

A TEORIA DA RELATIVIDADE NO CONTEXTO AEROESPACIAL: FENÔMENOS, EFEITOS E APLICAÇÕES

Thiago Martiusi Moura¹

RESUMO

O setor aeroespacial é um campo de pesquisa relativamente novo, porém com rápida evolução. Com esse desenvolvimento, as operações tornaram-se mais complexas com a automação e a necessidade de procedimentos de grande precisão. As principais influências da teoria da relatividade no contexto aeroespacial se aplicam no âmbito dos sistemas de navegação por satélites como o GPS, em sistemas de navegação e orientação inerciais opto-mecânicos e nas operações de veículos hipersônicos. Assim, este estudo teve como objetivo analisar os fenômenos exercidos nos veículos aeroespaciais de grande cinética e os efeitos causados aos aparelhos de grande precisão, os quais estão sujeitos às distorções espaço-temporais, além de destacar algumas aplicações práticas advindas das conseqüências da relatividade restrita no âmbito aeroespacial. A metodologia utilizada é de cunho descritivo, com foco quantitativo. Foi realizada pesquisa de campo para melhor fundamentar o trabalho que consistiu na aplicação de questionário com mestres e doutores na área.

PALAVRAS-CHAVE: Distorção espaço-temporal. GPS. Precisão. Sistemas inerciais. Teoria da relatividade. Veículos hipersônicos.

ABSCTRACT

The aerospace environment is a relativity new research field, but with rapid evolution. Along this development, the operations became more complex with the automation of procedures and the need for great accuracy. The main influences of the theory of relativity in the aerospace context are applied within the by-satellite navigation systems like GPS, the navigation systems and opto-mechanical inertial guidance and hypersonic vehicle operations. Thus, this study was developed with the purpose to analyze the phenomena upon large kinetics aerospace vehicles and the effects of high precision equipment, which are subject to space-time distortions, besides highlighting some of the practical application resulted from the consequences of relativity theory within the aerospace field. The methodology used is descriptive, with quantitative focus. Field research was conducted to better support the work that consisted of a questionnaire for teachers and doctors in the area.

KEY-WORDS: Accuracy. GPS. Hypersonic vehicles. Inertial systems. Space-time distortion. Theory of relativity.

1 - Bacharel em Ciências Aeronáuticas pela UNOPAR (2010), MBA Gestão de Pessoas pelo Instituto de Ensino Superior de Londrina (2012). thiagomartiusi@yahoo.com.br;

INTRODUÇÃO

JUSTIFICATIVA

O setor aeroespacial teve sua exploração iniciada no final do século XIX e em pouco mais de cem anos enfrentou um rápido desenvolvimento alcançando vôos cada vez mais altos e distantes, velocidades cada vez maiores e operações cada vez mais complexas. Com essa evolução surgiram novos desafios e necessidades como as operações em velocidades supersônicas e hipersônicas, a conquista do espaço e o desenvolvimento de avançados sistemas de navegação e orientação de grande precisão. Toda essa evolução ultrapassou as barreiras da física clássica e encontrou na física moderna as bases de seu progresso. A teoria da relatividade restrita, publicada por Albert Einstein em 1905, logo se tornou fundamento para o avanço das operações aeroespaciais. Mas como são as relações entre essa teoria abstrata e o meio aeroespacial?

HIPÓTESES DO TRABALHO

Os sistemas de navegação, orientação e posicionamento por satélites, como o GPS, permitem obter dados com grande precisão em tempo real, mas para tanto, leva em consideração os efeitos da teoria da relatividade restrita em suas operações;

Veículos hipersônicos exigem correções dos efeitos relativísticos advindos de sua grande cinética para o correto posicionamento e navegação de precisão; Sistemas de Navegação Inercial opto-mecânicos utilizam o “efeito Sgnac” advindo da teoria da relatividade restrita para cálculos de atitude, velocidades angulares e acelerações lineares com grande precisão.

OBJETIVOS

Objetivo geral

Analisar os fenômenos exercidos nos veículos aeroespaciais de grande cinética e os efeitos causados aos aparelhos de grande precisão sujeitos as distorções espaço-temporal, destacando algumas aplicações práticas advindas das conseqüências da relatividade restrita.

Objetivos específicos

Demonstrar os fenômenos advindos da teoria da relatividade restrita aos quais os satélites estão sujeitos, destacando os satélites do Sistema de Posicionamento Global – GPS.

Determinar os efeitos causados pela relatividade restrita em veículos hipersônicos e nas Estações Espaciais.

Descrever as aplicações práticas da teoria da relatividade restrita com foco nos sistemas de navegação inercial.

Apontar a relevância dos resultados obtidos na aplicação deste trabalho, mostrando a importância de ressaltar o fenômeno da distorção espaço-temporal no contexto aeroespacial.

DELIMITAÇÃO

O trabalho dispõe sobre a teoria da relatividade restrita, ou especial, fazendo referência à relatividade geral, fundamentando-se nas relações existentes entre a teoria e o setor aeroespacial. O objetivo da pesquisa é destacar a relevância dos fenômenos previstos pela teoria no meio aéreo, no que tange a segurança das operações, qualidade e confiabilidade das navegações aéreas e precisão dos dados de navegação e posicionamento.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho é de cunho descritivo quantitativo, qualitativo, todavia o foco da pesquisa é quantitativo abordando as seguintes variáveis: Teoria da relatividade, satélites, GPS, veículos hipersônicos, Estações Espaciais, *Ring Laser Gyro*, *Fiber Optic Gyro*. Para (Cervo, et al. 2009, p. 61), afirma que:

“A pesquisa descritiva observa, registra, analisa e correlaciona fatos ou fenômenos (variáveis) sem manipulá-los. Procura descobrir, com a maior precisão possível a frequência com que um fenômeno ocorre, sua relação e conexão com outras, sua natureza e suas características”

Para CRESWELL, 2007, p.35, pesquisa quantitativa justifica-se:

“Naquela em que o investigador usa primariamente alegações pós-positivistas para desenvolvimento de conhecimento (ou seja, raciocínio de causa e efeito, redução de variáveis específicas e hipóteses e questões, uso de mensuração e observação e tese de teorias), emprega estratégias de investigação (como experimentos, levantamentos e coleta de dados, instrumentos predeterminados que geram dados estatísticos)”

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica com o intuito de levantar as principais fontes primárias e secundárias relacionadas com o tema, tais como: livros, periódicos, revistas científicas e artigos científicos, utilizando-se da rede mundial de computadores – internet, junto aos sites e bancos de dados especializados e monografias, dissertações e teses sobre o assunto.

“Normalmente o levantamento bibliográfico é realizado em bibliotecas públicas, faculdades, universidades e especialmente naqueles acervos que

fazem parte do catálogo coletivo e das bibliotecas virtuais”. (Oliveira, 2004 p.119).

Foi realizada uma pesquisa de campo, aplicando questionário com Doutores e Mestres da área, com o intuito de melhor fundamentar a pesquisa bibliográfica e ao mesmo tempo observar o fenômeno na sua realidade, para tanto será utilizado um instrumento de coleta sob a forma de questionários. Como afirma (Oliveira, 2004, p.124). “Pesquisa de campo consiste na observação dos fatos tal como ocorrem espontaneamente na coleta de dados e no registro de variáveis presumidamente para posteriores análises”.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para confecção, desenvolvimento e apresentação dos cálculos, foram utilizadas calculadoras, modelo científico *CASIO FX-82 MS S-V.P.A.M.* e modelo gráfico *Hewlett Packard HP 48GX*. Também foram utilizados os softwares *Microsoft Windows Calculator*, versão *Microsoft Windows Vista 32 bits – SP2* e *Microsoft Equation 3.0*.

MARCO TEÓRICO

HISTÓRICO

No início do século XX duas grandes descobertas revolucionaram o modo de ser e pensar de toda a sociedade. De um lado, pela primeira vez se eleva aos céus por seus próprios meios um veículo mais pesado que o ar; Do outro lado, uma teoria rompe os dogmas existentes e propõe uma nova forma de compreensão dos fenômenos naturais. No decorrer dos anos seguintes, as relações até então distantes entre essas duas descobertas foram se estreitando de modo que uma auxilie a outra e ambas permitam novos descobrimentos.

Em 1905, Albert Einstein formulou a teoria da relatividade restrita, baseada nas equações de Maxwell, e em 1917 desenvolveu a teoria da relatividade geral que trata da interpretação da gravitação. Um ano após a publicação da teoria da relatividade restrita, aos 23 de outubro de 1906, no campo de Bagatelle, centro de Paris, Alberto Santos Dumont alça vôo em sua aeronave 14-BIS, sendo o primeiro registro comprovado de um vôo efetuado por um aparelho mais pesado que o ar por seus próprios meios.

