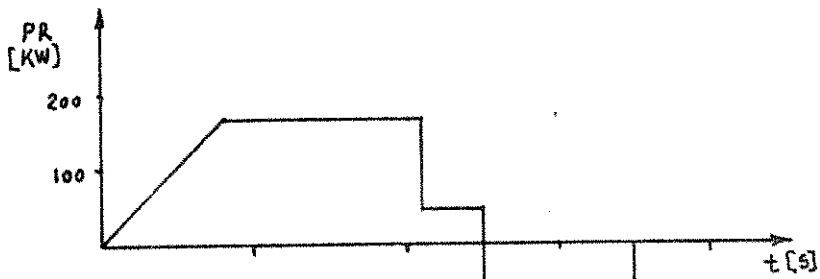
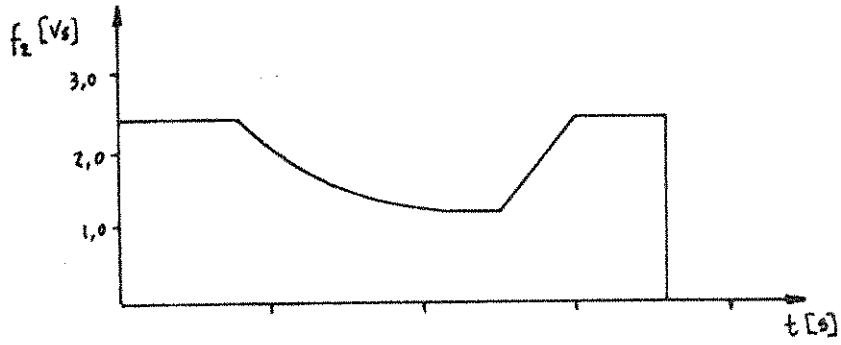
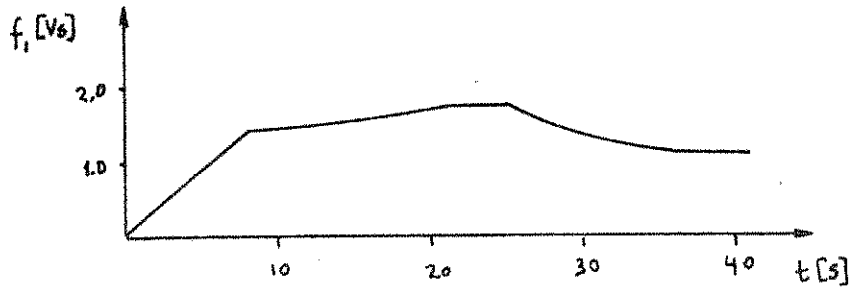
POTENCIA MAX. NA ACELER. NAS RODAS:..... 215.91 KW
 POTENCIA DE REGIME NAS RODAS:..... 47.68 KW
 POTENCIA MAX. NA DESACEL. NAS RODAS:..... 243.15 KW

LIVITE RECUPERAVEL DE ENERGIA (IDEAL):... 71.82 %
 ECONOMIA EFETIVA DE ENERGIA:..... 41.80 %
 PARCELA RECUPERADA DE ENERGIA:..... 54.20 %

EFICIENCIA NA ACELERACAO:..... 86.27 %
 EFICIENCIA NO REGIME:..... 92.06 %
 EFICIENCIA NA DESACELERACAO:..... 89.04 %
 EFICIENCIA NO CARREGAMENTO DO VOLANTE:.. 90.48 %

VALOR EFICAZ DA CORRENTE NA MAO 1:..... 142.15 A
 VALOR EFICAZ DA CORRENTE NA MAO 2:..... 169.83 A
 VALOR EFICAZ DA CORRENTE EXTERNA:..... 132.51 A





N	MH	T (S)	S (M)	AGR	RTAPL	PR KW	PV KW	P3 KW	E3 KW	EEEC	EVOLA	EPIVA	FFR
		42 N1	41RPH	R2RPH	PZ/PX	D1 K1	P2 K1	DFR KW	EXSTL	EEEP	EPCKV	EPHAL	PFRR
11	10.67	0.000	3.000	1.209	0.978	0.000	4.329	2.689	0.000	0.000	986.965	0.000	0.000
		1026.68	3031.162	0.000	0.970	4.033	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	50.66	1.000	0.639	1.240	0.971	27.553	20.462	16.900	2.712	3.431	983.512	0.466	0.000
		1026.68	3110.522	263.359	0.928	18.244	28.422	0.000	5.539	0.349	0.052	1.867	0.000
11	96.00	2.000	2.159	1.276	0.971	57.340	39.631	31.500	9.425	14.103	975.305	1.733	0.000
		1026.68	3267.132	535.361	0.985	32.845	57.623	0.000	19.570	1.411	0.104	3.734	0.000
11	148.33	3.000	5.585	1.317	0.977	89.884	59.351	46.544	20.253	32.674	961.712	3.850	0.000
		1026.68	3379.831	815.891	0.849	47.888	87.710	0.000	42.831	3.216	0.155	5.601	0.000
11	210.87	4.000	10.027	1.365	0.972	125.963	82.392	62.103	35.330	50.972	941.925	6.921	0.000
		1026.68	3473.297	1105.237	0.792	63.447	118.928	0.000	76.351	5.804	0.205	7.469	0.000
21	284.86	5.000	15.934	1.287	0.974	151.354	101.290	71.297	54.460	98.179	915.449	10.924	0.000
		919.181	3651.835	1599.897	0.782	72.842	137.217	0.000	120.990	9.257	0.259	9.336	0.000
21	283.89	6.000	21.925	1.145	0.974	157.697	108.841	71.297	74.205	134.851	886.131	15.218	0.000
		790.251	3189.295	1657.393	0.995	72.842	137.217	0.000	167.494	11.462	0.299	11.203	0.000
21	310.13	7.000	31.137	1.009	0.975	194.421	116.985	71.297	94.010	174.601	854.666	19.655	0.000
		699.922	2231.258	1865.343	0.652	72.842	137.217	0.000	216.893	18.440	0.343	13.070	0.000
21	336.29	8.000	40.363	0.939	0.976	171.940	124.198	71.297	113.815	215.624	821.476	24.247	0.000
		623.256	2082.719	2095.708	0.609	72.842	137.217	0.000	268.479	24.111	0.384	14.937	0.000
21	369.87	9.000	50.526	0.895	0.976	189.677	133.622	71.297	133.619	259.221	785.066	29.015	0.000
		571.355	1874.973	2293.388	0.566	72.842	137.217	0.000	322.529	39.454	0.423	16.804	0.000
21	411.24	10.000	61.597	0.870	0.976	194.292	145.074	71.297	153.424	387.022	746.980	33.994	0.000
		527.600	1683.216	2483.564	0.521	72.842	137.217	0.000	379.534	37.462	0.460	18.672	0.000
21	467.13	11.000	73.520	0.854	0.978	204.928	159.784	71.297	173.229	350.084	704.701	39.236	0.000
		490.700	1484.989	2678.349	0.473	72.842	137.217	0.000	449.221	45.141	0.493	20.539	0.000
4	616.01	12.000	86.303	0.799	0.979	185.241	203.115	5.377	186.224	397.599	654.511	44.714	0.000
		280.160	1272.951	2845.768	0.421	82.115	83.621	0.000	501.580	53.506	0.524	27.122	0.000
4	616.01	13.000	99.835	0.688	0.980	170.933	191.360	19.210	189.643	440.852	595.378	50.017	0.000
		260.48	1059.414	2992.608	0.360	83.283	83.621	0.000	558.398	62.485	0.552	23.193	0.000
4	616.01	14.000	114.051	0.670	0.980	196.397	185.605	32.686	196.842	485.075	546.781	55.161	0.000
		254.04	849.300	3193.303	0.308	54.636	83.621	0.000	616.899	72.058	0.576	24.273	0.000
4	616.01	15.000	128.938	0.654	0.981	201.741	176.951	46.423	207.900	530.205	495.919	60.147	0.000
		242.99	638.005	3286.272	0.242	41.076	83.621	0.000	677.038	82.227	0.597	25.349	0.000
4	616.01	16.000	141.479	0.539	0.983	206.268	168.997	59.831	222.660	576.202	448.491	64.973	0.000
		233.09	428.811	3125.036	0.171	27.602	83.621	0.000	738.775	92.998	0.615	26.624	0.000
4	616.01	17.000	169.657	0.625	0.984	212.040	159.344	73.122	241.128	623.078	402.998	65.640	0.000
		224.16	242.767	3562.342	0.094	11.370	83.621	0.000	803.073	104.375	0.631	27.560	0.000
5	0.00	18.000	177.303	0.000	1.000	42.675	0.000	45.918	256.244	636.244	390.722	71.500	0.000
		123.33	165.521	3599.926	0.071	9.000	45.361	0.000	823.650	116.206	0.645	27.623	0.000
5	0.00	19.000	193.971	0.000	1.000	42.675	0.000	45.918	265.999	636.244	390.704	72.246	0.000
		120.33	165.461	3599.926	0.071	0.000	45.361	0.000	842.614	128.060	0.659	28.078	0.000
5	0.00	20.000	210.640	0.000	1.000	42.675	0.000	45.918	281.754	636.244	390.694	72.992	0.000
		120.33	165.441	3599.926	0.071	0.000	45.361	0.000	855.370	139.914	0.672	28.233	0.000

5	0.00	21.000	227.309	0.000	1.000	42.675	0.000	45.918	294.509	636.244	390.680	73.737	0.000
		129.33	165.401	3599.926	0.071	0.000	45.361	0.000	868.125	151.768	0.680	24.348	0.000
5	0.00	22.000	243.977	0.000	1.000	42.675	0.000	45.918	307.264	636.244	390.680	74.483	0.000
		129.33	165.360	3599.926	0.071	0.000	45.361	0.000	880.880	163.623	0.700	26.543	0.000
6	-1026.68	23.000	260.247	-1.500	0.982	-241.316	-230.271	26.149	314.420	555.481	437.966	78.703	24.131
		-78.05	436.423	3363.695	0.184	-46.922	-27.494	104.985	884.069	175.090	0.715	29.967	3707.370
6	-1026.68	24.000	275.072	-1.500	0.980	-242.131	-238.573	46.133	324.459	453.637	507.232	84.737	48.713
		-149.15	808.165	3039.738	0.323	-46.389	-47.478	71.944	884.069	185.206	0.733	31.834	2811.373
6	-1026.68	25.000	288.396	-1.500	0.979	-242.945	-276.875	66.117	340.049	362.098	581.577	91.464	64.069
		-237.21	1179.501	2715.781	0.440	-126.856	-67.461	38.563	884.069	194.018	0.756	33.702	1886.672
7	-616.98	26.000	300.221	-1.500	0.977	-139.528	-174.526	0.000	344.979	280.863	639.864	97.570	76.553
		-409.03	1504.126	2391.024	0.535	-97.181	-102.451	49.107	884.069	201.615	0.782	35.270	2438.753
7	-517.45	27.000	310.546	-1.500	0.976	-174.613	-151.435	0.000	344.979	209.933	684.901	102.787	89.279
		-473.11	1793.440	2067.867	0.616	-97.181	-102.451	40.880	884.069	208.076	0.812	36.734	2348.243
7	-448.74	28.000	319.371	-1.500	0.975	-156.959	-135.074	0.000	344.979	149.309	724.546	107.567	94.581
		-561.00	2068.047	1743.912	0.691	-97.181	-102.451	25.159	884.069	213.473	0.844	38.197	1713.069
7	-397.92	29.000	326.695	-1.500	0.974	-143.599	-122.693	0.000	344.979	98.989	760.240	112.041	102.844
		-688.99	2332.139	1419.956	0.761	-97.181	-102.451	4.948	884.069	217.963	0.879	39.661	413.679
7	-358.55	30.000	332.520	-1.500	0.973	-111.809	-112.900	19.967	347.250	58.974	792.875	116.130	103.472
		-718.68	2549.263	1096.000	0.827	-97.181	-82.485	3.007	884.069	221.236	0.916	41.125	325.941
7	-326.98	31.000	336.845	-1.500	0.972	-77.264	-104.901	44.347	356.182	29.283	823.051	119.606	104.443
		-718.68	2636.122	772.045	0.890	-97.181	-58.104	3.699	884.069	223.813	0.956	42.599	569.050
7	-301.02	32.000	339.670	-1.500	0.971	-44.129	-98.210	68.728	371.887	9.857	851.193	122.495	105.368
		-718.68	3082.877	448.089	0.950	-97.181	-33.723	2.893	884.069	225.441	0.997	44.053	766.817
7	-279.24	33.000	340.995	-1.500	0.970	-12.059	-92.506	93.109	394.364	0.757	877.618	124.823	105.947
		-718.68	3323.395	124.134	1.009	-97.181	-9.342	0.972	884.069	226.201	1.040	45.517	929.678
10	-194.42	34.000	341.105	0.000	0.970	0.000	-65.167	71.297	417.061	0.000	898.451	126.394	106.000
		0.00	3135.883	0.000	1.031	-69.953	0.000	0.000	884.069	226.264	1.085	46.317	0.000
10	-192.49	35.000	341.105	0.000	0.970	0.000	-65.167	71.297	436.866	0.000	916.507	127.724	106.000
		0.00	3470.240	0.000	1.031	-69.953	0.000	0.000	884.069	226.264	1.132	46.691	0.000
10	-190.63	36.000	341.105	0.000	0.970	0.000	-65.167	71.297	456.671	0.000	934.561	129.053	106.000
		0.00	3504.253	0.000	1.031	-69.953	0.000	0.000	884.069	226.264	1.180	47.064	0.000
10	-188.81	37.000	341.105	0.000	0.970	0.000	-65.167	71.297	476.476	0.000	952.613	130.382	106.000
		0.00	3537.937	0.000	1.031	-69.953	0.000	0.000	884.069	226.264	1.229	47.437	0.000
10	-187.05	38.000	341.105	0.000	0.970	0.000	-65.167	71.297	496.281	0.000	970.665	131.712	106.000
		0.00	3571.300	0.000	1.031	-69.953	0.000	0.000	884.069	226.264	1.279	47.811	0.000
12	-0.54	39.000	341.105	0.000	0.970	0.000	-0.188	0.206	514.275	0.000	986.985	132.920	106.000
		0.00	3601.198	0.000	1.031	-0.202	0.000	0.000	884.069	226.264	1.331	48.150	0.000
12	-0.54	40.000	341.105	0.000	0.970	0.000	-0.188	0.206	514.333	0.000	986.985	132.924	106.000
		0.00	3601.198	0.000	1.031	-0.202	0.000	0.000	884.069	226.264	1.383	48.150	0.000
12	-0.54	41.000	341.105	0.000	0.970	0.000	-0.188	0.206	514.390	0.000	986.985	132.927	106.000
		0.00	3601.198	0.000	1.031	-0.202	0.000	0.000	884.069	226.264	1.436	48.150	0.000
12	-0.54	42.000	341.105	0.000	0.970	0.000	-0.188	0.206	514.447	0.000	986.985	132.931	106.000
		0.00	3601.198	0.000	1.031	-0.202	0.000	0.000	884.069	226.264	1.488	48.150	0.000
12	-0.54	43.000	341.105	0.000	0.970	0.000	-0.188	0.206	514.504	0.000	986.985	132.935	106.000
		0.00	3601.198	0.000	1.031	-0.202	0.000	0.000	884.069	226.264	1.540	48.150	0.000



RESUMO DOS RESULTADOS :

PARAMETROS DO SISTEMA :

