

## ESTUDO DE MANOBRAS ORBITAIS MULTI-IMPULSIVAS

Gislaine de Felipe

Aluna da Universidade de Taubaté - Bolsa PIBIC/CNPq  
Orientador: Dr. Antonio F. Bertachini de Almeida Prado  
Pesquisador da Divisão de Mecânica Espacial e Controle  
Avenida dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515

Este trabalho estuda o problema de transferências entre duas órbitas coplanares elípticas que extremizam o impulso aplicado (consumo de combustível).

Efetuar uma transferência orbital significa transladar um veículo espacial de um ponto para outro no espaço, entre órbitas diferentes.

A transferência torna-se necessária quando ocorrem desvios nos parâmetros nominais da órbita do satélite, fazendo com que o mesmo se encontre em uma trajetória diferente da pré-estabelecida. Esta transferência também pode estar prevista na própria missão, pois é em geral mais fácil colocar um satélite em uma órbita intermediária e depois transferi-lo para a órbita desejada, do que tentar colocá-lo diretamente na órbita pretendida.

O problema de transferências ótimas (no sentido de redução de consumo de combustível) entre duas órbitas coplanares Keplerianas tem sido investigado há mais de 40 anos. Em particular, muitos artigos resolvem este problema para um sistema de controle impulsivo, com um número fixo de impulsos. A literatura apresenta muitas soluções para casos particulares, como as transferências de Hohmann e Hoelker-Silber entre duas órbitas circulares e suas variantes para elipses com geometrias particulares.

Neste trabalho, são implementados e testados os métodos que fornecem a solução deste problema para uma transferência entre duas órbitas coplanares elípticas com dois ou três impulsos. Outra questão analisada é o ângulo de transferência para a manobra bi-impulsiva.

Os resultados mostram que a transferência bi-impulsiva é vantajosa para transferências envolvendo mudanças apenas no argumento do perigeu e/ou na excentricidade. Já a manobra tri-impulsiva é sempre vantajosa quando a manobra altera apenas o semi-eixo maior da órbita. Nos casos onde o semi-eixo maior é alterado juntamente com o argumento do perigeu ou com a excentricidade, a decisão sobre qual a melhor manobra tem que ser feita, caso a caso, conforme mostrado nas tabelas 1 à 6. Essas tabelas mostram apenas parte dos resultados obtidos, já que não existe espaço suficiente para todos os resultados obtidos. Os símbolos utilizados são:  $a$  = semi-eixo maior,  $e$  = excentricidade,  $\omega$  = argumento do perigeu,  $\Delta V_{bi}$  = Variação da velocidade na transferência bi-impulsiva,  $\Delta V_{tri}$  = Variação da velocidade na transferência tri-impulsiva,  $\sigma$  = ângulo de transferência para a manobra bi-impulsiva,  $\Delta VD = |\Delta V_{bi} - \Delta V_{tri}|$ .

Do ponto de vista de ângulo de transferência da manobra bi-impulsiva, os resultados mostram que todas as manobras que envolvem excentricidade possuem como solução  $\sigma$  igual a  $180^\circ$ , bem

como manobras que alteram somente o semi-eixo maior. Manobras que alteram somente o argumento do perigeu ou o argumento do perigeu e o semi-eixo maior possuem soluções com  $\sigma$  diferente de  $180^\circ$  a menos que  $\omega_i = 0^\circ$  e  $\omega_f = 180^\circ$ .

LAWDEN, D.F., "Optimal Transfers Between Coplanar Elliptical Orbits", *J. of Guidance Control and Dynamics*, Vol. 15, nº3, 1991, pp.788-791.

PRADO, A.F.B.A., "Optimal Transfer and Swing-By Orbits in the Two and Three-Body Problems", Ph.D. Dissertation, University of Texas, Austin, TX, USA, 1993.

ZANARDI, M.C.F.P.S., "Fundamentos da Astronáutica", Apostila do Instituto Técnico Aeroespacial (ITA), São José dos Campos, SP, 1988.

Tabela 1. Manobras que alteram somente  $\omega_r$

$e_i$	$e_f$	$\omega_r$	$\Delta V_{\Delta}$	$\Delta V_{\Delta}$	TIn	$\Delta VD$	$\sigma$
0.2	0.2	$60^\circ$	0.0987	0.4082	7.6758	0.3094	168
0.2	0.2	$120^\circ$	0.1679	0.4082	9.0517	0.2403	172
0.2	0.2	$180^\circ$	0.1927	0.4082	10.4276	0.2155	180
0.2	0.2	$240^\circ$	0.1681	0.4082	11.8035	0.2401	172
0.2	0.2	$300^\circ$	0.0990	0.4082	13.1793	0.3092	168
0.4	0.4	$60^\circ$	0.2004	0.8728	8.0338	0.6724	152
0.6	0.2	$60^\circ$	0.3149	1.5000	8.4183	1.1851	134