Com o aprimoramento das técnicas de vôo, logo se alcançou o limite da atmosfera e se iniciou a corrida espacial que permitiu ao homem orbitar a terra, pisar em solo lunar e lançar satélites e telescópios que muito contribuíram e contribuem com a

comunidade científica e a sociedade como um todo. O ápice deste desenvolvimento foi o período da “guerra fria”, quando a disputa entre a URSS e EUA, levou a um crescimento acelerado do setor aeroespacial. Dentre as principais conquistas neste período destacam-se o lançamento do primeiro satélite artificial, o russo “Sputnik”; O recorde de velocidade de Mach 6,7, estabelecido pela aeronave experimental hipersônica norte-americana X-15; O lançamento da primeira estação espacial, a russa “Salyut 1”; E em 1986 entra em operação a primeira estação espacial habitada permanentemente e de longa duração, a russa MIR.

Dentre as contribuições de maior importância no setor aeroespacial na atualidade para a comunidade internacional, têm ênfase o Sistema de Posicionamento Global – GPS, declarado totalmente operacional em 1995 e a ISS – “International Space Station”, ou em português, Estação Espacial Internacional, com construção iniciada em 1998.

As relações entre a teoria da relatividade e o setor aeroespacial foram testadas na experiência realizada por Hafele e Keating em 1971. Na ocasião, foram colocados relógios de césio com grande precisão em voos comerciais ao redor da Terra. Foram realizados voos para leste e para oeste e posteriormente compararam os relógios a bordo das aeronaves com relógios do Observatório Naval dos Estados Unidos. Como resultado obtiveram atraso/adiantamento de 60/270 nanosegundos.

Em outra tentativa de encontrar os efeitos da teoria da relatividade, Martin Levine e Robert Vessot acoplaram um relógio de maser de hidrogênio em um foguete. A experiência foi realizada em 1976 utilizando um relógio a maser de hidrogênio desenvolvido em 1959, capaz de manter uma frequência de 1420 MHz. O relógio foi colocado a bordo de um foguete Scout D e fez um voo único onde foi feita a monitoração por rádio da marcha do relógio a bordo do foguete e comparada com a marcha de outro relógio similar em terra. Os resultados obtidos alcançaram uma acurácia de $70/10^6$ considerando os efeitos relativísticos da dilatação temporal em virtude da velocidade e do campo gravitacional e o efeito Doppler nos sinais rádio devido ao movimento do foguete.

AS RELAÇÕES ENTRE A RELATIVIDADE E O SETOR AEROESPACIAL

Introdução à teoria da relatividade restrita

A teoria da relatividade restrita foi elaborada por Albert Einstein e publicada em 1905, baseada nas equações de Maxwell, onde concluiu que a

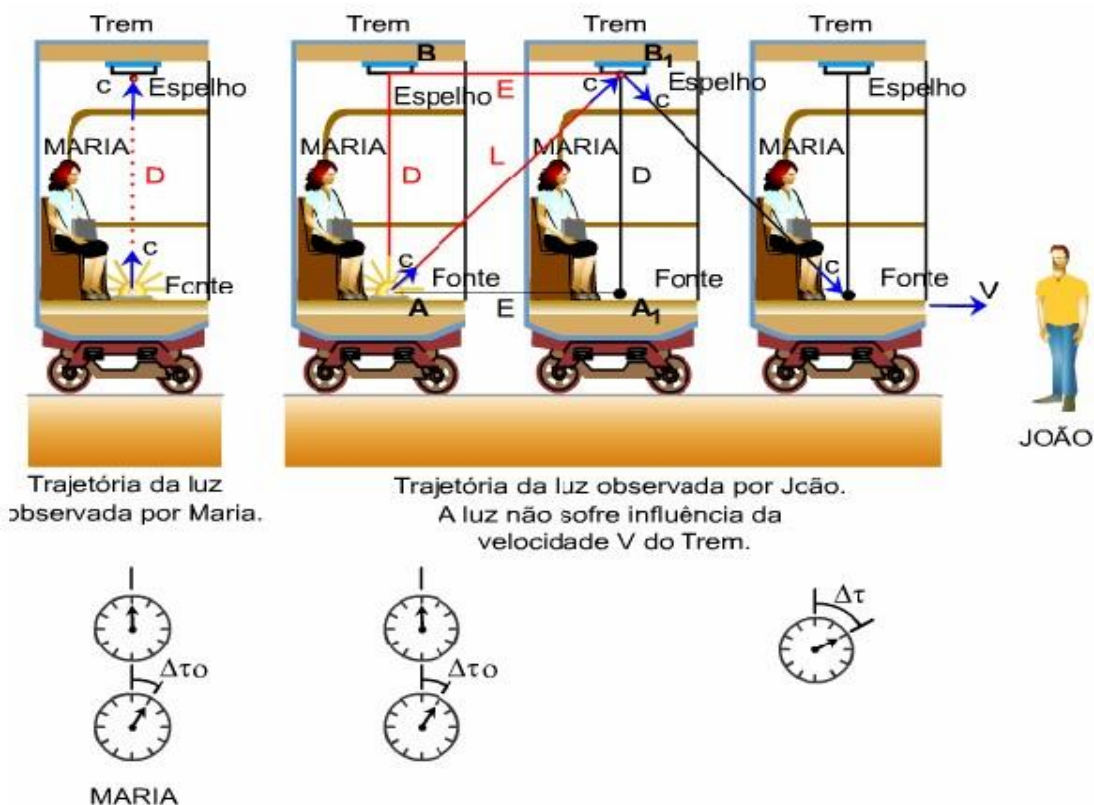
velocidade da luz é constante num meio uniforme independente do referencial adotado, dessa forma postulou o princípio da simultaneidade relativa, onde os intervalos de tempo entre eventos dependem do movimento relativo de seus observadores.

Uma exemplificação prática dessa teoria para ilustrar os conceitos é apresentada a seguir:

Albert Einstein estabeleceu a teoria da Relatividade em 1905, baseado em dois postulados.

1 – O Postulado da Relatividade: as leis da física são as mesmas para observadores em todos os referenciais inerciais. Não existe referencial inercial privilegiado.

2 – O Postulado da Velocidade da Luz: a velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor c em todas as direções e em todos os referenciais inerciais.



Na dedução da fórmula principal da Relatividade Especial, Albert Einstein usou o exemplo da trajetória da luz emitida por uma lâmpada colocada sobre o piso de um trem em alta velocidade, a qual incide em um espelho no teto do trem e retorna ao seu ponto de origem.

Esse evento é observado por Maria, de seu referencial, como passageira do trem, e por João, estacionado fora deste, no referencial em relação ao qual o de Maria acha-se em movimento com velocidade v .

Figura 1, Teoria da Relatividade Restrita – Trem em movimento
Fonte: <http://www.deducoeslogicas.com/relatividade/restrita.html>, acessado em 20/04/2010.

Neste exemplo, tem-se:

Para Maria, o deslocamento da luz foi vertical da fonte de luz no piso do vagão até o espelho no teto do vagão e novamente vertical do espelho no teto à fonte de luz no piso;

Para João, o deslocamento foi transversal da fonte de luz no piso do vagão até o espelho no teto do vagão e novamente transversal do espelho no teto à fonte de luz no piso.

Considerando que o trem se descola com movimento retilíneo e uniforme (MRU), podem-se calcular as trajetórias efetuadas pela luz para os dois referenciais deste mesmo evento.

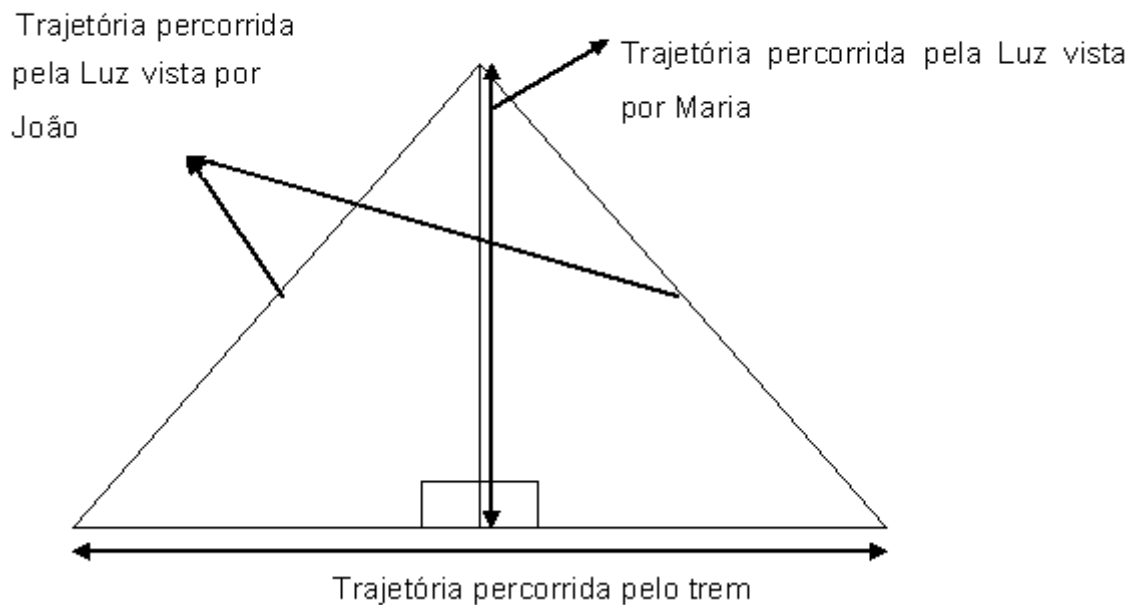


Figura 2, Triângulo Isósceles da trajetória da Luz

A Figura 2 representa o triângulo isósceles formado pela interpolação das trajetórias do raio de Luz observadas por Maria e por João.