MASSA TOTAL DO VEICULO: 15000,00 KG
 INERCIAS DO VOLANTE: 4,200 KG.M2
 AREA FRONTAL DO VEICULO: 6,000 M2
 COEF. DE RESIST. AERODINAMICA: 0,150
 COEF. DE RESIST. AO ROLAMENTO: 0,01400
 RAIO DO Eixo: 0,1555 M
 INERCIA TOTAL DOS EIXOS: 4500,000 KG.M2
 VELOCIDADE DE REGIME: 50,00 KM/H
 ACELERAÇÃO INICIAL: 1,100 M/S2
 ACELERAÇÃO MINIMA: 0,200 M/S2
 DESACELERAÇÃO: 1,570 M/S2
 VEL. ANG. MAX. DO VOLANTE: 12000,0 RPM
 MOMENTO RESIST. MAX. NO VOLANTE: 0,150 N.M
 TEMPO EM REGIME: 5,0 S

TRANSMISSOES

DIFERENCIAL: REDACAO: EFICIENCIA
 RUAS: 3,570 0,96
 POLIAS MAQ 1: 0,600 0,96
 POLIAS MAQ 2: -0,400 0,96
 POLIAS MAQ 3: -1,250 0,96
 POLIAS MAQ 4: 3,500 0,96
 POLIAS MAQ 5: 1,000 1,00
 AUTO-GERADORES:
 VOLTAZEN MAXIMA: 480,0 V
 CORRENTE MAXIMA: 393,7 A
 CORRENTE EXTERNA MAX: 236,2 A
 F MAXIMO: 2,40 VS
 F BASO: 0,80 VS
 RESISTENCIA DE ARMADURA: 0,08 OHM

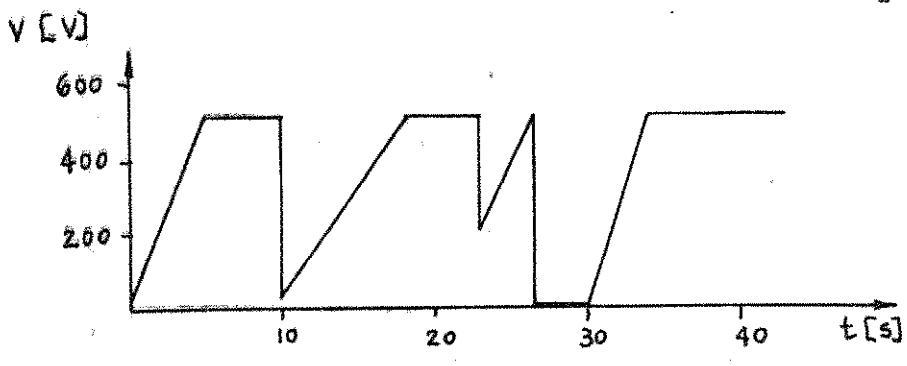
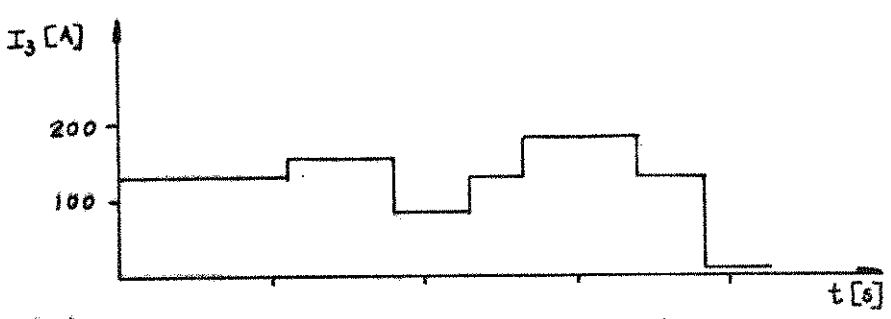
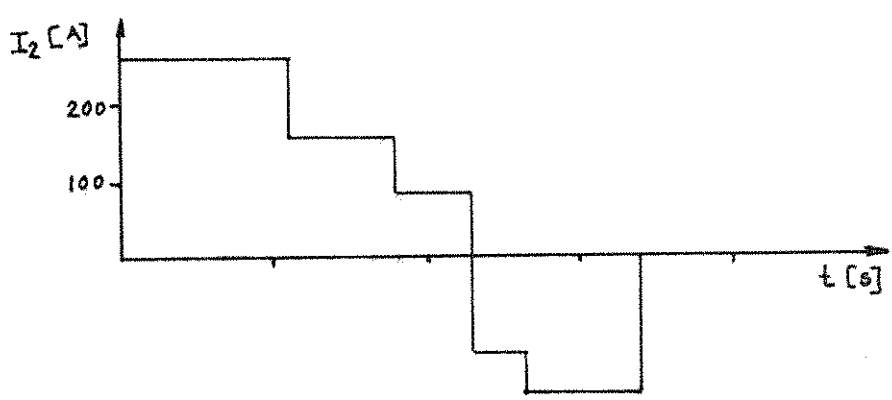
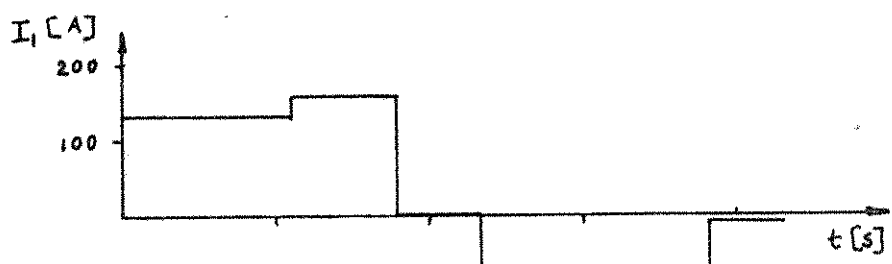
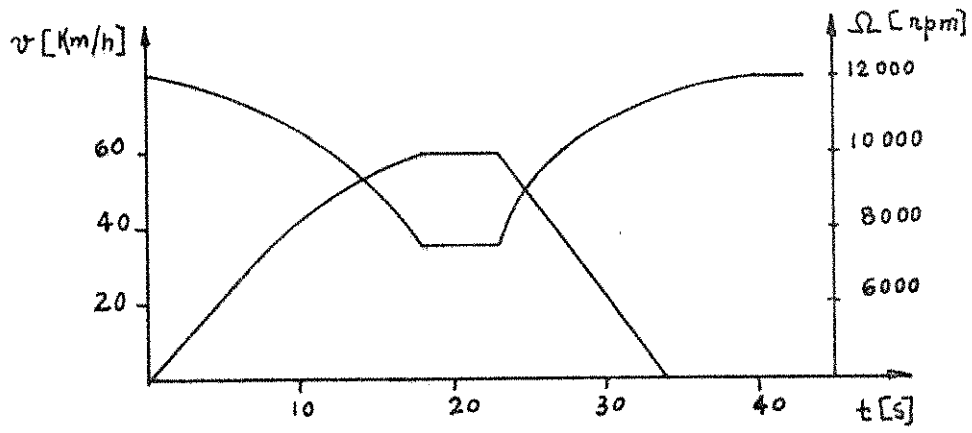
SISTEMA SEM BIFUPCACAÇÃO DE ENERGIA

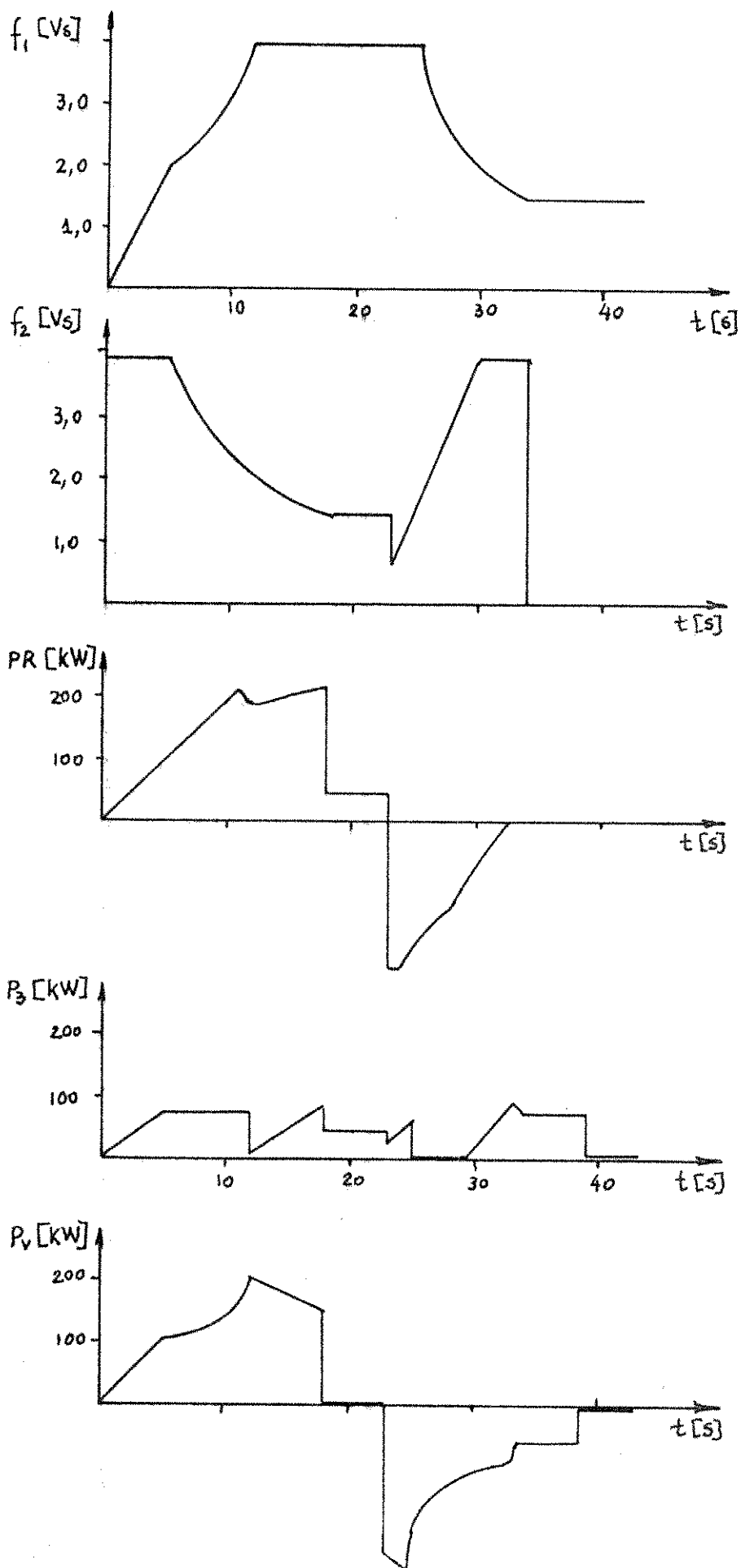
POSICAO DOS EIXOS DO PLANETARIO= 1
 PASSO DE INTEGRACAO = 0,0500 S
 PASSO DE IMPRESSAO = 1,0000 S

CORRENTE EXTERNA I3= I30 INICIALMENTE

OUTROS VALORES:
 TOTAL = 391,3330
 KAR = 0,0066
 ZKA = -2,4500
 KI = 0,3000
 NR = 317,3623
 YZA = 0,0000
 BI = 0,0000

ACELERAÇÃO MAXIMA: 1,10 M/S2
 DESACELERAÇÃO MAXIMA: 1,51 M/S2
 VELOCIDADE DE REGIME: 50,01 KM/H
 DIÁMETRO DO CICLO: 41,40 S
 DURACAO DA ACELERAÇÃO: 20,30 S
 DURACAO DO REGIME: 4,95 S
 DURACAO DA DESACELERAÇÃO: 11,15 S
 DURACAO DO CAPREAMENTO DO VOLANTE: 1,00 S
 DURACAO DO REGIME DO VOLANTE: 5,00 S
 ESPAÇO PERCORRIDO: 373,72 M
 VEL. ANG. INICIAL DA MAQ 1: 3600,00 RPM
 VEL. ANG. MINIMA DA MAQ 1: 2737,19 RPM
 VEL. ANG. MAXIMA DA MAQ 2: 3615,07 RPM
 VEL. ANG. MINIMA DO VOLANTE: 9123,93 RPM
 VEL. ANG. FINAL DO VOLANTE: 12001,54 RPM
 R2 MINIMO: 1,22 VS
 R2 MAXIMO: 1,19 VS
 ENERGIA INICIAL DO VOLANTE: 921,17 WH
 VARIACAO DE ENERGIA DO VOLANTE: 389,64 WH
 ENERGIA MAXIMA DO VEICULO: 637,22 WH
 ENERGIA EXTERNA PERDIDA: 247,87 WH
 ENERGIA EXT. PERDIDA ATÉ O FIM DO REGIME: 187,36 WH
 ENERGIA PERDIDA NO VOLANTE: 1,63 WH
 ENERGIA PERDIDA NAS TRANSMISSOES MEC.: 122,52 WH
 ENERGIA PERDIDA NAS MANUTENS.: 129,89 WH
 ENERGIA PERDIDA NOS FREIOS: 174,24 WH
 CONSUMO DE ENERG. EXTERNA C/VOLANTE: 679,22 WH
 CONSUMO DE ENERG. EXTERNA S/VOLANTE: 120,89 WH/TON.KM
 CONSUMO DE ENERG. ESPECIFICA S/VOLANTE: 945,48 WH/TON.KM
 POTENCIA DE REGIME NAS RODAS: 169,66 WH/TON.KM
 42,67 KW
 LIMITE RECUPERAVEL DE ENERGIA (IDEAL): 69,90 %
 ECONOMIA EFETIVA DE ENERGIA: 28,27 %
 FAIXA RECUPERADA DE ENERGIA: 40,44 %
 EFICIENCIA NA ACELERAÇÃO: 83,50 %
 EFICIENCIA NO REGIME: 90,58 %
 EFICIENCIA NA DESACELERAÇÃO: 60,50 %
 EFICIENCIA NO CAPREAMENTO DO VOLANTE: 0,00 %
 VALOR EFICAZ DA CORRENTE NA MAQ 1: 194,28 A
 VALOR EFICAZ DA CORRENTE NA MAQ 2: 321,46 A
 VALOR EFICAZ DA CORRENTE EXTERNA: 185,38 A