Tabela 2. Manobras que alteram somente  $e_r$

$e_i$	$e_f$	$\Delta V_{\Delta}$	$\Delta V_{\Delta}$	TIn	$\Delta VD$
0.0	0.020	0.0099	0.0202	6.2057	0.0103
0.0	0.800	0.4305	2.0000	2.9279	1.5695
0.2	0.300	0.0510	0.5462	5.8334	0.4952
0.2	0.500	0.1557	0.9155	4.9370	0.7598
0.2	0.800	0.3472	2.1835	3.6896	1.8413

Tabela 3. Manobras que alteram  $\omega_r, e_r$

$e_i$	$e_f$	$\omega_r$	$\Delta V_{\Delta}$	$\Delta V_{\Delta}$	TIn	$\Delta VD$
0.0	0.3	$60^\circ$	0.1473	0.3628	5.9373	0.2155
0.0	0.3	$300^\circ$	0.2147	0.3628	10.1703	0.0480
0.0	0.5	$120^\circ$	0.2484	0.7321	6.1853	0.4837
0.2	0.3	$120^\circ$	0.2108	0.5463	8.5852	0.3354
0.2	0.5	$180^\circ$	0.3338	0.9155	9.0647	0.5817

Tabela 4. Manobras que alteram  $\omega_r, a_r$

$e_i$	$\omega_r$	$\Delta V_{\Delta}$	$\Delta V_{\Delta}$	$\Delta VD$	TIn	$\sigma$
2.0	$60^\circ$	0.2719	0.1849	0.0870	11.8118	144
2.0	$300^\circ$	0.2719	0.1849	0.0558	17.3153	156
5.0	$60^\circ$	0.3385	0.4615	0.0230	27.7878	146
5.0	$120^\circ$	0.463	0.4615	0.0014	29.1637	156
5.0	$300^\circ$	0.4601	0.4615	0.0014	34.6673	180
5.0	$240^\circ$	0.4631	0.4615	0.0015	31.9154	156
10.0	$60^\circ$	0.4742	0.6219	0.1477	63.5310	168
30.0	$120^\circ$	0.4879	0.7856	0.2977	284.5228	170

Tabela 5. Manobras que alteram  $e_r, a_r$

$e_i$	$a_r$	$e_f$	$\Delta V_{\Delta}$	$\Delta V_{\Delta}$	TIn	$\Delta VD$
0.2	2.0	0.3	0.25136	0.21875	9.3380	0.0326
0.2	2.0	0.5	0.21375	0.40825	7.2682	0.1945
0.1	2.0	0.3	0.25342	0.17716	8.8045	0.0763
0.1	2.0	0.5	0.21792	0.32021	6.7783	0.1023
0.0	2.0	0.2	0.27045	0.13397	9.3380	0.1365
0.0	2.0	0.5	0.22475	0.22475	6.300	0.0000
0.0	2.0	0.6	0.26663	0.41421	5.3790	0.1476
0.2	5.0	0.5	0.37614	0.31341	15.8525	0.0627
0.1	5.0	0.2	0.44119	0.45467	25.6537	0.0135
0.1	5.0	0.3	0.42629	0.39294	21.9751	0.0333
0.0	5.0	0.5	0.40950	0.26274	14.5847	0.1467
0.1	50.0	0.8	0.41008	0.57813	82.3720	0.1681

Tabela 6. Manobras que alteram somente  $a_r$

$e_i$	$a_r$	$e_f$	$\Delta V_{\Delta}$	$\Delta V_{\Delta}$	TIn	$\Delta VD$
0.00	1.2	0.00	0.0869	0.0871	7.2682	0.0002
0.00	5.0	0.00	0.4800	0.5527	32.7357	0.0727
0.05	1.1	0.05	0.0463	0.0511	6.7541	0.0048
0.05	1.2	0.05	0.0865	0.0490	7.2187	0.0374
0.05	2.7	0.05	0.3625	0.3608	15.3094	0.0017
0.05	2.8	0.05	0.3709	0.3723	15.9168	0.0014
0.05	3.5	0.05	0.4161	0.4386	20.3827	0.0225
0.10	1.1	0.10	0.4611	0.1495	6.7299	0.3116
0.10	1.2	0.10	0.0859	0.1046	7.1693	0.0187
0.10	1.3	0.10	0.1206	0.0947	7.6178	0.0259
0.10	3.3	0.10	0.3959	0.3938	18.2888	0.0021
0.10	3.4	0.10	0.4013	0.4028	18.8988	0.0015
0.10	20.0	0.10	0.4980	0.7551	185.9283	0.2571
0.20	1.3	0.20	0.1176	0.2576	7.4673	0.1400
0.20	3.3	0.20	0.3755	0.3350	16.7607	0.0405
0.20	3.5	0.20	0.3848	0.3545	17.8190	0.0302