Para fins de cálculo, divide-se a Figura 2 em duas partes iguais, onde será apreciada apenas uma parte. O intuito desta divisão é abandonar o triângulo isósceles para utilizar o triângulo retângulo, que apresenta mais facilidade de cálculo.

Neste cálculo, considere a velocidade da Luz como “ c ” ($V_{luz} = c$), o deslocamento percorrido pela Luz visto por Maria igual a “ D ” ($S_{maria} = D$), o deslocamento percorrido pela Luz visto por João igual a “ L ” ($S_{joão} = L$), deslocamento do trem igual

a “ E ” ($S_{trem} = E$), a velocidade do trem igual a “ v ” ($v_{trem} = v$), o tempo perceptível para João igual a “ t_1 ” ($t_{joão} = t_1$), e o tempo perceptível para Maria igual a “ t_2 ” ($t_{maria} = t_2$). Como o espaço percorrido é igual ao produto da velocidade pelo tempo:

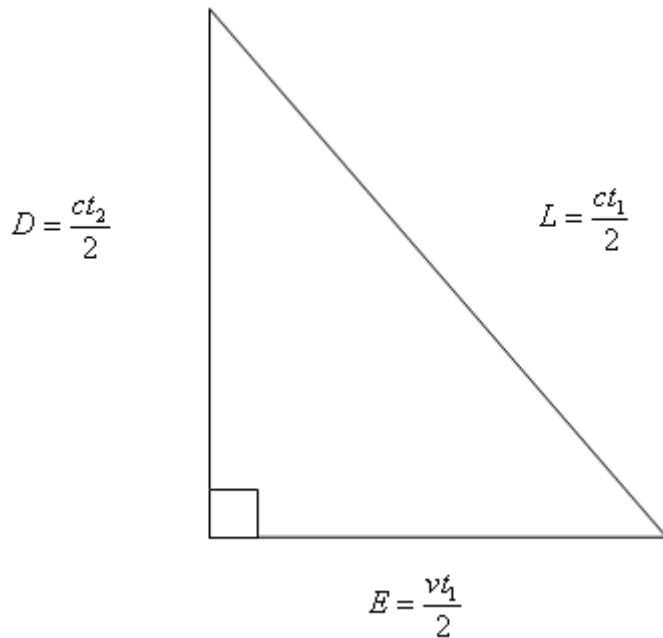


Figura 3, Triângulo retângulo da velocidade da Luz

Nota-se a divisão das equações por dois devido à divisão do triângulo isósceles em dois iguais.

Aplicando o teorema de Pitágoras:

$$\frac{c^2 t_1^2}{4} = \frac{c^2 t_2^2}{4} + \frac{v^2 t_1^2}{4} \longrightarrow c^2 t_1^2 - v^2 t_1^2 = c^2 t_2^2$$

$$t_1^2 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = c^2 t_2^2 \longrightarrow t_1^2 \cdot \left(\frac{c^2}{c^2} - \frac{v^2}{c^2}\right) = t_2^2$$

$$t_1^2 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = t_2^2 \longrightarrow t_1 = t_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t_1 = t_2 \gamma, \text{ onde: } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Assim o tempo perceptível para João será igual ao produto do tempo perceptível para Maria com o fator de Lorentz (γ).

A contração do comprimento ocorre de maneira similar.

Considerando os mesmos observadores, Maria e João, do exemplo anterior. Imagine que Maria, que se encontra em repouso em relação ao trem, tente medir o comprimento da plataforma da estação na qual o trem se desloca em paralelo. Assim a medida será paralela ao deslocamento, podendo ser calculado da seguinte forma:

$S_2 = vt_2$, sendo “ S_2 ” o comprimento medido por Maria, “ v ” a velocidade no trem e “ t_2 ” o tempo medido por Maria.

João, que está em repouso em relação à plataforma também irá calcular o comprimento da plataforma da estação, tomando como base um ponto fixo no trem no instante em que este percorre o comprimento da plataforma, desenvolvendo o seguinte cálculo:

$S_1 = vt_1$, sendo “ S_1 ” o comprimento medido por João, “ v ” a velocidade do trem e “ t_1 ” o tempo medido por João.

Fazendo a divisão da primeira pela última equação:

$$\frac{\Delta S_2}{\Delta S_1} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}$$

Aplicando a equação da dilatação temporal:

$$\frac{\Delta S_2}{\Delta S_1} = \frac{1}{\gamma}$$

$$\Delta S_2 = \frac{\Delta S_1}{\gamma}$$

Como o fator de Lorentz “ γ ” é sempre maior que 1, o comprimento medido por um observador no vagão, que está em movimento em relação a plataforma, é menor que o comprimento medido por um observador externo ao vagão, no solo e em repouso em relação a plataforma. A contração espacial é virtude da dilatação temporal. Este

fenômeno é chamado “contração de Lorentz”.

As influências da relatividade restrita no Sistema de Posicionamento Global

O setor aeroespacial, assim como muitas outras atividades, utiliza os satélites para navegação, orientação, comunicação e demais serviços. O NAVSTAR-GPS (Navigation Satellite with Time and Ranging – Global Positioning System) é um sistema de radionavegação desenvolvido pelo DoD (Department of Defense), o departamento de defesa dos Estados Unidos da América, com o objetivo de ser o principal sistema de navegação global para as forças armadas americanas, posteriormente os serviços foram disponibilizados para a sociedade civil em todo o planeta, passando a ser empregado em diversas atividades e funções, tendo destaque como mecanismo de navegação aérea segura e precisa. O GPS é constituído por uma constelação de 24 satélites distribuídos em seis planos orbitais igualmente espaçados, com quatro satélites em cada plano, dispostos com uma inclinação de 55° em relação ao Equador terrestre. O período orbital é aproximadamente doze horas siderais (43080”). Essa disposição dos satélites permite que pelo menos quatro satélites sejam visíveis em qualquer ponto da superfície terrestre em qualquer instante.

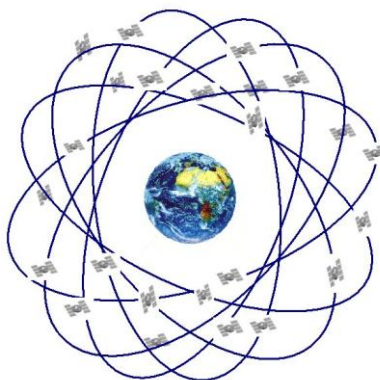


Figura 4, Constelação de satélites GPS

fonte: www.fc.up.pt/lic_eg/, acessado em 18/05/2010.

A Figura 4 ilustra a constelação de satélites GPS

Os satélites são munidos de relógios atômicos altamente acurados e estáveis e transmitem sinais de tempo sincronizados, com informações sobre posição e tempo no instante da transmissão. Para que um receptor a bordo de uma aeronave

consiga determinar sua posição é preciso sincronizar os sinais recebidos de pelo menos quatro satélites

Segundo (João Francisco Galera Mônico, “Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS”, 2000, p. 25), afirma que:

“Cada satélite carrega padrões de frequência altamente estáveis (césio e rubídio) com estabilidade entre 10^{-12} e 10^{-13} por dia, formando uma referência de tempo muito precisa.”

O sistema de navegação NAVSTAR-GPS apresenta diversos fenômenos advindos da teoria da relatividade em virtude dos diferentes campos gravitacionais entre as estações em terra e os satélites em órbita e a elevada velocidade de deslocamento dos satélites em suas órbitas. Os efeitos da relatividade são fortemente influenciáveis nos dados de posicionamento e navegação do sistema.

O Sistema de Posicionamento Global sofre a influência da relatividade de três modos principais: Na marcha dos relógios dos satélites; Na propagação dos sinais eletromagnéticos e nas equações de movimento da órbita dos satélites.

Para (Angela Cristina Cararo 2006, p. 2), diz que:

“Tanto os relógios dos satélites em movimento, quanto os relógios em repouso sobre a superfície da Terra em rotação, são afetados pela dilatação temporal. As diferenças de potencial gravitacional entre os satélites e usuários são responsáveis por desvios de frequência na marcha dos relógios.”

O cálculo da dilatação temporal presente no movimento do satélite em sua órbita é possível com o valor de sua velocidade, que pode ser calculada conhecendo-se a distância entre os centros de gravidade da terra e do satélite, que por sua vez pode ser calculado de posse de seu período orbital.

A terceira Lei de Kepler, Lei dos tempos ou Lei dos períodos, estipula: “A razão entre o quadrado do período pelo cubo da distância é uma constante”.

A Lei da gravitação universal de Isaac Newton estipula: “Dois corpos se atraem mutuamente com uma força que é proporcional à massa de cada um e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa”.