N	M1	NM	T (S)	S (M)	ACK	ETAPL	PP K4	PV K4	P3 K4	E3 MR	EVEIC	FVOLA	EPTRA	FFR
			M2 NM	JIBPM	VZBPM	PZPX	P1 K4	P2 K4	PR K4	EXSVL	EXPER	FPERY	EPWAO	MFRR
1	18.42		0.000	0.000	1.100	0.980	0.000	7.379	7.441	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			944.94	3600.310	2.000	0.980	6.945	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	43.566		1.000	0.550	1.100	0.980	22.215	17.414	21.009	4.035	2.771	917.072	0.397	0.000
			944.94	3593.172	238.027	0.980	16.390	23.613	0.000	6.725	0.315	0.052	3.596	0.000
1	68.800		2.000	2.200	1.099	0.980	44.425	27.447	35.773	12.005	11.080	911.389	4.346	0.000
			944.94	3580.854	477.146	0.980	25.833	47.221	0.000	20.008	1.262	0.109	7.992	0.000
1	94.533		3.000	4.940	1.099	0.980	66.624	37.175	49.931	23.908	24.920	902.321	2.846	0.000
			944.94	3562.992	745.653	0.980	35.272	79.817	0.000	39.847	2.946	0.155	11.988	0.000
1	120.611		4.000	3.797	1.094	0.980	88.808	47.196	64.078	39.743	44.277	890.468	4.899	0.000
			944.94	3539.518	953.937	0.980	44.793	91.396	0.000	65.238	5.077	0.200	15.984	0.000
1	167.24		5.000	13.743	1.097	0.980	110.970	57.508	78.212	59.506	60.132	875.835	7.502	0.000
			944.94	3510.310	1191.992	0.980	54.126	117.952	0.000	99.177	7.968	0.255	19.980	0.000
1	174.590		6.000	19.786	1.095	0.980	133.105	67.507	92.329	83.193	99.463	855.423	10.657	0.000
			944.94	3475.243	1429.762	0.980	63.537	141.181	0.000	138.655	11.537	0.303	23.976	0.000
1	202.81		7.000	26.924	1.094	0.980	155.208	77.192	106.426	110.798	135.240	838.238	14.361	0.000
			944.94	3434.140	1667.190	0.980	72.935	161.975	0.000	184.664	15.805	0.350	27.972	0.000
2	218.69		8.000	35.152	1.017	0.980	166.133	82.427	113.393	141.817	175.649	815.636	18.544	0.000
			887.51	3387.525	1900.007	0.980	77.579	176.587	0.000	236.362	20.793	0.394	31.968	0.000
2	221.84		9.000	44.398	0.902	0.980	166.133	82.427	113.393	173.315	216.110	792.490	22.794	0.000
			800.13	3339.548	2107.510	0.980	77.579	176.587	0.000	288.859	26.480	0.438	35.965	0.000
2	225.12		10.000	51.548	0.816	0.980	166.133	82.427	113.393	204.813	255.925	769.754	27.045	0.000
			735.26	3290.877	2293.449	0.980	77.579	176.587	0.000	341.355	32.813	0.479	39.961	0.000
2	228.55		11.000	65.516	0.749	0.980	166.133	82.427	113.393	236.311	295.136	746.823	31.295	0.000
			684.68	3241.178	2462.884	0.980	77.579	176.587	0.000	393.852	39.750	0.519	43.957	0.000
2	232.14		12.000	77.233	0.694	0.980	166.133	82.427	113.393	267.809	333.774	723.888	35.545	0.000
			643.83	3191.319	2619.140	0.980	77.579	176.587	0.000	446.349	47.260	0.557	47.953	0.000
2	235.91		13.000	89.645	0.648	0.980	166.133	82.427	113.393	299.307	371.862	700.956	39.796	0.000
			609.97	3149.361	2764.545	0.980	77.579	176.587	0.000	498.845	55.319	0.593	51.949	0.000
2	239.86		14.000	102.705	0.609	0.980	166.133	82.427	113.393	330.805	409.422	678.025	44.046	0.000
			581.31	3048.569	2900.302	0.980	77.579	176.587	0.000	551.342	63.908	0.627	55.945	0.000
2	244.02		15.000	116.375	0.575	0.980	166.133	82.427	113.393	362.303	446.469	655.095	48.297	0.000
			556.67	3015.891	3029.203	0.980	77.579	176.587	0.000	603.839	73.008	0.660	59.941	0.000
2	248.41		16.000	130.621	0.546	0.980	166.133	82.427	113.393	393.801	483.019	632.168	52.547	0.000
			535.20	2982.295	3150.756	0.980	77.579	176.587	0.000	656.335	82.697	0.692	63.937	0.000
2	253.04		17.000	145.413	0.526	0.980	166.133	82.427	113.393	425.299	519.084	609.242	56.797	0.000
			516.27	2927.717	3266.264	0.980	77.579	176.587	0.000	708.832	92.690	0.722	67.933	0.000
2			18.000	160.725	0.496	0.980	166.133	82.427	113.393	456.797	554.674	586.317	61.048	0.000



257,94	499,43	2872,107	3376,382	0,980	77,579	176,587	0,000	761,329	103,247	0,750	71,926
2	19,000	176,533	0,475	0,980	170,133	82,477	113,393	489,295	589,801	563,394	65,298
263,13	484,33	2815,403	3481,650	0,980	77,579	174,587	0,000	813,826	114,269	0,776	75,925
2	20,000	192,815	0,455	0,980	186,133	82,477	113,393	519,793	624,472	540,473	69,548
258,66	470,70	2757,536	3582,523	0,980	77,579	176,587	0,000	866,322	125,746	0,802	79,921
5	21,000	209,457	-0,000	1,000	42,674	0,000	46,097	538,519	636,220	532,620	71,404
0,00	119,79	2737,445	3616,065	0,980	0,000	45,359	0,000	891,697	137,574	0,826	81,327
5	22,000	226,126	-0,000	1,000	42,674	0,000	46,097	551,323	636,220	532,602	72,150
0,00	119,79	2737,384	3616,065	0,980	0,000	45,359	0,000	904,502	149,428	0,850	81,532
5	23,000	242,794	-0,000	1,000	42,674	0,000	46,097	564,128	636,220	532,578	72,895
0,00	119,79	2737,323	3616,065	0,980	0,000	45,359	0,000	917,307	161,282	0,873	81,737
5	24,000	259,462	-0,000	1,000	42,674	0,000	46,097	576,933	636,220	532,554	73,642
0,00	119,79	2737,262	3616,065	0,980	0,000	45,359	0,000	930,112	173,136	0,897	81,942
5	25,000	276,130	-0,000	1,000	42,674	0,000	46,097	589,738	636,220	532,530	74,388
0,00	119,79	2737,201	3616,065	0,980	0,000	45,359	0,000	942,916	184,990	0,921	82,146
6	26,000	292,822	-1,500	0,980	214,062	-166,202	0,000	593,366	557,642	565,208	79,189
597,99	568,07	2819,931	3395,402	1,020	-176,587	-201,390	132,884	945,477	196,477	0,946	87,142
6	27,000	307,277	-1,500	0,980	214,062	-166,202	0,000	593,366	455,590	611,347	85,594
574,98	628,48	2932,773	3059,988	1,020	-176,587	-201,390	100,666	945,477	206,621	0,973	94,032
6	28,000	320,632	-1,500	0,980	214,062	-166,202	0,000	593,366	363,843	657,884	91,999
554,44	703,27	3041,423	2734,573	1,020	-176,587	-201,390	68,106	945,477	215,458	1,004	100,922
6	29,000	332,887	-1,500	0,980	214,062	-166,202	0,000	593,366	282,401	703,617	98,403
535,95	798,26	3146,317	2409,159	1,020	-176,587	-201,390	35,239	945,477	223,079	1,038	107,811
6	30,000	342,842	-1,500	0,980	214,062	-166,202	0,000	593,366	211,263	749,747	104,808
519,20	922,92	3247,819	2083,745	1,020	-176,587	-201,390	2,102	945,477	229,563	1,075	114,701
7	31,000	351,697	-1,500	0,980	214,062	-166,202	0,000	594,670	150,406	780,691	108,665
313,86	566,96	3314,164	1758,188	1,020	-108,928	-104,386	71,823	945,477	234,979	1,116	117,696
7	32,000	359,051	-1,500	0,980	214,062	-166,202	0,000	601,095	99,883	809,127	112,300
308,30	566,96	3373,982	1432,774	1,020	-108,928	-85,067	58,792	945,477	239,389	1,158	120,176
7	33,000	364,905	-1,500	0,980	214,062	-166,202	0,000	612,887	59,664	837,561	115,397
303,02	566,96	3432,753	1107,360	1,020	-108,928	-65,747	45,600	945,477	242,841	1,203	122,657
7	34,000	369,260	-1,500	0,980	214,062	-166,202	0,000	630,046	29,750	865,993	118,157
298,00	566,96	3490,531	781,945	1,020	-108,928	-46,426	32,285	945,477	245,375	1,250	125,137
7	35,000	372,114	-1,500	0,980	214,062	-166,202	0,000	652,571	10,141	894,422	120,579
293,23	566,96	3547,363	456,531	1,020	-108,928	-27,105	18,881	945,477	247,021	1,294	127,617
7	36,000	373,469	-1,500	1,000	0,000	0,000	0,000	677,934	0,836	921,188	122,503
0,00	0,00	3600,050	131,117	1,020	0,000	0,000	13,702	945,477	247,798	1,350	129,891
12	37,000	373,605	0,000	0,980	0,000	-0,189	0,209	677,967	0,001	921,404	122,505
-0,53	0,00	3600,471	5,424	1,020	-0,200	0,000	0,000	945,477	247,867	1,402	129,891
12	38,000	373,630	0,000	0,980	0,000	-0,189	0,209	678,025	0,001	921,404	122,508
											178,241
											177,474
											12468,956



SIMULAÇÃO DE UM VEICULO HIBRIDO COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM VOLANTE

RESUMO DOS RESULTADOS :

PARAMETROS DO SISTEMA :

MASSA TOTAL DO VEICULO:	15000.00	KG	1.11	M/S ²
INERCIA DO VOLANTE:	19.50	KG.M ²	1.50	M/S ²
AREA FRONTAL DO VEICULO:	6.00	F ²	50.00	KM/H
COEF. DE RESIST. AERODINAMICA:	0.50		51.20	S
COEF. DE RESIST. AO ROLAMENTO:	0.0140		20.00	S
TAXA DOS PNEUS:	0.55	M	4.95	S
INERCIA TOTAL DOS EIXOS:	450.00	KG.M ²	11.15	S
VELOCIDADE DE REGIME:	1.60.0	KM/H	10.10	S
ACCELERACAO INICIAL:	0.850	M/S ²	5.00	S
ACCELERACAO MINIMA:	0.100	M/S ²	356.24	M
DESAC. MINIMA:	1.500	M/S ²	3506.99	RPM
VEL. ANG. MAX. DO VOLANTE:	12000.0	RPM	3.23	RPM
MOMENTO RESIST. MAX. DO VOLANTE:	0.150	N.M	3599.53	RPM
TEMPO EM REGIME:	5.0	S	11013.96	RPM
			12010.27	RPM
			1.44	VS
			1.44	VS

TRANSMISSOES

RELACAO	EFICIENCIA
DIFERENCIAL.....	0.96
PLAN.FIAT.....	0.98
PLANETARIO.....	0.97
POLIAS MAQ 1.....	0.98
POLIAS MAQ 2.....	0.98
PLAN POLIA R.....	1.00

MOTO-GERADORES

VOLTAGEM MAXIMA.....	550.0	V
CORRENTE MAXIMA.....	190.8	A
CORRENTE EXTERNA MAX.....	95.4	A
CORR. EXT. MAX. NA DESC.....	133.5	A
F MAXIMO MAQ 1.....	3.96	VS
F MAXIMO MAQ 2.....	3.96	VS
F BASE MAQ 1.....	1.31	VS
F BASE MAQ 2.....	1.31	VS
PESISTENCIA DE ARMADURA.....	0.08	OHM

SISTEMA COM BIFURCACAÇÃO DE ENERGIA

POSICAO DOS EIXOS DO PLANETARIO=	1
PASSO DE INTEGRACAO =	0.0500 S
PASSO DE IMPRESSAO =	1.0000 S
CORRENTE EXTERNA I3= I30 INICIALMENTE	

OUTROS VALORES:

TETA1 =	394.8645	ALFAF =	10.0000
KAR =	0.0067	KR =	318.8112
ZXA =	-0.8524	YZA =	-2.1732
A1 =	0.2997	B1 =	-3.2070

ACELERACAO MAXIMA:	1.11	M/S ²
DESACELERACAO MAXIMA:	1.50	M/S ²
VELOCIDADE DE REGIME:	50.00	KM/H
DURACAO DO CICLO:	51.20	S
DURACAO DA ACCELERACAO:	20.00	S
DURACAO DO REGIME:	4.95	S
DURACAO DA DESACELERACAO:	11.15	S
DURACAO DO CARREGAMENTO DO VOLANTE:	10.10	S
DURACAO DO REGIME DO VOLANTE:	5.00	S
ESPAÇO PERCORRIDO:	356.24	M
VEL. ANG. INICIAL DA MAQ 1:	3506.99	RPM
VEL. ANG. MINIMA DA MAQ 1:	3.23	RPM
VEL. ANG. MAXIMA DA MAQ 2:	3599.53	RPM
VEL. ANG. MINIMA DO VOLANTE:	11013.96	RPM
VEL. ANG. FINAL DO VOLANTE:	12010.27	RPM
F1 MINIMO:	1.44	VS
F2 MINIMO:	1.44	VS
ENERGIA INICIAL DO VOLANTE:	4057.52	WH
VARIACAO DE ENERGIA DO VOLANTE:	639.42	WH
ENERGIA MAXIMA DO VEICULO:	636.11	WH
ENERGIA EXTERNA PERDIDA:	235.51	WH
ENERG. EXT. PERDIDA ATE O FIM DO REGIME:	175.01	WH
ENERGIA PERDIDA AO VOLANTE:	2.46	WH
ENERG. PERDIDA NAS TRANSMISSOES REC.:	128.61	WH
ENERGIA PERDIDA NAS ARMADURAS:	29.96	WH
ENERGIA PERDIDA NOS FREIOS:	116.66	WH
CONSUMO DE ENERG. EXTERNA C/VOLANTE:	512.56	WH
ENERGIA ESPECIFICA C/VOLANTE:	95.92	WH/TON.KM
CONSUMO DE ENERG. EXTERNA S/VOLANTE:	881.85	WH
ENERGIA ESPECIFICA S/VOLANTE:	165.03	WH/TON.KM
POTENCIA MAX. NA ACCLER. NAS RODAS:	213.89	KW
POTENCIA DE REGIME NAS RODAS:	42.67	KW
POTENCIA MAX. NA DESACEL. NAS RODAS:	204.49	KW
LIMITE RECUPERAVEL DE ENERGIA (IDEAL):	70.96	%
ECONOMIA ESPECIFICA DE ENERGIA:	41.88	%
PARCELA RECUPERADA DE ENERGIA:	59.01	%
EFICIENCIA NA ACCELERACAO:	90.03	%
EFICIENCIA NO REGIME:	89.74	%
EFICIENCIA NA DESACELERACAO:	89.70	%
EFICIENCIA NO CARREGAMENTO DO VOLANTE:	91.30	%
VALOR EFICAZ DA CORRENTE NA MAQ 1:	111.96	A
VALOR EFICAZ DA CORRENTE NA MAQ 2:	120.50	A
VALOR EFICAZ DA CORRENTE EXTERNA:	104.63	A



RESUMO DO PROJETO DE VEICULO COM MOTOR DIESEL DE 50 CV E TRANSMISSAO DE 5 VOLTANTES

PARAMETROS DO VEICULO :

MASSA TOTAL DO VEICULO: 15700.00 KG
 INERCIA DO VOLANTE: 3.00 KG.M²
 AREA FRONTAL DO VEICULO: 0.00 M²
 COEF. DE RESIST. AERODINAMICA: 0.50
 COEF. DE RESIST. AO ROLAMENTO: 0.0150
 RAIO DOS PNEUS: 0.55 M
 INERCIA TOTAL DOS EIXOS: 450.00 KG.M²
 VELOCIDADE DE REGIME: 80.0 KM/H
 ACELERAÇÃO INICIAL: 1.100 M/S²
 ACELERAÇÃO MINIMA: 0.200 M/S²
 DESAC. MINIMA: 1.500 M/S²
 VEL. ANG. MAX. DO VOLANTE: 12000.0 RPM
 MOMENTO RESIST. MAX. DO VOLANTE: 0.150 N.M
 TEMPO EM REGIME: 5.0 S