A distância entre um satélite GPS e a superfície terrestre pode ser calculada da seguinte forma:

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(Mt + ms)} a^3$$

como $M_T = 5,98 \times 10^{24}$ kg, $m_s \ll M_T$, $G = 6,67 \times 10^{-11}$ N · m²/kg², $P = 43080$ ”, sendo “a” a distância entre o centro de gravidade do satélite e o centro de gravidade da terra.

Simplificando, tem-se: $a = \left[\frac{P^2 G M_T}{4\pi^2} \right]^{\frac{1}{3}} \longrightarrow a = 26566818,99$ m

Como o raio da terra é 6370 km, então a distância entre o satélite e a superfície da terra é: $26566,819 - 6370 = 20196,819$ km.

Com a distância entre os centros de gravidade da terra e do satélite, é possível calcular a velocidade deste satélite em relação à terra:

$$V = \sqrt{v \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$$

sendo “V” a velocidade do satélite e “r” a distância entre os centros de

gravidade da terra e do satélite. Para uma órbita circular $r = a \rightarrow V_{circ} = \sqrt{\frac{v}{r}}$, assim:

$$V_{circ} = \sqrt{\frac{G M_T}{r}} \longrightarrow V_{circ} = 13949,1014 \text{ km/h ou } 3874,7504 \text{ m/s.}$$

Para o cálculo da dilatação de tempo de um satélite GPS, considera-se inicialmente o período de um ano de 365 dias e 6 horas.

$$t_1 = t_2 \gamma, \text{ onde: } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2}}$$

sendo $t_2 = 31557600$ segundos, então: $t_1 = \frac{31557600}{\sqrt{1 - \left(\frac{3874,7504}{299792458} \right)^2}}$

$t_1 = 31557600,0026358$ segundos. Nota-se uma variação no terceiro dígito após a vírgula.

A contração espacial pode ser calculada de duas maneiras:

Primeira forma: $D = V \times t_3$, sendo t_3 a diferença entre “ t_1 e t_2 ”, e “D” a diferença entre os comprimentos medidos. $D = 3874,7504 \times 0,0026358 = 10,2130671$ metros.

Segunda forma: Inicialmente obtêm-se o deslocamento feito pelo satélite para o mesmo período de tempo (1 ano = 31557600 segundos):

$$\Delta S_1 = V \cdot \Delta t \rightarrow \Delta S_1 = 3874,7504 \times 31557600 \rightarrow \Delta S_1 = 122277823223,04 \text{ metros}$$

Resolvendo a equação da contração de Lorentz:

$$\Delta S_2 = \Delta S_1 \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2} \right] \rightarrow \Delta S_2 = 122277823223,04 \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{3874,7504}{299792458} \right)^2} \right]$$

$$\Delta S_2 = 122277823212,8267547 \text{ metros}$$

No segundo modo de resolução, constatou-se uma diferença de 10,2132452 metros.

Para o período de um dia:

$$t_1 = t_2 \gamma, \text{ onde: } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2}}$$

$$\text{sendo } t_2 = 86400 \text{ segundos, então: } t_1 = \frac{86400}{\sqrt{1 - \left(\frac{3874,7504}{299792458} \right)^2}}$$

$t_1 = 86400,000007216 \text{ segundos}$. Nota-se uma variação a partir do sexto dígito após a vírgula.

Desenvolvendo o cálculo para a contração de Lorentz:

No primeiro método: $D = V \times t_3$, sendo t_3 a diferença entre “ t_1 e t_2 ”, e “D” a diferença entre os comprimentos medidos. $D = 3874,7504 \times 0,000007216 = 0,02796019$ metros.

No segundo método, considerando o período de tempo de um dia (1 dia = 86400 segundos)

$$\Delta S_1 = V \cdot \Delta t \rightarrow \Delta S_1 = 3874,7504 \times 86400 \rightarrow \Delta S_1 = 334778434,56 \text{ metros}$$

Resolvendo a equação da contração de Lorentz:

$$\Delta S_2 = \Delta S_1 \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \right] \rightarrow \Delta S_2 = 334778434,56 \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{3874,7504}{299792458}\right)^2} \right]$$

$$\Delta S_2 = 334778434,532037 \text{ metros}$$

No segundo método de resolução, constatou-se uma diferença de 0,02796234 metros.

Para o período de uma hora:

$$t_1 = t_2 \gamma, \text{ onde: } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$\text{sendo } t_2 = 3600 \text{ segundos, então: } t_1 = \frac{3600}{\sqrt{1 - \left(\frac{3874,7504}{299792458}\right)^2}}$$

$t_1 = 3600,0000003006897 \text{ segundos}$. Nota-se uma variação a partir do sétimo dígito após a vírgula.

Desenvolvendo o cálculo para a contração de Lorentz:

No primeiro método: $D = V \times t_3$, sendo t_3 a diferença entre “ t_1 e t_2 ”, e “D” a diferença entre os comprimentos medidos. $D = 3874,7504 \times 0,0000003006897 = 0,0011650975$ metros.

No segundo método, considerando o período de tempo de uma hora (1 hora = 3600 segundos)

$$\Delta S_1 = V \cdot \Delta t \rightarrow \Delta S_1 = 3874,7504 \times 3600 \rightarrow \Delta S_1 = 13949101,44 \text{ metros}$$

Resolvendo a equação da contração de Lorentz:

$$\Delta S_2 = \Delta S_1 \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \right] \rightarrow \Delta S_2 = 13949101,44 \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{3874,7504}{299792458}\right)^2} \right]$$

$$\Delta S_2 = 13949101,4388349024 \text{ metros}$$

No segundo método de resolução, constatou-se a mesma diferença de 0,0011650975 metros.

Para o período de um minuto:

$$t_1 = t_2 \gamma, \text{ onde: } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$\text{sendo } t_2 = 60 \text{ segundos, então: } t_1 = \frac{60}{\sqrt{1 - \left(\frac{3874,7504}{299792458}\right)^2}}$$

$t_1 = 60,00000000501 \text{ segundos}$. Nota-se uma variação a partir do nono dígito após a vírgula.

Desenvolvendo o cálculo para a contração de Lorentz:

No primeiro método: $D = V \times t_3$, sendo t_3 a diferença entre “ t_1 e t_2 ”, e “D” a diferença entre os comprimentos medidos. $D = 3874,7504 \times 0,00000000501 = 0,00001941$ metros.

No segundo método, considerando o período de tempo de um minuto (1 minuto = 60 segundos)

$$\Delta S_1 = V \cdot \Delta t \rightarrow \Delta S_1 = 3874,7504 \times 60 \rightarrow \Delta S_1 = 232485,024 \text{ metros}$$

Resolvendo a equação da contração de Lorentz:

$$\Delta S_2 = \Delta S_1 \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \right] \rightarrow \Delta S_2 = 232485,024 \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{3874,7504}{299792458}\right)^2} \right]$$

$$\Delta S_2 = 232485,0239805817 \text{ metros}$$

No segundo método de resolução, constatou-se a mesma diferença de 0,00001941 metros.

Com base nos dados obtidos nos cálculos efetuados para a distorção espaço-temporal nos satélites do Sistema de Posicionamento Global GPS, é possível prever os desvios em virtude da velocidade de deslocamento dos satélites e corrigir esses desvios para obtenção de dados de posicionamento e navegação com grande precisão.

Os efeitos da relatividade restrita no sistema GPS não se restringem

somente as órbitas dos satélites, mas também aos relógios atômicos, a propagação do sinal e aos relógios dos receptores.

Os relógios atômicos presentes nos satélites GPS trabalham com precisão de nanossegundos, sendo, portanto, sensíveis e fortemente influenciáveis pela dilatação temporal presente.

Contudo, a maior influência da Teoria da Relatividade para o sistema NAVSTAR-GPS se dá no âmbito da Relatividade Geral em virtude da diferença de campo gravitacional que provoca uma contração do tempo dos satélites (efeito oposto ao da relatividade especial) e que ocasionaria um desvio de 11km em um único dia.

Portanto, os relógios a bordo dos satélites e dos receptores terrestres estão situados em diferentes campos gravitacionais e se deslocam com velocidades diferentes, o que provoca uma aparente alteração na frequência dos relógios. Esses efeitos são compensados, antes do lançamento do satélite, pela redução da frequência nominal dos relógios dos satélites em $4,55 \times 10^{-3}$ Hz (João Francisco Galera Mônico, 2000, p. 125).

Segundo (Halliday, et al. 4ª Ed., vol. 4, p. 123), afirma que:

“Na navegação moderna de longo curso, a localização precisa e a velocidade escalar de uma aeronave são continuamente monitoradas e atualizadas. Com um moderno sistema de satélites de navegação, o NAVSTAR, é possível determinar a localização e a velocidade escalar, em qualquer ponto da Terra, com aproximação de 16 m e de 2cm/s, respectivamente. Contudo, se os efeitos relativísticos não fossem levados em conta, a velocidade escalar não poderia ser determinada com aproximação menor que 20 cm/s, o que é inaceitável para os sistemas modernos de navegação [...]”

As distorções espaço temporais na Estação Espacial Internacional

A Estação Espacial Internacional (ISS) é um laboratório espacial em órbita baixa, tendo, portanto, um decaimento de órbita elevado, perde cerca de 100 metros de altitude por dia. Seu período orbital é de aproximadamente 91,33 minutos.

A ISS é um laboratório espacial atualmente em construção, tendo início em 1998, na ISS ocorrem os maiores fenômenos associados à relatividade restrita em seres humanos, basta considerar que seus ocupantes passam muito mais tempo em operação que aqueles em outras espécies de veículos capazes de atingir elevadas velocidades.

Tendo o período orbital, pode-se calcular a distância entre a superfície da terra e a

Estação Espacial Internacional:

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(M_T + m_s)} a^3$$

Como $M_T = 5,98 \times 10^{24}$ kg, $m_s \ll M_T$, $G = 6,67 \times 10^{-11}$ N · m²/kg², $P = 5479,8''$, sendo “a” a distância entre o centro de gravidade da ISS e o centro de gravidade da terra.

Simplificando, tem-se: $a = \left[\frac{P^2 G M_T}{4\pi^2} \right]^{\frac{1}{3}} \longrightarrow a = 6719426,881 \text{ m}$

Como o raio da terra é 6370 km, então a distância entre a ISS e a superfície da terra é: $6719426,881 - 6370000 = 349,4268809$ km.

Com a distância entre os centros de gravidade da terra e da ISS, é possível calcular a

velocidade da estação em relação à terra: $V = \sqrt{v \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$

sendo “V” a velocidade da ISS e “r” a distância entre os centros de gravidade da terra e

da ISS. Para uma órbita circular $r = a$: $v_{\text{circ}} = \sqrt{\frac{v}{r}}$, assim:

$$v_{\text{circ}} = \sqrt{\frac{G M_T}{r}} \longrightarrow v_{\text{circ}} = 27736,38733 \text{ km/h ou } 7704,552037 \text{ m/s}$$

para o cálculo da dilatação de tempo da ISS, considera-se inicialmente o período de um ano de 365 dias e 6 horas.

Sendo $t_1 = t_2 \gamma$, onde: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2}}$

sendo $t_2 = 31557600 \text{ segundos}$, então: $t_1 = \frac{31557600}{\sqrt{1 - \left(\frac{7704,552037}{299792458} \right)^2}}$

$t_1 = 31557600,01042 \text{ segundos}$.

Desenvolvendo o cálculo para a contração de Lorentz:

No primeiro método: $D = V \times t_3$, sendo t_3 a diferença entre “ t_1 e t_2 ”, e “D” a diferença entre os comprimentos medidos. $D = 7704,552037 \times 0,01042 = 80,281432$ metros.

No segundo método, considerando o mesmo período de tempo (1 ano = 31557600 segundos):

$$\Delta S_1 = V \cdot \Delta t \rightarrow \Delta S_1 = 7704,552037 \times 31557600 \rightarrow \Delta S_1 = 243137171362,8312 \text{ metros}$$

Resolvendo a equação da contração de Lorentz:

$$\Delta S_2 = \Delta S_1 \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2} \right] \rightarrow \Delta S_2 = 243137171362,8312 \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{7704,552037}{299792458} \right)^2} \right]$$

$$\Delta S_2 = 243137171282,53874371 \text{ metros}$$

No segundo método de resolução, constatou-se uma diferença de 80,29245628 metros.

O cosmonauta russo Sergei Krikalev Konstantinovich realizou diversas missões na extinta estação espacial russa MIR e também na ISS, sendo o recordista de tempo no espaço com um total de 803 dias, 09 horas e 39 minutos em órbita. Considerando que a MIR e a ISS apresentam período orbital e velocidades similares, é possível aplicar os mesmos cálculos desenvolvidos anteriormente para a ISS com o cosmonauta em questão e encontrar a dilatação temporal desse período acumulado no espaço com boa precisão.

De acordo com a relatividade restrita: $t_1 = t_2 \gamma$, onde: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2}}$

sendo $t_2 = 69413940 \text{ segundos}$, então: $t_1 = \frac{69413940}{\sqrt{1 - \left(\frac{7704,552037}{299792458} \right)^2}}$

$$t_1 = 69413940,0229229 \text{ segundos}.$$

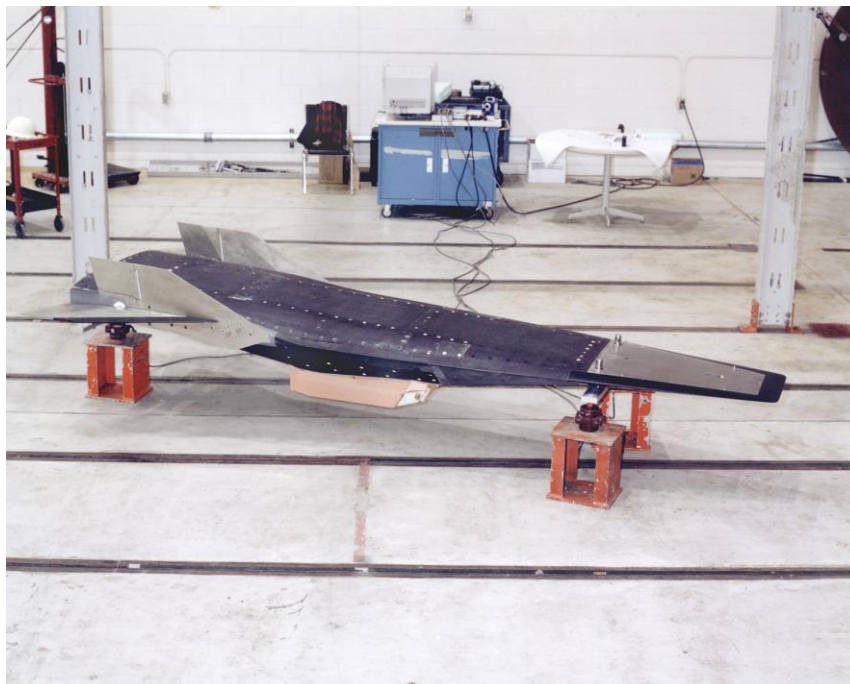
Portanto ouve um desvio de 0,0229229 segundos no tempo acumulado pelo cosmonauta, sendo a maior dilatação temporal comprovada em um ser humano.

Os fenômenos relativísticos em veículos hipersônicos

Veículos hipersônicos são aqueles que atingem velocidades superiores a mach 5. É um novo campo de pesquisa, sendo que atualmente poucos veículos são capazes de atingir velocidades tão elevadas, devido às temperaturas elevadas em suas

superfícies em face da elevada velocidade desenvolvida dentro da atmosfera. As naves espaciais são capazes de desenvolver velocidades muito elevadas, tanto seu lançamento como também no espaço e em sua re-entrada na atmosfera. Outros veículos capazes de atingir velocidades hipersônicas estão sendo estudados e projetados para possíveis aplicações futuras no âmbito militar e civil. Esses veículos têm significativos efeitos da relatividade restrita devido à grande rapidez que se locomovem.

O X-43A é uma aeronave hipersônica não tripulada que faz parte do programa Hyper-X da NASA. Seu funcionamento é baseado em um motor “scramjet” ou estatorreator, um motor desenvolvido especialmente para altas velocidades onde não há compressor, pois devido à velocidade, o ar de impacto já está devidamente comprimido, sendo, portanto, um motor sem partes móveis. A operação da aeronave consiste em acoplá-la a um foguete Pegasus que por sua vez é acoplado em um Boeing B-52 Stratofortress que lançará o foguete com o X-43A em vôo, o foguete irá soltar o X-43A a grande altitude e velocidade para seu curto vôo de alguns segundos. O primeiro teste foi em 2001 e acabou fracassado devido a problemas com o foguete. No segundo teste, realizado em março de 2004, o X-43A alcançou a velocidade de Mach 6,8. No terceiro e último teste, em 16 de novembro de 2004, a aeronave atingiu a marca de Mach 9,6 a 110000 pés de altitude. Em teoria, a aeronave é capaz de atingir até Mach 15.



NASA Dryden Flight Research Center Photo Collection
<http://www.dfrc.nasa.gov/gallery/photo/index.html>
NASA Photo: EC99-45265-23 Date: December 1999 Photo by: Tom Tschida

X-43A Vehicle During Ground Testing

Figura 5, acessado em 02/06/2010.

No teste realizado em 16 de novembro de 2004, a aeronave desenvolveu velocidade próxima de 7000 milhas por hora durante 10 segundos. Tomando por base esses dados, podem-se calcular os efeitos da relatividade restrita no veículo durante a operação.

Para fins de cálculo, faz-se necessário a conversão da unidade de medida de velocidade de milhas por hora (mph) para metros por segundo (m/s). Considerando que uma milha por hora é igual a 0,44704 metros por segundo:

$$7000 \times 0,44704 = 3129,28 \text{ m/s}$$

O cálculo da dilatação temporal será:

Sendo $t_1 = t_2 \gamma$, onde:
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Sendo $t_2 = 10 \text{ s}$ e $v = 3129,28 \text{ m/s}$.

$$t_1 = \frac{10}{\sqrt{1 - \left(\frac{3129,28}{299792458}\right)^2}}$$

$t_1 = 10,0000000005477 \text{ segundos}$.