TRANSMISSOES

DIFERENCIAL: 5.576 EFICIENCIA
 PLAN. FIXO: 0.960
 PLANETARIO: -0.400
 POLIAS MAO 1: -1.250
 POLIAS MAO 2: 4.100
 PLAN POLIA K: 1.000

MOTO-GERADORES

VOLTAGEM MAXIMA: 503.0 V
 CORRENTE MAXIMA: 350.7 A
 CORRENTE EXTERNA MAX: 175.4 A
 CORR. EXT. MAX. TA DESC: 245.5 A
 F MAXIMO MAO 1: 6.50 VS
 F MAXIMO MAO 2: 2.30 VS
 F BASE MAO 1: 0.80 VS
 F BASE MAO 2: 0.80 VS
 RESISTENCIA DE ARMADURA: 0.04 GRM

SISTEMA COM BIFUNCAO DE ENERGIA

POSICAO DOS EIXOS DO PLANETARIO: 1
 PASSO DE INTEGRACAO = 0.0500 S
 PASSO DE IMPRESSAO = 1.0000 S
 CORRENTE EXTERNA IS= I30 INICIAL/INTE

OUTROS VALORES:

TETA1 = 391.3330
 KAR = 0.0000
 ZXA = -2.4500
 AI = 0.3000
 K6 = 317.3823
 Y24 = -1.4082
 EI = -1.7510

ATENUACAO MAGN.: 1.33 M/S²
 O.S. CALIBRACAO DE XELOS: 2.47 M/S²
 VALIDACAO DE REGIME: 11.52 M/S²
 DURACAO DO CICLO: 30.00 S
 DURACAO DA ACCELERACAO: 12.35 S
 DURACAO DO REGIME: 1.90 S
 DURACAO DA DESACELERACAO: 6.65 S
 DURACAO DO CARREGAMENTO DO VOLANTE: 0.00 S
 DURACAO DO REGIME DO VOLANTE: 5.00 S
 ESPACO DE FREIAMENTO: 218.75 M

VEL. ANG. INICIAL DO MAO 1: 36.0.00 RPM
 VEL. ANG. MINIMA DO MAO 1: 739.75 RPM
 VEL. ANG. MAXIMA DO MAO 2: 3537.21 RPM
 VEL. ANG. MINIMA DO VOLANTE: 7639.05 RPM
 VEL. ANG. FINAL DO VOLANTE: 120.2.30 RPM
 F1 (MIN): 1.77 VS
 F2 (MIN): 1.25 VS

ENERGIA INICIAL DO VOLANTE: 657.9R NH
 VARIACAO DE ENERGIA DO VOLANTE: 322.3R WH
 ENERGIA MAXIMA DO VEICULO: 499.07 WH
 ENERGIA EXTERNA PERDIDA: 139.62 WH
 ENERG. EXT. PERDIDA AT O FIM DO REGIME: 1.3.11 WH
 ENERGIA PERDIDA NO VOLANTE: 1.15 WH
 ENERG. PERDIDA NAS TRANSMISSOES OPC: 41.83 WH
 ENERGIA PERDIDA NAS MANIVELAS: 29.44 WH
 ENERGIA PERDIDA NOS FERRAIS: 22.97 WH
 CONSUMO DE ENERG. EXTERNA C/VOLANTE: 327.9R WH
 ENERGIA ESPECIFICA C/VOLANTE: 100.16 WH/TON.KM
 CONSUMO DE ENERG. EXTERNA S/VOLANTE: 650.53 WH
 ENERGIA ESPECIFICA S/VOLANTE: 128.71 WH/TON.KM

POTENCIA MAX. NA ACCLER. DAS RODAS: 333.8R KW
 POTENCIA DE REGIME DAS RODAS: 34.7R KW
 POTENCIA MAX. NA DESACCLER. DAS RODAS: 547.93 KW

LIMITE RECUPERAVEL DE ENERGIA (LIDAL): 75.60 %
 ECONOMIA OPERATIVA DE ENERGIA: 49.60 %
 PORCELA RECUPERADA DE ENERGIA: 85.61 %
 EFICIENCIA NA ACCELERACAO: 45.12 %
 EFICIENCIA NO REGIME: 92.34 %
 EFICIENCIA NA DESACELERACAO: 41.95 %
 EFICIENCIA NO CARREGAMENTO DO VOLANTE: 0.00 %

VALOR EFICAZ DE CORRENTE NA MAO 1: 129.40 A
 VALOR EFICAZ DA CORRENTE NA MAO 2: 245.35 A
 VALOR EFICAZ DA CORRENTE EXTERNA: 115.42 A



PARÂMETROS DE VELOCIDADE DE ENERGIA EM VOLANTE

PARÂMETROS DE VELOCIDADE DE ENERGIA EM VOLANTE

MASSA TOTAL DO VOLANTE:	1500.00 KG	2.00	R/82
INERÇIA DO VOLANTE:	4.81	2.04	R/82
ÁREA FRONTAL DO VOLANTE:	0.60	46.39	KM/H
CORR. DE RESIST. AERODINÂMICA:	0.54	26.50	S
CORR. DE RESIST. A ROLAMENTO:	0.214	4.70	S
RAIO DOS PNEUS:	0.55	5.00	S
INERÇIA TOTAL DOS EIXOS:	150.00	6.90	S
VELOCIDADE DE REGIME:	99.9	0.99	S
ACELERAÇÃO INICIAL:	4.000	5.00	S
ACELERAÇÃO MÁXIMA:	0.200	151.77	M
PESAC. MÍNIMA:	1.500	3600.00	RPM
VEL. AVG. MÁX. DO VOLANTE:	1200.0	1379.44	RPM
MOMENTO RESIST. MÁX. DO VOLANTE:	0.150	3943.29	RPM
TEMPO EM REGIME:	5.0	859.24	RPM
		12002.55	RPM
		1.41	VS
		1.00	VS
TRANSMISSÕES			
DIFERENCIAL:	3.570		
PLAN. FIAD:	0.000		
PLANETÁRIO:	-0.400		
POLIAS MAO 1:	-1.250		
POLIAS MAO 2:	5.000		
PLAN POLIA R:	1.000		
MOTO-GERADORES			
VOLTAGEM MÁXIMA:	550.0	V	
CORRENTE MÁXIMA:	300.0	A	
CORRENTE EXTERNA MÁX:	150.0	A	
CURR. EXT. MÁX. NA DESC:	225.0	A	
F MÁXIMO MAO 1:	3.50	VS	
F MÁXIMO MAO 2:	3.50	VS	
F BASE MAO 1:	1.00	VS	
F BASE MAO 2:	1.00	VS	
RESISTÊNCIA DE ARMADURA:	0.09	OHM	
SISTEMA COM BIFURCAÇÃO DE ENERGIA			
POSICAO DOS EIXOS DO PLANTABILDR	1		
PASSO DE INTEGRACAO	= 0.0570	S	
PASSO DE IMPRESSAO	= 1.0000	S	
CORRENTE EXTERNA I3= I30 INICIALMENTE			
OUTROS VALORES:			
TEMPAL	= 391.3330		
KAR	= 0.0000	K2	= 317.3673
ZXA	= -2.4500	I2A	= -1.1072
A1	= 0.3000	H1	= -1.7570
EFICIÊNCIAS			
VAL. AVG. INICIAL DA MAO 1:			
VAL. AVG. MÁX. DA MAO 1:			
VAL. AVG. MÁX. DA MAO 2:			
VAL. AVG. MÍN. DO VOLANTE:			
VAL. AVG. FIM DO VOLANTE:			
FI MÁXIMO:			
FI MÍNIMO:			
ENERGIA INICIAL DO VOLANTE:		614.11	WH
VARIAÇÃO DE ENERGIA DO VOLANTE:		244.41	WH
ENERGIA MÁXIMA DO VEÍCULO:		349.14	KH
ENERGIA EXTERNA PERDIDA:		114.81	WH
ENERG. EXT. PERDIDA ATO O FIM DO REGIME:		87.97	WH
ENERGIA PERDIDA AO VOLANTE:		1.02	WH
ENERG. PERDIDA NAS TRANSMISSÕES MEC:		77.20	WH
ENERGIA PERDIDA NAS POLÍLIAS:		43.04	WH
ENERGIA PERDIDA NOS FREIOS:		12.00	WH
CONSUMO DE ENERGIA INTERNA C/VOLANTE:		217.92	WH
ENERGIA ESPECÍFICA C/VOLANTE:		40.93	WH/TON.KM
CONSUMO DE ENERGIA INTERNA S/VOLANTE:		521.50	WH
ENERGIA ESPECÍFICA S/VOLANTE:		141.27	WH/TON.KM
POTÊNCIA MÁX. NA ACEL. DAS RODAS:		217.02	KW
POTÊNCIA NA REGIME DAS RODAS:		60.39	KW
POTÊNCIA MÁX. NA DESACEL. DAS RODAS:		347.95	KW
LIMITO RECUPERAVEL DE ENERGIA (IRPAD):		75.44	%
EQUÍVALIA EFETIVA DE ENERGIA:		52.46	%
FAZDELA RECUPERADA DE ENERGIA:		69.50	%
EFICIÊNCIA DA ACELERAÇÃO:		67.03	%
EFICIÊNCIA DO REGIME:		92.64	%
EFICIÊNCIA DA DESACELERAÇÃO:		81.70	%
EFICIÊNCIA NO CONSUMO DE ENERGIA DO VOLANTE:		9.00	%
VALOR EFICAZ DA CORRENTE DA MAO 1:		159.30	A
VALOR EFICAZ DA CORRENTE DA MAO 2:		233.93	A
VALOR EFICAZ DA CORRENTE EXTERNA:		111.81	A

SIMULACAO DE UM VEICULO MONOTOR COM ARMADILHAMENTO DE ENERGIA EM VOLANTE

PARÂMETROS DO VEICULO :

MASSA TOTAL DO VEICULO (M)	1500.00	KG
INERÇIA DO VOLANTE (I)	1.50	KG.M ²
ÁREA FRONTAL DO VEICULO (A)	16.00	M ²
COEF. DE RESIST. AERODINÂMICA (C _D)	0.50	
COEF. DE RESIST. DO VOLANTE (C _R)	0.140	
RAIO DAS PNEUS (R)	0.50	M
INERÇIA INICIAL DO VEICULO (I ₀)	150.00	KG.M ²
VELOCIDADE DE NEUTRO (V _N)	100.0	KM/H
ACELERACAO INICIAL (A)	1.200	M/S ²
ACELERACAO MÁXIMA (A _M)	0.100	M/S ²
DESAO MÁXIMA (D _M)	1.500	M/S ²
VEL. ANG. MÁX. DO VOLANTE (W _M)	1200.0	RPM
MOMENTO RESIST. MÁX. DO VOLANTE (M _M)	4.000	N.M
TEMPO EM REGIME (T _R)	5.0	S

TRANSMISSOES

RELACAO	EFICIENCIA
DIFERENCIAL.....	0.96
PLAM.FIXO.....	0.98
PLAMETARIO.....	0.97
ROLIS MÁX 1.....	0.98
ROLIS MÁX 2.....	0.98
PLAM POLIA 8.....	1.00

NOTA-GERÁIS

VOLTAGEM MÁXIMA.....	550.0	V
CORRENTE MÁXIMA.....	251.3	A
CORRENTE EXTERNA MÁX.....	129.6	A
CORR. EXT. MÁX. MÁX DEJC.....	181.5	A
F FRAÇÃO MÁX 1.....	3.96	VS
F FRAÇÃO MÁX 2.....	3.96	VS
F BASE MÁX 1.....	1.31	VS
F BASE MÁX 2.....	1.31	VS
RESISTENCIA DE ARMADURA.....	0.08	OHM

SISTEMA COM BIFURCACAO DE ENERGIA

POSICAO DOS EIXOS DO PLANIMETRIJO	1	
PASSO DE INTEGRACAO	0.0500	C
PASSO DE IMPRESSAO	1.0000	S

CORRENTE, ENERGIA E TEMPO INICIALMENTE

OUTROS VALORES:			
ZETA1	= 394.0615	SEFEP	= 10.0000
KAR	= 0.0007	KH	= 315.8112
ZXA	= -0.0009	YEA	= -2.0742
AI	= 0.0001	BI	= -2.0120

ACELERACAO MÁXIMA.....	1.60	M/S ²
DIFERENCIAL.....	1.50	M/S ²
VELOCIDADE MÁX. DO VEICULO.....	70.00	KM/H
DIFERENCIAL DO VEICULO.....	13.40	S
DIFERENCIAL DO VEICULO.....	17.20	S
DIFERENCIAL DO VEICULO.....	1.90	S
DIFERENCIAL DO VEICULO.....	11.10	S
DIFERENCIAL DO VEICULO.....	0.00	S
DIFERENCIAL DO VEICULO.....	5.00	S
DESAO MÁXIMA.....	300.70	M
VEL. ANG. INICIAL DO VEICULO.....	3001.10	RPM
VEL. ANG. MÁX. DO VEICULO.....	115.20	RPM
VEL. ANG. MÁX. DO VEICULO.....	3601.30	RPM
VEL. ANG. MÁX. DO VEICULO.....	7305.60	RPM
VEL. ANG. MÁX. DO VEICULO.....	12001.90	RPM
F ₁ INICIAL.....	1.40	VS
F ₂ INICIAL.....	1.40	VS
ENERGIA INICIAL DO VOLANTE.....	986.90	WH
VARIACAO DE ENERGIA DO VOLANTE.....	613.10	WH
ENERGIA MÁXIMA DO VEICULO.....	635.70	WH
ENERGIA MÁXIMA MÁXIMA.....	226.00	WH
ENERGIA MÁXIMA MÁXIMA.....	106.00	WH
ENERGIA MÁXIMA MÁXIMA.....	42.00	WH
ENERGIA MÁXIMA MÁXIMA.....	135.30	WH
ENERGIA MÁXIMA MÁXIMA.....	89.30	WH
ENERGIA MÁXIMA MÁXIMA.....	106.30	WH
CINQUO DE ENERGIA MÁXIMA.....	557.50	WH
ENERGIA MÁXIMA MÁXIMA.....	109.00	WH/TON.KM
CORRENTE MÁX. MÁXIMA.....	632.70	WH
ENERGIA MÁXIMA MÁXIMA.....	172.70	WH/TON.KM
POTENCIA MÁX. MÁXIMA.....	214.80	KW
POTENCIA MÁX. MÁXIMA.....	42.70	KW
POTENCIA MÁX. MÁXIMA.....	230.20	KW
LIMITE RECONHECIMENTO DE ENERGIA (IDEAL).....	71.80	%
ECOLOGIA EFETIVA DE ENERGIA.....	30.80	%
PARCELA RECONHECIMENTO DE ENERGIA.....	51.20	%
EFICIENCIA DO VEICULO.....	0.80	%
EFICIENCIA DO VEICULO.....	0.70	%
EFICIENCIA DO VEICULO.....	0.70	%
EFICIENCIA DO VEICULO.....	0.70	%
VALOR EFETIVO DE CORRENTE MÁX. MÁXIMA.....	146.20	A
VALOR EFETIVO DE CORRENTE MÁX. MÁXIMA.....	198.90	A
VALOR EFETIVO DE CORRENTE MÁX. MÁXIMA.....	136.90	A

SISTEMA DE CAVALARIA COM APLICAÇÃO DE ENERGIA EM VOLANTE

PARÂMETROS DO SISTEMA :