Os atuais equipamentos de navegação como os sistemas inerciais, sistemas de navegação por satélites, como o GPS, e sistemas astro-inerciais apresentam precisões em escala nanométrica, com isso futuras operações com aeronaves hipersônicas como o X-43A com maiores velocidades e maiores durações podem influenciar no posicionamento e navegação, devendo ser considerado os fenômenos relativísticos para a obtenção de maior precisão.

As naves espaciais são veículos empregados para o lançamento de satélites e telescópios em órbita, operações orbitais com astronautas e lançamentos de sondas espaciais.

A nave espacial norte-americana Challenger partia para o espaço, vencendo a atmosfera com motores foguetes, realizava tarefas em órbita terrestre e retornava para o pouso em vôo planado. Essa espaçonave entrava em órbita baixa da terra a 7743 m/s, onde desenvolvia suas missões por período variável de tempo, geralmente uma semana. Terminadas as atividades orbitais, a nave gira contra a direção do vôo e aciona os motores para diminuir a velocidade e sair do estado de

imponderabilidade, ocasionando sua queda. Durante a reentrada na atmosfera, a nave atinge a velocidade de 26000 km/h.



Figura 6, Fonte: <http://mediaarchive.ksc.nasa.gov/imageviewer.cfm?mediaid=21528&mr=l&w=0&h=0&fn=83pc0147&sn=KSC-83pc-0147>, acessado em 21/09/2010.

A figura 6 mostra o lançamento da nave espacial norte-americana Challenger do Centro Espacial Kennedy em 04/04/1983.

A missão 41-G da NASA, decolou em 5 de outubro de 1984 e foi a 13ª missão do programa e sexta missão do Challenger, consistiu na pesquisa científica da observação da Terra em detalhes. Na ocasião, foram efetuadas 133 órbitas e

percorrido 6919990 km em 8 dias, 5h23min33s.

Para calcular o desvio espaço-temporal neste período da missão, inicialmente faz-se a conversão das unidades: Distância percorrida = 6919990 km = 6919990000 metros; Tempo passado = 8 dias, 5h23min33s = 710613 segundos (t_2). A velocidade de deslocamento portanto é: $V = 9738,057142$ m/s.

$$\text{Sendo } t_1 = t_2\gamma, \text{ onde: } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

Sendo $t_2 = 710613s$ e $v = 9738,057142m/s$.

$$t_1 = \frac{710613}{\sqrt{1 - \left(\frac{9738,057142}{299792458}\right)^2}}$$

$$t_1 = 710613,00037489\text{segundos}.$$

Desenvolvendo o cálculo para a contração de Lorentz:

No primeiro método: $D = V \times t_3$, sendo t_3 a diferença entre “ t_1 e t_2 ”, e “D” a diferença entre os comprimentos medidos. $D = 9738,057142 \times 0,00037489 = 3,6507$ metros.

No segundo método, considerando o mesmo período de tempo:

$$\Delta S_1 = V \cdot \Delta t \rightarrow \Delta S_1 = 9738,057142 \times 710613 \rightarrow \Delta S_1 = 6919989999,848046\text{metros}$$

Resolvendo a equação da contração de Lorentz:

$$\Delta S_2 = \Delta S_1 \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \right] \rightarrow \Delta S_2 = 6919989999,848046 \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{9738,057142}{299792458}\right)^2} \right]$$

$$\Delta S_2 = 6919989996,197324\text{metros}$$

No segundo método de resolução, constatou-se a mesma diferença de 3,6507 metros.

A dilatação espaço-temporal pode causar imprecisão nos dados de posição e navegação da espaçonave, sendo necessário corrigir esses desvios em tempo real para uma navegação segura e precisa.

Aplicações da relatividade restrita para o setor aeroespacial

Alguns equipamentos de orientação, posicionamento e navegação utilizam-se da dilatação temporal prevista pela Teoria da Relatividade Restrita para calcular desvios com grande precisão, uma descrição destes equipamentos e seu princípio de funcionamento é descrito a seguir:

O princípio básico de funcionamento de um INS (Inertial Navigation System) consiste na aplicação das Leis do Movimento de Newton, onde é aplicada uma força em um corpo de prova que antes se encontrava em posição de repouso ou movimento retilíneo e uniforme, com isso o corpo exercerá uma reação devido à inércia em uma mola calibrada onde se calcula a aceleração sob o qual este mesmo corpo esta sujeito pela obtenção da força aplicada ao mesmo e com o conhecimento de sua massa. Esse trabalho é realizado por um conjunto de acelerômetros destinados a aferir as acelerações lineares nos três eixos de uma aeronave e também com girômetros destinados a aferir as velocidades angulares nos mesmos três eixos. Os dados fornecidos por esses instrumentos são processados por um computador responsável por interpretar, calcular e interpolar os dados aferidos. Este conjunto permite estimar a posição e a atitude de uma aeronave.

Os acelerômetros são sensores inerciais empregados para determinar as acelerações lineares. Os acelerômetros opto-mecânicos permitem determinar deslocamentos com grande precisão.

Os girômetros são dispositivos capazes de determinar a atitude do veículo em relação a sua trajetória, ou seja, pode medir velocidades angulares. Giroscópios são subsistemas inerciais baseados em dispositivos girômetros.

O efeito Sagnac estipula que feixes de luz que se propagam em direções opostas em relação a um sistema de referência em rotação experimentam uma diferença de caminho óptico proporcional à rotação absoluta em torno do eixo perpendicular ao plano dos caminhos. Dessa forma, dois feixes de luz que percorrem caminhos ópticos fechados idênticos terão uma variação de fase proporcional à rotação.

O RLG (Ring Laser Gyro) é um sistema inercial que se baseia nesse princípio de funcionamento, consistindo de um laser ao centro de um polígono, geralmente de forma triangular, emitindo feixes em direções e sentidos opostos que estabelecerão ondas estacionárias que em um número inteiro de comprimentos de onda se encaixarão no interior da circunferência. Os feixes de laser emitidos estarão sujeitos a uma mudança de fase devido ao movimento de rotação de seu eixo ortogonal. Os receptores são sensíveis a variação de fase e calculam os deslocamentos ocorridos com

alta precisão. Esse sistema se vale do efeito Doppler transversal onde as ondas estacionárias terão suas frequências alteradas devido a rotação do sistema.

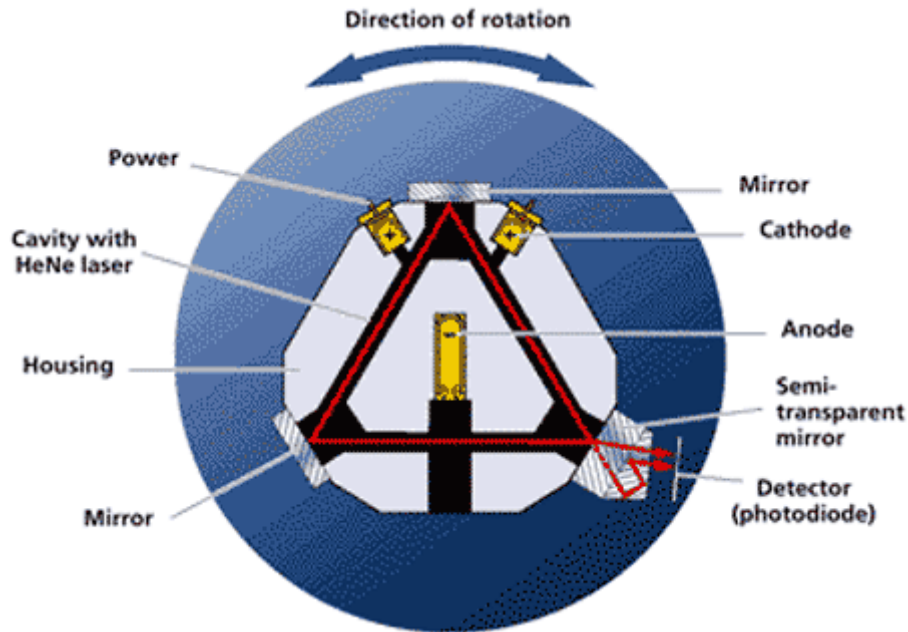


Figura 7, Fonte: <http://www.laserfest.org/lasers/innovations.cfm>, acessado em 28/09/2010.

A Figura 7 mostra um diagrama de um Ring Laser Gyroscope, amplamente empregado para navegação de aeronaves e naves espaciais, alinhamento de satélites e telescópios e em medições de alta precisão.

Outro sistema inercial baseado no interferômetro de Sagnac é o giroscópio a fibra óptica (GFO), que incorpora um girômetro com circuitos ópticos e eletrônicos, o qual apresenta uma bobina de fibra óptica como elemento sensor da velocidade angular de rotação em relação a um referencial inercial.

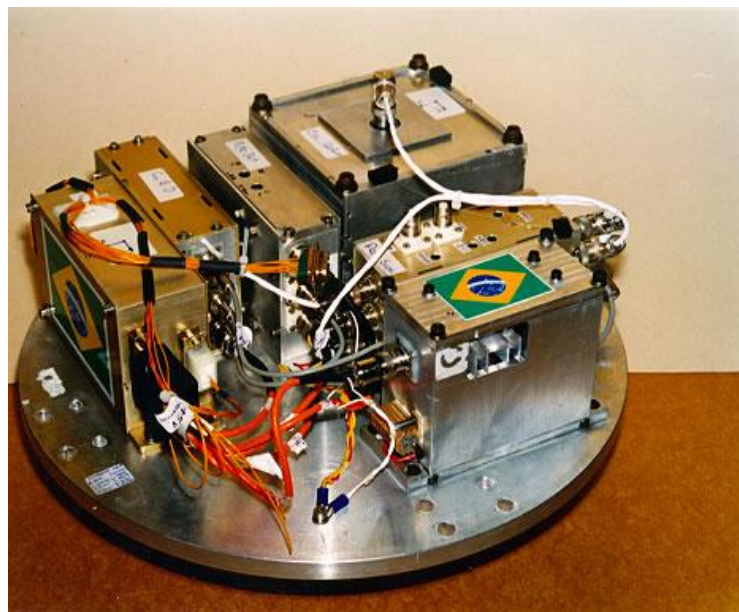


Figura 8, Fonte: http://www.ieav.cta.br/efo/efo_S.php, acessado em 14/06/2010.

Protótipo de giroscópio a fibra óptica desenvolvido pelo grupo EFO-S

APLICABILIDADE

O Sistema de Posicionamento Global – GPS permite realizar operações aéreas com grande precisão, possibilitando uma navegação segura desde a decolagem até o pouso. Esse sistema consegue obter grande precisão graças às correções feitas em relação à relatividade restrita e geral. Sem as correções devidas à relatividade, o GPS não conseguiria alcançar os atuais padrões de precisão e segurança. O potencial deste sistema ainda pode ser aprimorado com correções para os desvios relativísticos das ondas portadoras advindos do efeito Doppler transversal.

O GPS tem capacidade para ser o sistema padrão internacional de navegação aérea, assim como outros sistemas de navegação por satélite similares.

A ISS – “International Space Station” representa a permanência do ser humano no espaço, além de servir para pesquisas e estudos em ambiente de imponderabilidade permanente. A ISS é o principal mecanismo para se verificar os efeitos da relatividade em seres humanos. Também permite o desenvolvimento de diversas pesquisas a esse respeito. Além de tudo, a ISS é, atualmente, o principal destino dos ônibus espaciais e, num futuro próximo, de outros veículos espaciais que operam em grandes velocidades, onde os efeitos da relatividade restrita são fortemente influenciáveis em seus dados de navegação e posicionamento.

Veículos Hipersônicos, em sua maioria, ainda são propostas para aplicações futuras, e as naves espaciais são realidades presente onde os fenômenos relativísticos contribuem para erros de posição e navegação não negligenciáveis, devendo ser corrigidos antes e durante as operações.

As principais aplicações práticas da relatividade restrita no âmbito do setor aeroespacial são os sistemas de navegação inerciais baseados em acelerômetros opto-mecânicos que utilizam o interferômetro de Sagnac para calcular acelerações lineares e angulares do veículo. O Ring Laser Gyro RLG e o Fiber Optic Gyro FOG estão sendo empregados em aeronaves civis e militares para fins de navegação aérea precisa e segura. Outras utilizações são estudadas para mísseis balísticos e veículos hipersônicos.

Os sistemas opto-mecânicos levam vantagem para outros sistemas de navegação inercial

pois não apresentam partes móveis sujeitas a atrito e podem ser construídos e desenvolvidos em menos tempo e com menos investimentos que um sistema puramente mecânico com precisão similar, onde os trabalhos são praticamente artesanais.

PROPOSTA

A teoria da relatividade restrita considera os fenômenos causados em corpos em movimento, sendo aplicada, na maior parte das vezes, em corpos com velocidades próximas a velocidade da luz. No meio aeroespacial, as aeronaves desenvolvem velocidades muito aquém daquelas desenvolvidas pelas partículas siderais e aquelas utilizadas em colisores que comumente são empregadas como exemplos e estudos de caso da teoria da relatividade restrita. Mesmo as aeronaves hipersônicas como as naves espaciais e os satélites espaciais não apresentam velocidades comparáveis aquelas anteriormente citadas e são consideradas, em sua maior parte, como exemplos de aplicação da teoria da relatividade geral, em virtude dos diferentes campos gravitacionais presentes entre os usuários em terra e as órbitas espaciais das mesmas. Assim, quando se fala na relatividade restrita, a primeira vista não se considera seus efeitos para o setor aeroespacial. Contudo, apesar destas velocidades serem relativamente baixas, elas se desenvolvem por períodos de tempo relativamente longos. Além disso, com a automatização dos sistemas presentes, as operações ocorrem com elevada precisão, onde a menor variação em um sistema de espaço-tempo pode causar uma margem de erro significativa.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E APRESENTAÇÃO DOS DADOS

QUESTIONÁRIOS

Foi empregado questionário por meio eletrônico com o Dr. Odylio Denys de Aguiar, doutorado em Física - Louisiana State University System, pesquisador titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e pesquisador colaborador da Universidade de São Paulo. O questionário, na íntegra, é apresentada a seguir:

Thiago Martiusi Moura: Quais seriam as conseqüências caso não fossem considerados os efeitos relativísticos nos satélites GPS?

Dr. Odylio Denys de Aguiar: Existe um artigo "Einstein no dia-a-dia" que saiu na Scientific American Brasil numero 29 (que você pode encontrar em uma boa biblioteca), de outubro de 2004, paginas 90 a 95, que trata muito bem deste assunto. Segundo este artigo, os GPS que se compram nas lojas tem precisão de cerca de 15 metros. Para eles conseguirem isto, precisam utilizar correções da teoria da relatividade, tanto da especial, quanto da geral. Se não incorporassem, a precisão seria de 30 metros ou pior. "Segundo a teoria da relatividade, relógios atômicos no espaço, movendo-se a 14 mil Km por hora, como os do GPS, atrasam cerca de 7 microssegundos por dia em relação aos estacionários." Portanto, a primeira correção é da relatividade especial, na questão da velocidade dos satélites. A outra correção é a da relatividade geral, na questão da altitude na qual se encontra o satélite. Isto por causa da gravidade. Na altitude média dos satélites, de 20 mil Km, "os satélites GPS experimentam um quarto da atração gravitacional que teriam no solo. Como resultado, os relógios a bordo rodam mais depressa em cerca de 45 microssegundos por dia. Portanto, é preciso levar em conta um desvio geral de 38 microssegundos no GPS.

Thiago Martiusi Moura: Qual a relevância da contração e dilatação espaço-temporal para a navegação e posicionamento em naves espaciais?

Dr. Odylio Denys de Aguiar: O efeito devido à velocidade (relatividade especial) é sempre de sinal contrario ao efeito devido à gravidade (relatividade geral) para uma nave em órbita em torno da Terra. Para as naves em órbita em torno da Terra com baixas altitudes, como a ISS, o efeito geral é os relógios lá atrasarem. Para órbitas com altitudes acima de 10.000 km, como no caso dos satélites GPS, o efeito é o dos relógios lá adiantarem, 38 microssegundos por dia para o caso dos satélites GPS e quase 50 microssegundos por dia para os satélites geoestacionários, que estão em orbita a 36.000 km acima do solo. Entretanto, corrigindo estes fatores, não existe problema de navegação e posicionamento.

Thiago Martiusi Moura: Quais as principais influências da contração e dilatação espaço-temporal na International Space Station – ISS?

Dr. Odylio Denys de Aguiar: Os relógios na ISS atrasam cerca de 30 microssegundos por dia. No final de um ano, o atraso chegaria a 11 milissegundos! Isto não chega a ser percebido pelas pessoas. Só através de medições com relógios atômicos é que conseguimos medir a variação.

Em questionário realizado com a Ms. Ângela Cristina Cararo, mestre Ciências Geodésicas com o tema “Correções relativísticas sobre as medidas de tempo GPS” e doutoranda em Ciências Geodésicas pela UFPR, foram feitos os mesmos questionamentos do questionário anterior. O questionário, na íntegra, é apresentada a seguir:

Thiago Martiusi Moura: Quais seriam as conseqüências caso não fossem considerados os efeitos relativísticos nos satélites GPS?

MS. Ângela Cristina Cararo: O sistema GPS baseia-se em transmissão de sinais sincronizados, com informações sobre tempo e posição dos satélites no momento da transmissão. O tempo fornecido pelos relógios dos satélites GPS é fornecido por dois ou mais relógios atômicos altamente estáveis. A diferença de altitude (e, portanto, de potencial gravitacional) entre os relógios atômicos dos satélites e os usuários GPS e também a alta velocidade dos satélites GPS causam efeitos relativísticos que devem ser computados. Uma das conseqüências dos efeitos relativísticos no sistema GPS é a dessincronização entre os relógios dos satélites e o sistema de tempo GPS (relógios sobre o geóide) que, acumulada em um único dia, seria de aproximadamente -38 microssegundos, o que ocasionaria um erro de aprox. 11 km/dia caso não fosse computada.