MASSA TOTAL DO VEICULO: 15000.00 KG
 INERCIA DO VOLANTE: 4.50 KG.M²
 AREA FRONTAL DO VEICULO: 6.50 M²
 COEF. DE RESIST. AERODINAMICA: 0.70
 COEF. DE RESIST. AO ROLAMENTO: 0.0146
 FRIÇÃO DOS PNEUS: 0.55 X
 INERCIA TOTAL DOS EIXOS: 450.00 KG.M²
 VELOCIDADE DE REGIME: 67.0 KM/H
 ACELERAÇÃO INICIAL: 1.200 M/S²
 ACELERAÇÃO MINIMA: 0.100 M/S²
 DESAC. MINIMA: 1.500 M/S²
 VEL. ANG. MAX. DO VOLANTE: 12000.0 RPM
 MOMENTO RESIST. MÁXIMO VOLANTE: 4.000 N.M
 TEMPO EM REGIME: 40.0 S

TRANSMISSÕES
 DIFERENCIAL: 3.554 EFICIENCIA
 PLAN. FIXO: 0.768
 PLANETARIO: -1.042
 FOLIAS MAO 1: -1.000
 FOLIAS MAO 2: 3.500
 PLAN POLIA R: 1.000

NOTAS-GERANDORES
 VOLTAGEM MÁXIMA: 550.0 V
 CORRENTE MÁXIMA: 259.3 A
 CORRENTE EXTERNA MÁX.: 129.6 A
 CORR. EXT. MÁX. NA DESC.: 181.5 A
 F MÁXIMO MAO 1: 3.96 VS
 F MÁXIMO MAO 2: 3.96 VS
 F BASE MAO 1: 1.31 VS
 F BASE MAO 2: 1.31 VS
 RESISTENCIA DE ARMADURA: 0.08 OHM

SISTEMA COM BIFURCAÇÃO DE ENERGIA

POSIÇÃO DOS EIXOS DO PLANTARIO= 1
 PASSO DE INTEGRACAO = 3.0500 S
 PASSO DE IMPRESSAO = 1.0000 S

CORRENTE EXTERNA IS= I30 INICIALIZAMENTO

OUTROS VALORES:
 TOTAL = 394.8045 AREF = 10.0000
 KAR = 0.0101 RB = 314.4112
 ZXA = -0.9509 YEA = -7.0742
 AI = 0.3001 EI = -2.0420

A. ENERGIA MÁXIMA: 1.30 M/S²
 INERCIA MÁXIMA: 1.50 M/S²
 VELOCIDADE DE REGIME: 60.07 KM/H
 PERDA DO CICLO: 10.47 S
 DESAC. DO VOLANTE: 17.4- S
 DESAC. DO REGIME: 39.9- S
 DESAC. DO PLAN. DEPARTACAO: 11.1- S
 DESAC. DO PLAN. DEPARTACAO: 6.9- S
 DESAC. DO PLAN. DEPARTACAO: 5.0- S
 DESAC. DO PLAN. DEPARTACAO: 920.2- M
 VEL. ANG. MÁX. DO VOLANTE: 3601.1- RPM
 VEL. ANG. MÁX. DO MAO 1: 62.7- RPM
 VEL. ANG. MÁX. DO MAO 2: 3600.4- RPM
 VEL. ANG. MÁX. DO VOLANTE: 7209.9- RPM
 VEL. ANG. MÁX. DO VOLANTE: 12000.4- RPM
 F1 MÁXIMO: 1.4- VS
 F2 MÁXIMO: 1.4- VS
 ENERGIA INICIAL DO VOLANTE: 956.97 WH
 VARIACAO DE ENERGIA DO VOLANTE: 830.77 WH
 ENERGIA MÁXIMA DO VEICULO: 636.4- WH
 ENERGIA EXTERNA PERDIDA: 700.3- WH
 ENERG. PERD. POR FRIÇÃO NA FIM DO REGIME: 636.3- WH
 ENERGIA PERDIDA DO VOLANTE: 54.3- WH
 ENERG. PERDIDA NAS TRANSMISSÕES: 166.1- WH
 ENERGIA PERDIDA NAS LAVAGENS: 56.7- WH
 ENERGIA PERDIDA NOS FREIOS: 102.4- WH
 CONSUMO DE ENERGIA EXTERNA C/VOLANTE: 1079.9- WH
 ENERGIA ESPECIFICA C/VOLANTE: 77.7- WH/TON.KM
 CONSUMO DE ENERGIA EXTERNA C/VOLANTE: 1348.6- WH/TON.KM
 ENERGIA ESPECIFICA C/VOLANTE: 99.9- WH/TON.KM
 POTENCIA MAX. NA ACCEL. NAS RODAS: 215.2- KW
 POTENCIA DE REGIME NAS RODAS: 46.9- KW
 POTENCIA MAX. NA DESC. NAS RODAS: 237.3- KW
 LIMITE RECUPERAVEL DE ENERGIA (LINEAR): 44.9- %
 RECUPER. EFETIVA DE ENERGIA: 22.2- %
 PARCELA RECUPERADA DE ENERGIA: 19.4- %
 EFICIENCIA NA ACELERACAO: 96.8- %
 EFICIENCIA NA REGIME: 90.3- %
 EFICIENCIA NA DESACELERACAO: 86.4- %
 EFICIENCIA NO CORRETOAMENTO DO VOLANTE: 85.7- %
 VALOR EFICAZ DA CORRENTE NA MAO 1: 110.0- A
 VALOR EFICAZ DA CORRENTE NA MAO 2: 139.7- A
 VALOR EFICAZ DA CORRENTE EXTERNA: 120.1- A



SIMULACAO DE UM VEICULO (MOTOR COM AUMENTO DE ENERGIA EM VOLTAJE)

PARAMETROS DO SISTEMA:

MASSA TOTAL DO VEICULO:	15000.00	KG
INERCIA DO VOLANTE:	7.00	KG.M ²
AREA FRONTAL DO VEICULO:	0.30	M ²
COEF. DE RESIST. AERODINAMICA:	0.50	
COEF. DE RESIST. AO ROLAMENTO:	0.0140	
RAIO DOS PNEUS:	0.55	M
INERCIA ADIAL DOS EIXOS:	450.00	KG.M ²
VELOCIDADE DE REGIME:	60.0	KM/H
ACELERACAO INICIAL:	14.000	M/S ²
ACELERACAO MINIMA:	0.200	M/S ²
DESAC. MINIMA:	1.500	1/S ²
VEL. ANG. MAX. DO VOLANTE:	12000.0	RPM
MOMENTO RESIST. MAX. DO VOLANTE:	0.150	N.M
TEMPO EM REGIME:	5.0	S

TRANSMISSOES	RESCACA	EFICIENCIA
DIFERENCIAL	3.570	0.96
PLAN.FIXO	0.000	0.98
PLANETARIO	-0.430	0.98
POLIAS MAO 1	-1.250	0.98
POLIAS MAO 2	3.500	0.98
PLAN.POLIA R	1.000	1.00

MOTO-GERADORES		
VOLTAGE MAXIMA	550.0	V
CORRENTE MAXIMA	300.0	A
CORRENTE EXTERNA MAX.	100.0	A
CORR. EXT. MAX. NA DESAC.	230.8	A
F. MAXIMO MAO 1	2.70	VS
F. MAXIMO MAO 2	2.70	VS
F. BASE MAO 1	1.20	VS
F. BASE MAO 2	1.20	VS
RESISTENCIA DE ARAMADURA	0.98	OHM

SISTEMA SEM BIFURCACAO DE ENERGIA

POSICAO DOS CICLOS DO PLACETARIO	1	
PASSO DE INTEGRACAO	0.2500	S
PASSO DE IMPRESSAO	1.0000	S

CORRENTE EXTERNA I3= I30 INICIALMENTE

OUTROS VALORES:	
TOTAL	= 391.3330
BAR	= 0.0000
ZXA	= -2.4000
AI	= 0.3000

RESULTADOS PRINCIPAIS:

RENDERIZACAO MAXIMA:	1.10	M/S ²
DESAC. MINIMA MAXIMA:	1.50	M/S ²
VELOCIDADE DE REGIME:	60.01	KM/H
DURACAO DO CICLO:	41.55	S
DURACAO DA ACCELERACAO:	19.35	S
DURACAO DO REGIME:	4.95	S
DURACAO DA DESACELERACAO:	11.10	S
DURACAO DO CARREGAMENTO DO VOLANTE:	1.15	S
DURACAO DO REGIME DO VOLANTE:	5.00	S
ESPAÇAMENTO ENTRE:	303.79	M
VEL. ANG. INICIAL DA MAO 1:	3600.00	RPM
VEL. ANG. MINIMA DA MAO 1:	1722.93	RPM
VEL. ANG. MAXIMA DA MAO 2:	3016.77	RPM
VEL. ANG. MINIMA DO VOLANTE:	5703.10	RPM
VEL. ANG. FINAL DO VOLANTE:	11906.89	RPM
F. INICIAL:	1.32	VS
F. FINAL:	1.20	VS

ENERGIA INICIAL DO VOLANTE:	611.11	WH
VARIACAO DE ENERGIA DO VOLANTE:	473.45	WH
ENERGIA MAXIMA DO VEICULO:	636.29	WH
ENERGIA EXTERNA PERDIDA:	241.54	WH
ENERG. EXT. PERDIDA ATÉ O FIM DO REGIME:	181.65	WH
ENERGIA PERDIDA DO VOLANTE:	1.20	WH
ENERG. PERDIDA NAS TRANSMISSOES REC.	134.29	WH
ENERGIA PERDIDA NAS MANUBIAS:	115.18	WH
ENERGIA PERDIDA NOS FREIOS:	152.23	WH
CURSO DO EVOLV. EXTERNA C/VOLANTE:	042.77	WH
ENERGIA ESPECIFICA C/VOLANTE:	117.79	WH/TON.KM
CURSO DO EVOLV. EXTERNA S/VOLANTE:	945.66	WH
ENERGIA ESPECIFICA S/VOLANTE:	109.63	WH/TON.KM

POTENCIA MAX. NA ACEL. NAS RODAS:	170.52	KW
POTENCIA DE REGIME NAS RODAS:	12.08	KW
POTENCIA MAX. NA DESACEL. NAS RODAS:	241.48	KW

LIMITE RECUPERAVEL DE ENERGIA (INCLUI):	70.47	%
RECUPERACAO EFETIVA DE ENERGIA:	30.50	%
PERCELA RECUPERADA DE ENERGIA:	43.37	%

EFICIENCIA NA ACEL. NAS RODAS:	44.74	%
EFICIENCIA DO REGIME:	22.83	%
EFICIENCIA NA DESACELERACAO:	42.19	%
EFICIENCIA DO CARREGAMENTO DO VOLANTE:	45.20	%

VALOR EFICAZ DA CORRENTE DA MAO 1:	149.71	A
VALOR EFICAZ DA CORRENTE DA MAO 2:	242.50	A
VALOR EFICAZ DA CORRENTE EXTERNA:	158.51	A



SELECÇÃO DE UM VEÍCULO NÍVEL DO DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA EM VOLANTE

PARÂMETROS DO VEÍCULO:

MASSA TOTAL DO VEÍCULO: 15000.00 KG
 ENERGIA DO VOLANTE: 2.50 W/S2
 ÁREA FRONTAL DO VEÍCULO: 0.90 M2
 COEF. DE RESIST. AERODINÂMICA: 0.50
 COEF. DE RESIST. AO ROLAMENTO: 0.0140 M
 SAÍDA DOS PNEUS: 0.55 M
 INÉRCIA TOTAL DOS EIXOS: 150.00 W/S2
 VELOCIDADE DO REGIME: 60.0 KM/H
 ACELERAÇÃO INICIAL: 1.100 M/S2
 ACELERAÇÃO MÍNIMA: 0.200 M/S2
 DESAC. MÍNIMA: 1.500 W/S2
 VEL. ANG. MÁX. DO VOLANTE: 12000.0 RPM
 MOMENTO RESIST. MÁX. DO VOLANTE: 0.150 N.M
 TEMPO EM REGIME: 5.0 S

TRANSMISSÕES
 DIFERENCIAL: 3.570 EFICIÊNCIA 0.96
 PLAN. FIXO: 0.500 0.94
 PLANETÁRIO: -0.400 0.96
 POLIAS MÃO 1: -1.250 0.94
 POLIAS MÃO 2: 3.500 0.94
 PLAN POLIA 6: 1.000 1.00

SOFO-GERADORES

VOLTAGEM MÁXIMA: 550.0 V
 CORRENTE MÁXIMA: 303.4 A
 CORRENTE EXTERNA MÁX.: 181.7 A
 CORR. EXT. MÁX. NA DESC.: 251.4 A
 F MÁXIMO MÃO 1: 2.60 VS
 F MÁXIMO MÃO 2: 2.60 VS
 F BASE MÃO 1: 0.80 VS
 F BASE MÃO 2: 0.80 VS
 RESISTÊNCIA DE ARANDURA: 0.05 OHM

SISTEMA SEM BIFURCAÇÃO DE ENERGIA

POSIÇÃO DOS EIXOS DO PLANETÁRIO: 1
 PASSO DE INTEGRACAO = 0.0500 S
 PASSO DE IMPRESSAO = 1.0000 S

CORRENTE EXTERNA IDE ISO INICIALMENTE

OUTROS VALORES:
 TETA1 = 391.3330
 KAR = 0.0000
 ZXA = -2.4500
 AI = 0.3000
 KR = 317.3623
 YCA = 0.0000
 RI = 0.0000

RESULTADOS RESULTADOS:

ADEQUAÇÃO MÁXIMA: 1.10 W/S2
 DIFERENCIAL MÁXIMA: 1.52 W/S2
 VELOCIDADE MÁX. EM REGIME: 56.74 KM/H
 DESAC. MÁX. DO CICLO: 40.35 S
 DESAC. MÁX. NA ACELERAÇÃO: 19.90 S
 DESAC. MÁX. EM REGIME: 4.98 S
 DESAC. MÁX. NA DESACELERAÇÃO: 10.55 S
 DESAC. MÁX. NA DESACELERAÇÃO: 9.00 S
 DESAC. MÁX. NA DESACELERAÇÃO: 5.00 S
 DESAC. MÁX. NA DESACELERAÇÃO: 353.11 M
 VEL. ANG. INICIAL DA MÃO 1: 3000.00 RPM
 VEL. ANG. MÁX. DA MÃO 1: 2019.74 RPM
 VEL. ANG. MÁX. DA MÃO 2: 3420.19 RPM
 VEL. ANG. MÁX. DO VOLANTE: 6732.44 RPM
 VEL. ANG. MÁX. DO VOLANTE: 12002.32 RPM
 POT. MÁX.: 1.30 VS
 POT. MÁX.: 1.50 VS
 ENERGIA INICIAL DO VOLANTE: 518.31 WH
 VARIACAO DE ENERGIA DO VOLANTE: 375.73 WH
 ENERGIA MÁXIMA DO VEÍCULO: 509.16 WH
 ENERGIA PERDIDA NA DESC.: 232.28 WH
 ENERGIA PERDIDA NA DESC.: 179.27 WH
 ENERGIA PERDIDA NO VOLANTE: 1.25 WH
 ENERGIA PERDIDA NAS TRANSMISSÕES: 115.48 WH
 ENERGIA PERDIDA NAS MÓDULOS: 170.42 WH
 ENERGIA PERDIDA NOS FREIOS: 135.22 WH
 CARGA DE ENERG. EXTERNA CAPULANTE: 583.36 WH
 ENERGIA ESPECÍFICA DO VOLANTE: 119.14 WH/TON.KM
 CARGO DE ENERG. EXTERNA SAVOANTE: 645.84 WH
 ENERGIA ESPECÍFICA DO VOLANTE: 159.69 WH/TON.KM
 POTÊNCIA MÁX. NA ACEL. NAZ RODAS: 176.12 KW
 POTÊNCIA MÁX. EM REGIME NAZ RODAS: 39.53 KW
 POTÊNCIA MÁX. NA DESACEL. NAZ RODAS: 233.70 KW
 LIMITE RECUPERAVEL DE ENERGIA (IDEAL): 68.90 %
 ENERGIA EFETIVA DE ENERGIA: 31.03 %
 ENERGIA RECUPERADA DE ENERGIA: 45.00 %
 EFICIÊNCIA NA ACELERAÇÃO: 64.47 %
 EFICIÊNCIA EM REGIME: 92.94 %
 EFICIÊNCIA NA DESACELERAÇÃO: 41.82 %
 EFICIÊNCIA NO CARREGAMENTO DO VOLANTE: 0.00 %
 VALOR EFICAZ DA CORRENTE DA MÃO 1: 184.41 A
 VALOR EFICAZ DA CORRENTE DA MÃO 2: 277.37 A
 VALOR EFICAZ DA CORRENTE EXTERNA: 157.22 A

90171BC

SAZONAMENTO DE VEICULO TIPO C/ MOTOR DIESEL DE 40CV E 1000 CM3

PARÂMETROS DO VEICULO

MASSA TOTAL DO VEICULO	15000 KG	15
INERCIA DO VEICULO	7.500 KG.M ²	1.000
AREA FRONTAL DO VEICULO	6.000 CM ²	0.6
COEF. DE RESIST. AERODINAMICA	0.50	0.50
COEF. DE RESIST. AO ROLAMENTO	0.0100	0.0100
RATIO DOS PNEUS	0.55	0.55
INERCIA LATERAL DOS EIXOS	15000 KG.M ²	1.000
VELOCIDADE DO REGIME	50.0 KM/H	13.89
ACELERACAO INICIAL	4.000 M/S ²	0.092
ACELERACAO MAXIMA	3.200 M/S ²	0.072
DESAC. MINIMA	1.500 M/S ²	0.037
VEL. ANG. MAX. DO VOLANTE	12000 G/PM	1.200
MOMENTO RESIST. MAXIMO VOLANTE	9.150 N.M	0.915
TEMPO EM REGIME	5.0 S	0.05

TRANSMISSOES

DIFERENCIAL	3.570	0.98
PLAN.FIADO	0.680	0.98
PLANETARIO	-0.180	0.98
POLIAS MAO 1	-1.200	0.98
POLIAS MAO 2	0.370	0.98
PLAN POLIA R	1.000	1.00

MOTO-GERADORES

VOLTAGEM MAXIMA	550.0 V
CORRENTE MAXIMA	100.0 A
CORRENTE EXTERNA MAX	150.0 A
CORR. EXTERNA, RG DECC	230.0 A
F MAXIMO MAO 1	2.70 VS
F MAXIMO MAO 2	2.70 VS
F BASE MAO 1	1.20 VS
F BASE MAO 2	1.20 VS
RESISTENCIA DE ARMADURA	0.08 OHM

SISTEMA SEM BIFURCAGAO DE ENERGIA

POSICAO DOS EIXOS DO PLANETARIO	1
PASSO DE INTEGRACAO	= 0.3500 S
PASSO DE IMPRESSAO	= 1.0000 S

CORRENTE EXTERNA IJE 130 INICIAL/EMITE

OUTROS VALORES:	
TOTAL	= 391.333
ZAX	= 0.0000
ZXA	= -2.4500
Z1	= 0.3500

POSICAO DOS COMPONENTES

ACELERACAO INICIAL	1.95	M/S ²
INERCIA DO VEICULO	2.10	M/S ²
VELOCIDADE MAXIMA	18.20	KM/H
AREA FRONTAL DO VEICULO	29.85	S
COEF. DE RESIST. AERODINAMICA	11.25	S
COEF. DE RESIST. AO ROLAMENTO	5.00	S
RATIO DOS PNEUS	8.00	S
INERCIA LATERAL DOS EIXOS	9.00	S
VELOCIDADE DO REGIME	5.00	S
ACELERACAO INICIAL	213.39	M/S ²
ACELERACAO MAXIMA	360.00	RPM
DESAC. MINIMA	265.66	RPM
VEL. ANG. MAX. DO VOLANTE	4149.76	RPM
MOMENTO RESIST. MAXIMO VOLANTE	8718.85	RPM
TEMPO EM REGIME	120.00	S
VEL. ANG. MAX. DO VEICULO	1.41	VS
VEL. ANG. MAX. DO VEICULO	1.20	VS

ENERGIA INICIAL DO VEICULO	614.11	WH
VELOCIDADE MAXIMA DO VEICULO	249.92	WH
ENERGIA MAXIMA DO VEICULO	410.50	WH
ENERGIA EXTERNA PERDIDA	145.41	WH
ENERGIA PERDIDA ATQ O FIM DO REGIME	49.54	WH
ENERGIA PERDIDA AO VOLANTE	1.14	WH
ENERGIA PERDIDA NAS TRANSMISSOES	46.81	WH
ENERGIA PERDIDA NAS POLIAS	71.03	WH
ENERGIA PERDIDA NOS PNEUS	52.54	WH
CONSUMO DE ENERGIA EXTERNA C/VOLANTE	390.27	WH
ENERGIA ESPECIFICA C/VOLANTE	105.68	WH/TON.KM
CONSUMO DE ENERGIA EXTERNA C/VOLANTE	574.76	WH
ENERGIA ESPECIFICA C/VOLANTE	179.50	WH/TON.KM

POTENCIA MAX. DO VEICULO	176.52	KV
POTENCIA MAX. DO VEICULO	31.91	KV
POTENCIA MAX. DO VEICULO	271.45	KV
LIMITE RECUPERAVEL DE ENERGIA (LATERAL)	73.45	KV
ESQUENTA OPERATIVA DE ENERGIA	41.15	KV
PERDIDA RECUPERAVEL DE ENERGIA	56.92	KV
EFICIENCIA DA ACCELERACAO	44.84	%
EFICIENCIA DO REGIME	87.94	%
EFICIENCIA DA DESACELERACAO	90.70	%
EFICIENCIA DO CONSUMO DE ENERGIA	9.09	%
VELOCIDADE MAXIMA DO VEICULO	143.57	KM
VELOCIDADE MAXIMA DO VEICULO	247.95	KM
VELOCIDADE MAXIMA DO VEICULO	130.37	KM

COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS, E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A primeira pergunta que temos que responder é sobre a confiabilidade dos resultados, isto é, se os resultados correspondem a uma boa aproximação do que deverá ocorrer na prática.

Diversos são os fatores que introduzem erros nos resultados, dentre os quais podemos destacar os seguintes:

1. O modelo matemático de cada parte do sistema

Quanto mais os modelos de cada parte se aproximam da realidade, tanto mais os resultados da simulação serão confiáveis. As simplificações admitidas foram, principalmente: - desprezar as inércias das engrenagens e dos rotores das máquinas; considerar os rendimentos das transmissões simples como constantes e independentes do sentido do fluxo da potência; - admitir que o coeficiente de resistência ao rolamento é constante; considerar o ar parado; não considerar, explicitamente, as perdas mecânicas nas máquinas elétricas (nos mancais e aerodinâmicas); desprezar as perdas nas resistências do campo das máquinas.

2. Os métodos numéricos utilizados

Para a integração do sistema de equações diferenciais foi usado o método de Runge-Kutta de 4a. ordem. A precisão pode ser aumentada diminuindo-se o passo de integração.

3. Erros de arredondamentos introduzidos pelo computador. Este erro aumenta à medida que cresce o número de operações aritméticas realizadas pelo computador. Diminuindo-se o passo de integração este erro aumenta.

4. Erro humano na dedução das equações e na elaboração dos programas.

O balanço de energia efetuado a cada instante, durante a simulação, nos informa sobre a soma dos erros dos tipos 2, 3 e 4. No entanto, apenas experiências podem nos informar sobre a magnitude dos erros do tipo 1.

Considerando que os objetivos globais deste trabalho são, essencialmente, os seguintes:

i. chegar a valores para a energia efetivamente economizada, que possibilite concluir sobre a viabilidade econômica do sistema;

ii. caso seja viável economicamente, auxiliar o projeto do sistema.

A energia efetivamente economizada (EECON) depende de muitos fatores dentre os quais podemos salientar o perfil do percurso, a estratégia de controle, a inércia do volante, as relações de transmissão, as potências das máquinas etc. - Quanto maior o tempo em que o veículo permanece na velocidade de regime tanto menor a energia efetivamente economizada, podendo até ser negativa. Este fato faz com que o sistema em estudo seja recomendado para veículos cuja frequência entre paradas seja grande. Quando se desejar percorrer uma longa distância, sem paradas, é conveniente usar o sistema como se fosse um veículo convencional, sem volante.

Os valores de EECON para diversos dados foram listados no final do capítulo anterior. Estes resultados nos indicam que, para um veículo de 15000 kg, atingindo uma velocidade de regime de 60 km/h em aproximadamente 20s e percorrendo uma distância da ordem de 350 m entre duas paradas, pode-se ter uma economia de energia, em relação ao veículo convencional, da ordem de 40% para o sistema com bifurcação e de 30% para o sistema sem bifurcação de energia.

Através de inúmeras simulações com dados diferentes pode-se, iterativamente, aumentar a nossa compreensão das relações existente entre os dados de entrada, que definem o veículo, e os resultados. Com isto consegue-se otimizar o projeto do sistema e também responder a muitas perguntas. No apêndice D sugerimos uma sequência para uma primeira escolha dos parâmetros do sistema. Este processo iterativo é demorado pois exige a cada simulação uma análise dos resultados e dos dados, que permita escolher os novos dados da próxima simulação. Sendo assim, julgamos mais adequado deixar esta tarefa para um futuro trabalho. No entanto, sugerimos que neste próximo trabalho se procure responder as seguintes perguntas:

a) Qual o valor da energia economizada (EECON) como função da distância entre paradas? A resposta a esta pergunta permitirá responder a outras. Qual a distância entre paradas que apresenta a máxima EECON? Qual a distância a partir da qual o sistema não apresenta vantagens suficientes para justificar a sua construção?

b) Qual o volante, para armazenamento de energia, ideal para um dado veículo? Para o sistema com bifurcação da potência a medida que aumenta a relação $x = \Omega_{\min} / \Omega_{\max}$ aumenta-se ligeiramente a EECON e diminui-se a potência das máquinas, porém aumenta-se também o tamanho e o peso do volante, de tal modo que podemos perguntar: qual o valor de x ótimo? Por outro lado, aumentando-se o vácuo no interior da carcaça do volante diminuem-se as perdas no volante, aumenta-se EECON e aumenta-se, também, o custo total do sistema.

c) Qual a estratégia de controle ótima? O que é melhor: retirar potência constante da fonte externa ou permitir algumas variações? Para a rede de distribuição de energia e para a estação geradora é melhor que a potência fornecida seja constante, porém para aumentar a EECON pode ser interessante variar esta potência.

 CONVENÇÕES DE SINAIS PARA ROTAÇÕES, MOMENTOS E POTÊNCIAS NOS EIXOS

Ao analisarmos cada parte ou sistema, em separado, utilizamos a convenção de sinais CSUS e ao ligarmos as partes entre si, sentimos a necessidade de utilizar outra convenção, CSMS. Mais adiante veremos em que consiste cada uma destas convenções.

As rotações e momentos aplicados nos eixos podem ser representados por vetores, utilizando a regra da mão direita. Podemos, também, usar uma seta para indicar o sentido do fluxo da potência em cada eixo.

Para cada eixo i , escolhemos um versor paralelo ao eixo i e de sentido arbitrário, porém constante, que chamaremos, aqui, de versor de referência do eixo i . Sempre que dois ou mais eixos forem paralelos usaremos, por simplicidade, o mesmo versor de referência.

Como ilustração, vamos escolher os versores de referência do sistema representado na Figura A.1. Este sistema possui seis eixos ($e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6$). Os eixos e_1, e_2 e e_5 são paralelos, o que nos permite escolher apenas um versor de referência, por exemplo, \vec{u}_1 . O versor de referência dos eixos e_3 e e_6 pode ser \vec{u}_2 , e finalmente para e_4 escolhemos \vec{u}_3 .

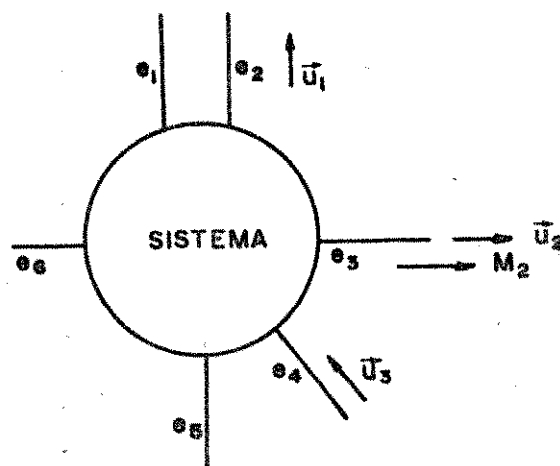


Figura A.1

a) CSUS: convenção de sinais para um sistema

Rotacão (n): positiva se o vetor rotacão tiver o mesmo sentido do versor de referênciã do eixo.

Momento (M): positivo se o vetor momento aplicado tiver o mesmo sentido do versor de referênciã do eixo.

Potência (P): positiva se estiver entrando no sistema.

A potência entra no sistema se a rotacão e o momento tiverem o mesmo sentido.

Para exemplificar, vamos considerar que no sistema da Figura A.1 existam as rotacões, os momentos e, conseqüentemente, as potências indicadas na Figura A.2.

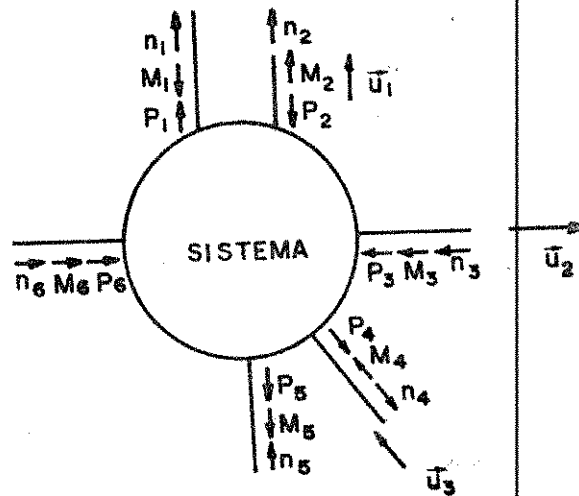


Figura A.2

A Tabela A.1 indica os sinais de grandezas da Figura A.2 de acordo com a CSUS.

Tabela A.1

eixo	n	M	P
1	+	-	-
2	+	+	+
3	-	-	+
4	-	+	-
5	+	-	-
6	+	+	+

b) CSMS: convenção de sinais para múltiplos sistemas

Rotação (n): positiva se o vetor rotação tiver o mesmo sentido do versor de referência do eixo.

Momento (M): positivo se os vetores, ação e reação, do momento torsor, forem divergentes.

Potência (P): positiva, se a seta que indica o fluxo da potência tiver o mesmo sentido do versor de referência do eixo.

Para a CSMS o sinal do momento é o mesmo utilizado, comumente, nos cursos de Resistência dos Materiais, para o momento torsor.

A Figura A.3 representa vários sistemas interligados.

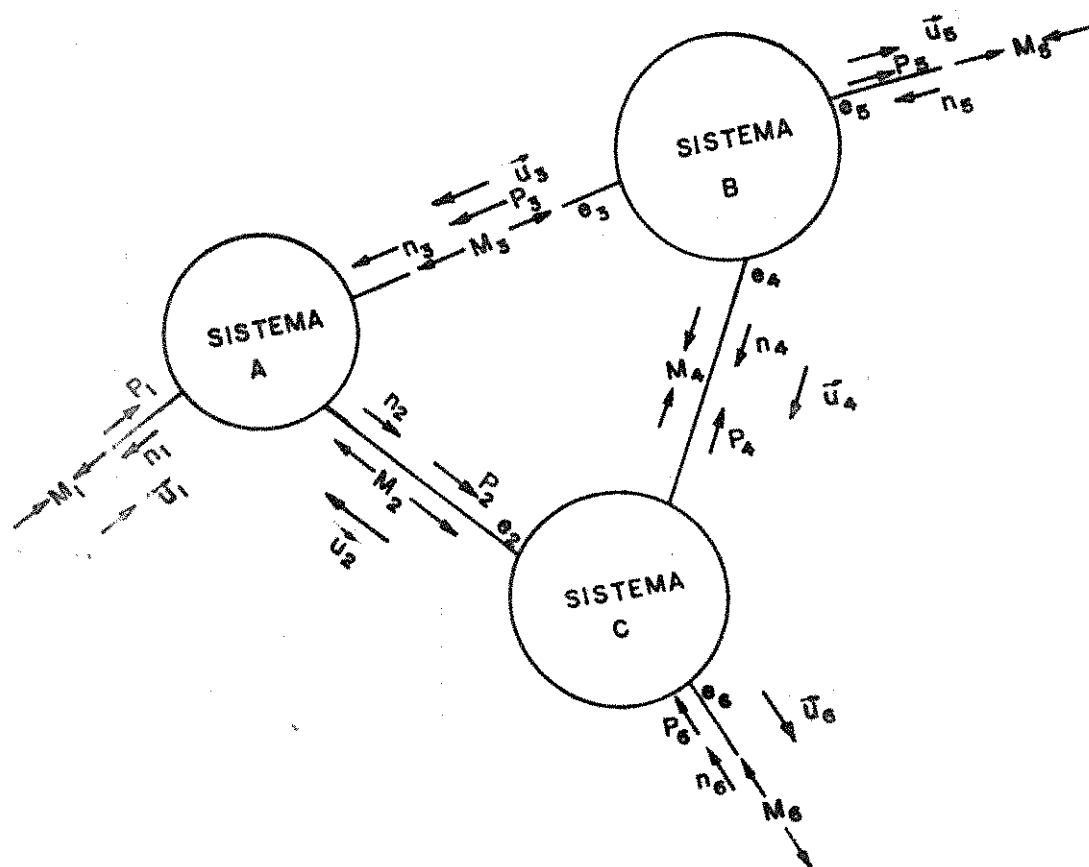


Figura A.3

Os sinais das rotações, torques e potências, de acordo com a CSMS e escolhidos os versores (\vec{u}) de referência, indicados na Figura A.3, para cada eixo, são os indicados na Tabela A.2.

Tabela A.2

eixo	n	M	P
1	-	-	+
2	-	+	-
3	+	+	+
4	+	-	-
5	-	-	+
6	-	+	-

É interessante observar a confusão que existiria se tentássemos utilizar a CSUS aos eixos da Figura A.3. Neste caso, a potência P_3 seria positiva para o sistema A e negativa para o sistema B, o torque M_3 seria positivo e negativo ao mesmo tempo etc.

RELAÇÕES ENTRE AS ROTAÇÕES DAS INÉRCIAS E DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS

De (4.10) e (4.13) temos:

$$n_1 = i_1 i_\rho n_z \quad (\text{B.1})$$

De (4.18) temos que:

$$n_2 = i_2 \omega \quad (\text{B.2})$$

Vimos na Tabela 3.4 que as relações entre as rotações n_x , n_y e n_z dependem da posição (JPL) e da razão básica do trem de engrenagem planetário (TEP).

Além disto, de (4.3) podemos escrever:

$$n_x = i_V \Omega \quad (\text{B.3})$$

e

$$n_y = \omega \quad (\text{B.4})$$

Na Tabela B.1 apresentamos a rotação n_1 , da máquina 1, em função de Ω e ω para cada uma das possíveis posições dos eixos do planetário. Em todas as situações podemos escrever:

$$n_1 = A_1 \Omega - B_1 \omega \quad (\text{B.5})$$

sendo A_1 e B_1 como na tabela.

Tabela B.1.

JLP	i_B	n_Z	A_1	B_1
1	$\frac{n_Z - n_Y}{n_X - n_Y}$	$n_Z = i_B i_V \Omega + (i - i_B) \omega$	$i_B i_V i_1 i_\rho$	$(i_B - 1) i_1 i_\rho$
2	$\frac{n_Z - n_X}{n_Y - n_X}$	$n_Z = i_V (1 - i_B) \Omega + i_B \omega$	$i_V (1 - i_B) i_1 i_\rho$	$-i_B i_1 i_\rho$
3	$\frac{n_X - n_Z}{n_Y - n_Z}$	$n_Z = \frac{i_V}{1 - i_B} \Omega - \frac{i_B}{1 - i_B} \omega$	$\frac{i_V i_1 i_\rho}{1 - i_B}$	$\frac{i_B i_1 i_\rho}{1 - i_B}$
4	$\frac{n_Y - n_X}{n_Z - n_X}$	$n_Z = \frac{\omega}{i_B} + \frac{(i_B - 1)}{i_B} i_V \Omega$	$\frac{(i_B - 1) i_V i_1 i_\rho}{i_B}$	$\frac{-i_1 i_\rho}{i_B}$
5	$\frac{n_X - n_Y}{n_Z - n_Y}$	$n_Z = \frac{i_V}{i_B} \Omega + \frac{(i_B - 1)}{i_B} \omega$	$\frac{i_V i_1 i_\rho}{i_B}$	$\frac{(1 - i_B)}{i_B} i_1 i_\rho$
6	$\frac{n_Y - n_Z}{n_X - n_Z}$	$n_Z = \frac{i_B i_V \Omega}{i_B - 1} - \frac{\omega}{i_B - 1}$	$\frac{i_B i_V i_1 i_\rho}{i_B - 1}$	$\frac{-i_1 i_\rho}{i_B - 1}$

PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO

Vimos que a simulação em computador consiste, basicamente, em integrar numericamente o sistema de equações diferenciais (5.1) a partir das condições iniciais.

Para a integração foi utilizada a subrotina RKGS do SSP (Scientific Subroutine Package) da IBM [11] ligeiramente alterado*. O método de integração é o de Runge-Kutta de 4a. ordem modificado por Gill. Chamaremos da subrotina de integração que utilizamos de RKKS para diferenciá-la de RKGS do SSP.

Foram desenvolvidas as seguintes subrotinas: SIMUL, FCT, OUTF, GRAF, UFUN. Sendo que:

SIMUL é o programa principal que lê os dados do veículo, tais como massa, inércia do volante etc. Abre os arquivos e imprime os títulos de cada um. São utilizados dez arquivos, um de leitura e nove de impressão. SIMUL também faz cálculos preliminares e chama RKKS.

FCT calcula o lado direito do sistema (5.1). Esta subrotina é que realiza a operação de controle do sistema, através da alteração das correntes das máquinas elétricas. A FCT é chamada quatro vezes pela RKKS a cada passo completo de integração.

OUTF imprime os resultados da integração e outros valores tais como energia do volante, energia do veículo, velocidade do veículo, potência nas máquinas etc. Além disso, chama GRAF e UFUN.

GRAF imprime uma linha do gráfico de uma função. Através das chamadas sucessivas de GRAF vai-se traçando o gráfico da função.

UFUN é uma função que calcula o valor da corrente de campo u em porcentagem de u_{\max} , dado o valor de f que é proporcional ao fluxo magnético. Esta função foi obtida experimentalmente.

* Houve necessidade da alteração porque a RKGS redefine a variável independente (o tempo) o que implica em erro na mudança de período.

A seguir, passaremos a descrever com mais detalhes cada uma das subrotinas mencionadas.

C.1. SUBROTINA RKKS

Esta subrotina integra um sistema de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem, do tipo:

$$\begin{aligned} y_1' &= \frac{dy_1}{dx} = f_1(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \\ y_2' &= \frac{dy_2}{dx} = f_2(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \\ y_n' &= \frac{dy_n}{dx} = f_n(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \end{aligned} \quad (C.1)$$

com as condições iniciais de

$$y_1(x_0) = y_{10}, \quad y_2(x_0) = y_{20}, \quad \dots \quad y_n(x_0) = y_{n0}$$

ou, usando vetores

$$YV(x) = \begin{pmatrix} y_1(x) \\ y_2(x) \\ \vdots \\ y_n(x) \end{pmatrix}, \quad DERY(x, YV) = \begin{pmatrix} f_1(x, YV) \\ f_2(x, YV) \\ \vdots \\ f_n(x, YV) \end{pmatrix} \quad e$$

$$Y_0 = \begin{pmatrix} y_{10} \\ y_{20} \\ \vdots \\ y_{n0} \end{pmatrix}$$

A chamada desta subrotina é feita por:

CALL RKKS(PRMT, YV, DERY, NDIM, IHLF, FCT, OUTP, AUX)

sendo

- PRMT = um vetor de entrada e saída com dimensão maior ou igual a 5, onde:
- PRMT(1) = indica x_0 , o valor inicial da variável independente, no nosso caso o tempo inicial;
- PRMT(2) = limite superior da variável independente;
- PRMT(3) = incremento na variável independente;
- PRMT(4) = não é usado na versão RKKS;
- PRMT(5) = a RKKS inicializa este parâmetro com zero se o usuário desejar terminar a integração em qualquer ponto pode fazer PRMT(5) diferente de zero;
- YV = vetor de entrada dos valores iniciais. Como retorno, YV é o vetor resultante das variáveis dependentes calculados nos pontos x, no nosso caso x é o tempo T;
- YV(1) = Ω = é a velocidade angular do volante (rad/s);
- YV(2) = ω = é a velocidade angular da inércia equivalente (rad/s);
- YV(3) = S = o espaço percorrido pelo veículo (m);
- DERY = vetor das derivadas das funções YV em relação à variável independente T;
- NDIM = valor de entrada que especifica o número de equações do sistema;
- IHLF = número inteiro que é usado na RKGS mas não é usado na RKKS;
- FCT = é o nome de uma subrotina externa usada. Esta subrotina calcula o lado direito, DERY, do sistema de equações diferenciais para valores dados de T e YV. Seus parâmetros devem ser T, YV, DERY. A subrotina FCT não pode destruir T e YV;
- OUTP = é o nome de outra subrotina externa usada. A lista de seus parâmetros deve ser T, YV, DERY, IHLF, NDIM, PRMT. Nenhum destes parâmetros, (exceto, se necessário PRMT(5)) pode ser alterado pela subrotina OUTP;

AUX = é uma matriz auxiliar de armazenamento com 3 linhas e NDIM colunas.

Subrotinas necessárias -

As subrotinas externas FCT (T, YV, DERY) e OUTP (T, YV, DERY, IHLF, NDIM, PRMT) devem ser fornecidas pelo usuário.

Precisão -

O principal elemento que influe na precisão é o incremento ou passo de integração, PRMT (3). Quanto menor este valor maior precisão se obtém, porém será necessário maior tempo de CPU. A subrotina RKKS não faz nenhuma verificação quanto a precisão. Assim, para se obter a precisão desejada com o mínimo tempo de execução deve-se por tentativas atribuir valores crescentes a PRMT (3) de modo a, conservando a precisão dentro dos limites aceitáveis, chegar ao máximo de incremento de integração.

C.2. PROGRAMA PRINCIPAL: SIMUL

O programa principal lê os dados do veículo, abre os arquivos, imprime os títulos de cada um, inicializa variáveis, faz cálculos preliminares, chama RKKS e imprime um resumo dos resultados.

São utilizados dez arquivos, todos em disco. O nome e o emprego de cada um foi explicado no Cap.6.

C.3. SUBROTINA FCT

Esta subrotina é chamada pela RKKS quatro vezes para se completar um passo de integração.

A principal função de FCT é calcular em cada instante os valores do lado direito do sistema (5.1) ou seja, o vetor DERY, onde

DERY(1) = $\dot{\Omega}$ = aceleração angular do volante (rad/s);

DERY(2) = $\dot{\omega}$ = aceleração angular da inércia equivalente ao veículo (rad/s);

DERY(3) = \dot{s} = velocidade do veículo (m/s).

Uma outra importante função desta subrotina é controlar a operação do veículo.

A FCT atribui valores às correntes de armadura e de campo das máquinas elétricas (I_1 , I_2 , f_1 e f_2) e para a corrente e tensão externas de modo a fazer o veículo acelerar a partir do repouso até a velocidade de regime, permanecer algum tempo com esta velocidade e então desacelerar até a parada do veículo.

A variável inteira N usada na subrotina indica o período ou fase da operação.

Os argumentos formais da FCT são T, YV e DERY.

C.4. SUBROTINA OUTF

Esta subrotina é chamada pela RKKS toda vez que se completa um passo de integração.

A principal função da OUTF é imprimir os resultados da integração. Além dos resultados diretos da integração, esta subrotina calcula e imprime outros valores a cada instante, tais como: a energia armazenada no volante, a energia do veículo, as potências, os torques e rotações em diversos eixos etc.

Podemos não querer imprimir estes valores todas as vezes que a OUTF é chamada. Isto é controlado pelo parâmetro de leitura JOUTF. Quando JOUTF=1 as impressões são realizadas todas as vezes que a OUTF é chamada. Se JOUTF=2 as impressões são efetuadas uma vez cada duas chamadas. Se JOUTF=3 as impressões ocorrem a cada três chamadas, e assim por diante. Deste modo, se o passo de integração for 0.25 segundos e JOUTF=4 teremos uma chamada de OUTF a cada 0.25 s e uma impressão a cada 4 chamadas, conseqüentemente haverá uma impressão a cada segundo (PASSO x JOUTF = 1.0). Assim, pode-se obter a precisão desejada sem aumentar excessivamente o volume de impressões, controlando-se os valores do PASSO e de JOUTF.

A OUTF também controla o intervalo de tempo que se permanece em regime.

Os argumentos formais da OUTF são: T, YV, DERY, JHLF, JDIM e PRMT.

JHLF não é usado. Optamos por manter os mesmos argumentos que a RKGS do SSP utiliza.

JDIM é o número de equações diferenciais.

C.5. SUBROTINA UFUN

UFUN calcula o valor da corrente de campo u das máquinas elétricas dado o valor de f , fluxo magnético.

A dependência de f com a corrente de campo u é obtida experimentalmente. No capítulo 3 vimos a curva para as máquinas elétricas do laboratório GĒPROM.

UFUN é chamada duas vezes (uma para cada máquina) pela OUTP antes de iniciar as impressões.

C.6. SUBROTINA GRAF

Esta subrotina é chamada oito vezes pela OUTP para imprimir uma linha em oito arquivos diferentes. Estes arquivos foram descritos no Cap.6.

Os argumentos formais da GRAF são: X, Y, YMX, YMN, IPR e N, sendo:

X = a variável independente do gráfico a ser traçado, no nosso caso o tempo;

Y = a variável dependente, por exemplo: a velocidade do veículo, a velocidade angular do volante etc;

YMX = o valor máximo (em módulo) da variável dependente;

YMN = o valor mínimo (em módulo) da variável dependente;

IPR = indica o arquivo onde a linha deverá ser gravada;

N = indica o período ou fase de simulação.

GRAF imprime a cada linha os valores numéricos de X e Y, ao lado do valor de Y imprime também uma série de tracinhos, cuja quantidade é proporcional ao valor ($|Y| - YMN$). E finalmente ao lado do último tracinho imprime o número N indicando a fase da simulação.

SUGESTÃO DE UMA SEQUÊNCIA PARA UMA PRIMEIRA
ESCOLHA DOS PARÂMETROS DO SISTEMA

Normalmente são dadas as características do veículo, tais como, massa total (aproximada, pois ainda não sabemos o tamanho do volante etc), área frontal do veículo, coeficiente de resistência aerodinâmica, coeficiente de resistência ao rolamento, raio dos pneus, o perfil do percurso, e deseja-se projetar o interior do veículo, isto é, deseja-se determinar valores convenientes para a inércia do volante, as potências das máquinas elétricas, as relações das diversas transmissões etc.

A seguir, apresentamos uma sequência para uma escolha inicial dos parâmetros do sistema.

1. A energia máxima do veículo é dada por:

$$EVEIC_{\max} = \frac{1}{2} \text{MASSA} \cdot (\text{VELMX})^2 \cdot (1+\delta) \quad (\text{D.1})$$

sendo VELMX = a velocidade máxima desejada para o veículo

δ = leva em conta a inércia das massas girantes,
 $\delta=0,05$ a $0,10$

2. A energia que o volante cede, como primeira aproximação, deve ser da ordem da energia máxima do veículo, uma vez que há introdução de energia externa. Então

$$\Delta EVOLA \cong EVEIC_{\max} \quad (\text{D.2})$$

Se definirmos

$$x = \frac{\Omega_{\min}}{\Omega_{\max}}$$

teremos

$$\Delta EVOLA = \frac{1}{2} \theta_G (1 - x^2)$$

sendo θ_G a inércia do volante.

Para se diminuir a inércia do volante é conveniente fazer Ω_{\max} o maior valor possível. A principal limitação de Ω_{\max} é a resistência do material do volante. Uma vez escolhido o material do volante e sua forma construtiva, tem-se determinado Ω_{\max} .

Assim, temos ainda que escolher θ_G ou Ω_{\min} . Alguns autores [19] sugerem $x \approx 0,67$. É evidente que, quanto menor x menor será também θ_G , para um mesmo $\Delta EVOLA$, no entanto a eficiência global do sistema diminui muito para valores muito pequenos de x . Por outro lado, grandes valores de x ocasionam uma diminuição na potência que passa pelas máquinas elétricas (quando há bifurcação de energia), pois a relação entre as potências dos eixos Z e X é aproximadamente dada por:

$$\frac{P_Z}{P_X} \approx \frac{n_1(t) \cdot \Omega_{\max}}{\Omega(t) \cdot n_{1\max}}$$

Um valor grande (próximo de 1) para x exige um grande volante e não apresentou substanciais melhorias na economia efetiva de energia. Deste modo, percebe-se que deverá existir um determinado valor de x ótimo. O valor $x=0,67$ apresentou bons resultados na simulação.

Assim, admitindo que tenhamos escolhido um valor para x , já teremos os valores aproximados de Ω_{\max} , Ω_{\min} e θ_G .

3. Escolhe-se as rotações máximas das máquinas, levando-se em conta sua possibilidade construtiva.

Nas simulações realizadas escolhemos $n_{1\max} = n_{2\max}$, porém as rotações máximas das máquinas 1 e 2 podem ser diferentes.

4. Escolhe-se a velocidade angular mínima da máquina 1.

Para o caso sem bifurcação a rotação da máquina 1 é proporcional a Ω , isto significa que $n_{1\min}$ fica determinado

por Ω_{\max} , Ω_{\min} e $n_{1\max}$. Porém, para o caso com bifurcação é conveniente ter-se $n_{1\min}$ o menor valor possível para se obter valores pequenos da relação P_Z/P_X , eq.(D.5). Não foram estudadas as implicações de se ter $n_1 < 0$. Procuramos, nas simulações realizadas, fazer com que $n_{1\min}$ se aproxime de zero, diminuindo desta maneira, a razão P_Z/P_X e a potência das máquinas, além de aumentar a economia efetiva de energia. Portanto, para o caso com bifurcação, podemos adotar $n_{1\min} = 0$.

É importante salientar que as escolhas que estão sendo feitas não ocorrerão, necessariamente, na simulação, pois nestas escolhas não estamos considerando toda a dinâmica do sistema.

5. Escolha das relações de transmissão

5.1. Determina-se a constante A_1 através da eq.(B.5). Para o instante inicial $n_1 = n_{1\max}$, $\Omega = \Omega_{\max}$ e $\omega = 0$, logo

$$A_1 = \frac{n_{1\max}}{\Omega_{\max}} \quad (D.6)$$

5.2. No instante em que a velocidade do veículo atinge seu valor máximo teremos o volante com Ω_{\min} , a máquina 1 com $n_{1\min}$ e a máquina 2 com $n_{2\min}$. Das eqs. (4.27) e (B.5) vem:

$$\frac{B_1}{i_2} = \frac{A_1 \Omega_{\min} - n_{1\min}}{n_{2\max}} \quad (D.7)$$

Para o caso sem bifurcação de energia $B_1 = 0$.

5.3. Das eqs. (3.32) e (4.27) vem

$$i_2 i_D = \frac{v_{\max}}{r n_{2\max}} \quad (D.8)$$

sendo i_2 = a relação da transmissão 2, definida pela eq. (4.27), Fig. 4.1.

i_D = a relação do diferencial, definida pela eq. (3.34), Fig. 3.4a.

r = raio dos pneus.

5.4. Escolhe-se uma posição JPL para os eixos do planetário em relação ao sistema, Tab.3.4. Com os valores obtidos de (D.6), D.7) e (D.8), e com as expressões da Tab.B.1, que relacionam as relações de transmissão (i_v , i_B , i_1 e i_ρ) com A_1 e B_1 , conforme o JPL escolhido, obtemos um sistema de três equações a seis incógnitas. Porém, notamos que, para o sistema não importam os valores individuais de i_1 e i_ρ e sim o seu produto $i_1 \cdot i_\rho$ que podemos substituir por uma única variável

$$i_{1\rho} = i_1 \cdot i_\rho \quad (D.9)$$

desde que cada uma das relações de transmissão seja realizável. Então, ficaremos com cinco incógnitas (i_v , i_B , $i_{1\rho}$, i_2 e i_D) e conseqüentemente com dois graus de liberdade. Das infinitas possibilidades devemos escolher soluções em que: a) todas as relações de transmissão estejam dentro dos limites recomendados; b) tenhamos menores rotações das engrenagens; c) o rendimento médio do planetário seja alto.

A escolha das relações de transmissão é um processo iterativo. A seqüência poderia ser como indicado no fluxograma da Fig.D.1.

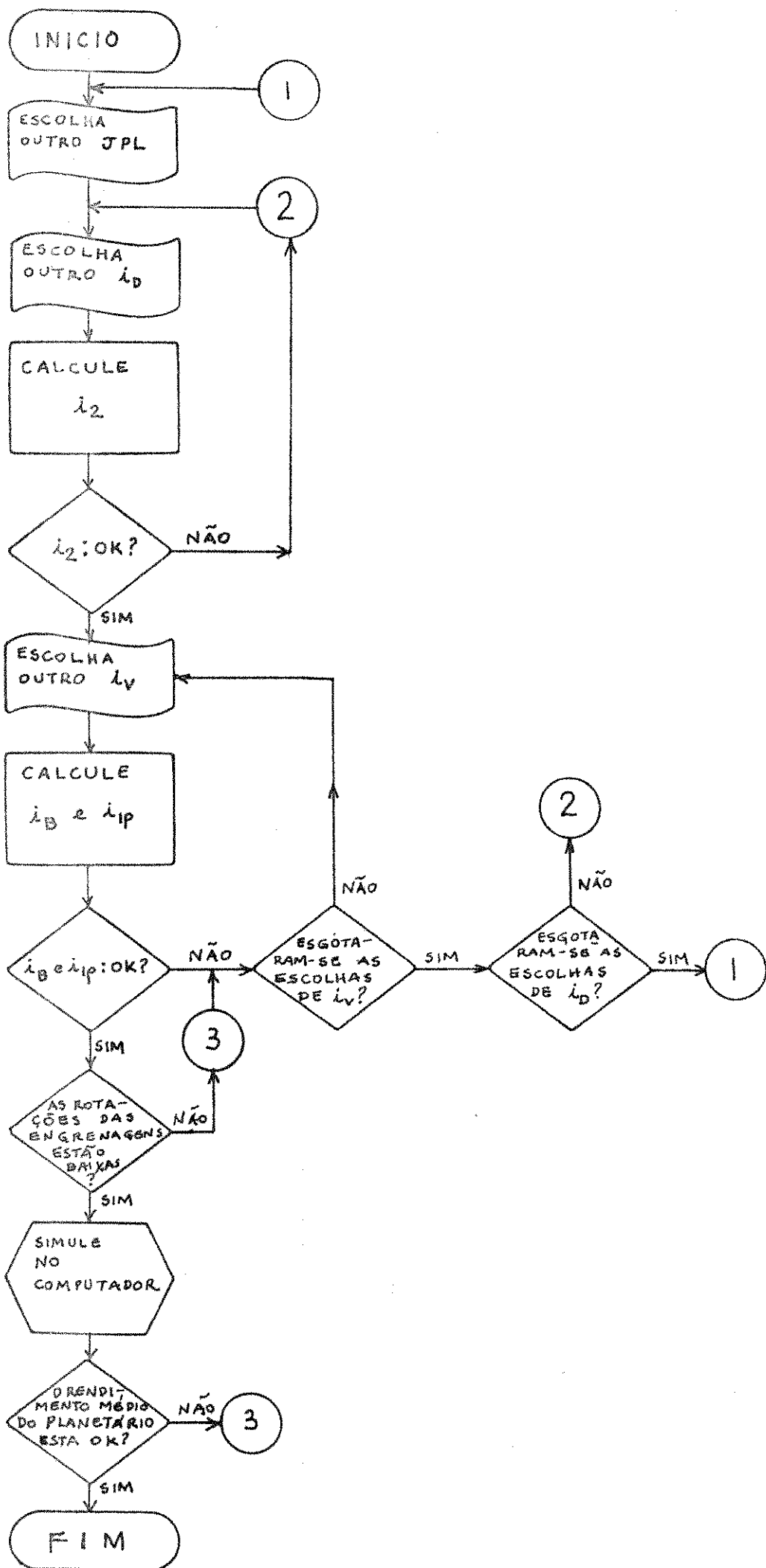


Fig.D.1.

6. Escolha dos valores de V3 e IMX

Para o caso sem bifurcação a potência máxima nas máquinas deve ser um pouco maior que a potência máxima requerida nas rodas, no entanto, quando houver bifurcação de energia no sistema a potência máxima nas máquinas é consideravelmente menor que a máxima requerida nas rodas.

Chamando de ϕ a relação entre a potência $V3 \cdot IMX$ e PR_{max} :

$$\phi = \frac{V3 \cdot IMX}{PR_{max}}$$

As simulações realizadas indicaram os seguintes valores médios para ϕ :

- a) sem bifurcação $\phi_S \approx 1,12$
- b) com bifurcação $\phi_C \approx 0,48$ a $0,66$

Assim, podemos estimar o valor do produto $V3 \cdot IMX$. - Além disso, o valor de V3 é geralmente escolhido dentre as tensões nominais padronizadas [4], e conforme a potência há um valor de V3 recomendado. Deste modo, obtemos também IMX.

Por outro lado, um dos dados do programa é a aceleração inicial desejada para o veículo (AMX). Com este valor o programa calcula a corrente inicial (IA) necessária na armadura da máquina 2 e compara o valor de IA (calculado) com o valor de IMX (fornecido como dado), escolhendo o menor valor para a corrente máxima permitida nas máquinas.

7. Escolha de FMX1, FMX2, FBS1 e FBS2.

Quando $n_{1max} = n_{2max}$ é conveniente ter-se $FMX1=FMX2$ e $FBS1=FBS2$.

$$\text{Se } V3 = \psi FMXi \cdot n_{1max}$$

$$\text{e } FBSi = \xi FMXi$$

sendo $i = 1$ ou 2

Nas simulações os valores de ψ que apresentarem bons resultados estão em torno de $\psi \approx 2$ a 3 .

O valor de ξ depende do projeto da máquina elétrica e geralmente $\xi \approx \frac{1}{3}$ a $\frac{1}{2}$ para o tipo de máquina utilizada.

Evidentemente que a sequência aqui sugerida, bem como os valores recomendados não são definitivos, servindo apenas para definir um conjunto de dados iniciais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] STRELKOV, S.P. - "Mechanics", MIR, 1978.
- [2] CHUDAKOV, A.D. - "Fundamentos de la Teoría y el Cálculo de Tratores y Automóviles", MIR, 1977.
- [3] HUGHES, W.F. e BRINGTON, A.J. - "Fluid Dynamics",
Shaum Publishing Co., 1977.
- [4] KOSOW, I.L. - "Máquinas Elétricas e Transformadores",
Ed.Globo, 1977.
- [5] SOUZA LIMA, C. - "Trens de Engrenagens Planetárias: Análise, Síntese e Aplicação em Veículo Híbrido", Tese de Mestrado, UNICAMP, 1980.
- [6] ARTAMONOV, M.D.; ILARIONOV, A.V.; MORIN, M.M. - "Motor Vehicles: Fundamentos and Design",
MIR, 1976.
- [7] BARÁNOV, G.G. - "Curso de la Teoria de Mecanismos y Máquinas", MIR, 1979.
- [8] MACMILLAN, R.H. - "Epicycl Gear Efficiencies", The Engineer, Dec.23, 1949, pp.727.
- [9] WHITE, G. - "Properties of Differential Transmissions"
The Engineer, July 28, 1967, pp.103.
- [10] RASKIN, D. e YUTKO, R.T. - "Energy Storage Propulsion System", Technical Report. Metropolitan Transportation Authority, N.York State, Dept.of Transportation, Sept. 1975.
- [11] IBM - "1130 Scientific Subroutine Package"
- [12] CORRÊA DE OLIVEIRA FILHO, U. e WEBER, H.I. - "Efeito das Dimensões da Caixa de Proteção sobre o Torque de Arraste num Volante", V COBEM, 1979.

- [13] MULLER, H.W. - "Die Umlaufgetriebe", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1970.
- [14] BRENNAND, J. - "Tire and Aerodynamic Friction and Motor-Driveline Efficiency of Electric Vehicles from Track Tests", SAE 780218.
- [15] MING-CHENG CHANG - "Computer Simulation of an Advanced Hybrid Electric-Powered Vehicle", SAE 780217.
- [16] ALBUQUERQUE, O.P. - "Elementos de Máquinas", Guanabara Dois, 1980.
- [17] SAE - "Electric Vehicle Test Procedure", SAE J227a, SAE Recommended Practice, Last Revised February 1976.
- [18] HAGIN, F. e MERKER, P. - "Antriebssysteme mit Bremsenergie-Rückgewinnung", MAN-Maschinenfabrik Augsburg Nurnberg, Bericht - 11/1979
- [19] D.W. RABENHORST - "Low Cost, High Performance, Dual Mode Car".
The Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory,
Johns Hopkins Road, Laurel, Maryland
20810