Thiago Martiusi Moura: Qual a relevância da contração e dilatação espaço-temporal para a navegação e posicionamento em naves espaciais?

MS. Ângela Cristina Cararo: Os relógios atômicos carregados a bordo de naves espaciais sofrem os mesmo efeitos relativísticos dos satélites GPS, afetando sua marcha e acompanhamento do tempo, quando vistos a partir do geóide. Na transmissão de sinais eletromagnéticos ocorrem outros efeitos relativísticos, que, basicamente, também causam dessincronização e podem afetar comunicações, por exemplo.

Thiago Martiusi Moura: Quais as principais influências da contração e dilatação espaço-temporal na International Space Station – ISS?

Ms. Ângela Cristina Cararo: As mesmas citadas anteriormente: dessincronização na marcha de relógios atômicos e na transmissão de sinais eletromagnéticos. Outros efeitos relativísticos além de contração e dilatação temporal também ocorrem, como o Efeito Lense-Thirring e o Shapiro Time Delay, mas normalmente são desprezíveis. Estes últimos efeitos são relevantes nas missões gravimétricas espaciais Goce e Grace, por exemplo.

Foi aplicado questionário com o Dr. Manuel Máximo Bastos Malheiro

de Oliveira, pós-doutorado pela Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho e pós-doutorado pela University of Maryland, College Park, EUA, docente efetivo do departamento de física do ITA. No questionário foram feitos os mesmos questionamentos dos questionários anteriores, que se encontra, na íntegra, a seguir:

Thiago Martiusi Moura: Quais seriam as consequências caso não fossem considerados os efeitos relativísticos nos satélites GPS?

Dr. Manuel Malheiro: Estes efeitos relativísticos não são da relatividade especial (referenciais inerciais, ou seja sem aceleração e portanto $v=$ constante) mas devido a efeitos gravitacionais do campo gravitacional da terra, portanto estão relacionados a teoria da relatividade GERAL de Einstein (referenciais não inerciais, ou seja sujeitos a aceleração, neste caso devido ao campo gravitacional da terra).

Thiago Martiusi Moura: Qual a relevância da contração e dilatação espaço-temporal para a navegação e posicionamento em naves espaciais?

Dr. Manuel Malheiro: Nenhum efeito, pois estes efeitos dependem do fator gamma de Lorentz que depende de $(1-(v/c)^2)^{1/2}$, portanto somente quando a velocidade v do sistema é da ordem da velocidade da luz c , é que estes efeitos aparecem (impossível para uma nave se mover nessas velocidades). Por exemplo, somente se $v/c=0,3$ ou maior que estes efeitos começam a aparecer, pois neste caso o fator gamma de Lorentz vale 0,95, ou seja, é um efeito de apenas 5%, pois quando a razão v/c é bem pequena, $\gamma=1$ e não existe nenhuma contração ou dilatação (o caso das partículas elementares onde v/c é da ordem de 0,9 ou até maior 0,99 agora no LHC – Large Hadron Collider, esse acelerador de prótons, em Genebra, o CERN, aí esse efeito é importante).

Thiago Martiusi Moura: Quais as principais influências da contração e dilatação espaço-temporal na International Space Station – ISS?

Dr. Manuel Malheiro: Devido a resposta do item anterior, esse efeito é nulo também. A ISS está numa órbita com altitude de 400Km e você pode calcular a velocidade orbital facilmente pela teoria da gravitação de Newton igualando a força centrípeta com a força gravitacional e obterá que a velocidade orbital é dada por $v=(G \times M_t / (400 \times 10^3 + R_t))^{1/2}$ com massa da terra M_t na ordem de 6×10^{24} kg e o raio da terra $R_t=6400$ km (não se esqueça de passar as distâncias para metros se usar a constante da gravitação G no sistema MKS) e verá que esta velocidade é bem menor que velocidade da Luz c .

ANÁLISE DAS IDÉIAS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Questão um: Efeitos relativísticos nos satélites GPS

Na primeira questão aplicada nos questionários empregados, foi abordado o Sistema de Posicionamento Global – GPS como modelo dependente da relatividade.

Neste quesito, o Dr. Odylio Denys de Aguiar e a Ms. Ângela Cristina Cararo destacaram as influências da relatividade restrita (especial) e geral, demonstrando que a resultante é virtude da relatividade geral. O Dr. Manuel Malheiro diz que a influência se dá apenas no âmbito da relatividade geral.

Para o Dr. Odylio Denys de Aguiar, a relatividade restrita ocasiona um atraso de cerca de 7 microssegundos, e a relatividade geral ocasiona um adiantamento de cerca de 45 microssegundos, tendo como resultante um adiantamento de 38 microssegundos por dia.

Para a Ms. Ângela Cristina Cararo, o desvio resultante é de 38 microssegundos, o que ocasionaria um erro de aproximadamente 11km por dia.

Segundo os cálculos desenvolvidos da dilatação temporal para o GPS, para o período de um dia (página 25), constatou-se um atraso de 7 microssegundos, mesmo valor apontado pelo Dr. Odylio.

Na página 27, é apontada a maior influência da relatividade geral como resultante nos desvios do GPS, ocasionando um desvio de 11km por dia, mesmo valor informado pela Ms. Ângela.

Questão dois: A relatividade restrita em naves espaciais

Segundo o Dr. Odylio Denys de Aguiar, naves espaciais a baixas altitudes, como a ISS, sofrem maior influência da relatividade restrita (especial) e, conseqüentemente, os relógios tendem a atrasar. Já para naves em elevadas altitudes, tendem a sofrer maior influência da relatividade geral, aonde os relógios irão se adiantar, como o GPS onde o desvio é de 38 microssegundos por dia.

Para a Ms. Ângela Cristina Cararo, os efeitos em naves espaciais são similares aos efeitos que ocorrem no GPS, afetando a marcha e o acompanhamento do tempo, quando vistos a partir do geóide. Ainda segundo Ms. Angela, nas transmissões de sinais eletromagnéticos ocorrem outros efeitos que causam dessincronização e

podem afetar as comunicações.

Para o Dr. Manuel Malheiro, não há nenhum efeito, pois considera que apenas com velocidades próximas à velocidade da luz que estes efeitos são significantes.

Questão três: A relatividade restrita na ISS

O Dr. Odylio Denys de Aguiar ressaltou que os relógios na ISS atrasam-se cerca de 30 microssegundos por dia, o que no final de um ano chega a 11 milissegundos.

Segundo a Ms. Ângela Cristina Cararo, as principais influências da relatividade restrita ocorrem no âmbito da dessincronização na marcha de relógios atômicos e na transmissão de sinais eletromagnéticos.

Para o Dr. Manuel Malheiro, os efeitos são nulos, pois, assim como na questão anterior, considera que apenas com velocidades próximas à velocidade da luz que estes efeitos são significantes.

Na página 29 é apresentado o cálculo da dilatação temporal anual para a ISS, neste cálculo, obtive a diferença de 10,42 milissegundos, muito próximo ao valor informado pelo Dr. Odylio D. Aguiar.

CONCLUSÃO

A teoria da relatividade restrita tem estreitas relações com o meio aeroespacial e apresenta grandes perspectivas futuras. Os sistemas nos quais a relatividade é influente são o estado da arte de suas funcionalidades. Os sistemas de navegação por satélites são amplamente empregados no meio aeroespacial pela sua precisão e segurança. As atividades com veículos hipersônicos têm perspectivas de aumentos futuros com o advento de novas tecnologias. Os sistemas inerciais de navegação opto-mecânicos se destacam pela precisão e confiança com possibilidade de emprego em grande escala.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert e WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física 4 – Ótica e Física Moderna**. 4ª Edição. Rio de Janeiro. LTC, 1996.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert e WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física 2 – Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 4ª Edição. Rio de Janeiro. LTC, 1996.

KAYTON, Myron e FRIED, Walter R. **Avionics Navigation Systems**. 2ª Edição. Nova York, John Wiley & Sons, 1997.

MÔNICO, João Francisco Galera. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. 1ª Edição. São Paulo. UNESP. 2000.

TIPLER, Paul A. **Física para cientistas e engenheiros volume 3**. 4ª Edição. Nova York. LTC. 1999.

CARARO, Angela Cristina. **Correções relativísticas sobre as medidas de tempo GPS**. 2006. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: <<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/1884/5785/1/ANGELA%20CRISTINA%20CARARO.pdf>>. Acesso em: 02 mai. 2010.

CGEE. **Tecnologia inercial no Brasil 2007-2010**. Brasília DF, 2006. Disponível em: <www.cgee.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=4817>. Acesso em: 03 mai. 2010.

FILHO, Kepler de Souza Oliveira e SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. **Satélites Artificiais**. Astronomia e Astrofísica, Departamento de Astronomia do Instituto de Física – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/kepleis/node13.htm>>. Acesso em: 25 abr. 2010.

SHAYLER, David. **Aviões de Combate - CHALLENGER**. 1ª Edição. São Paulo. NOVA CULTURAL. 1987.

NASA, News. **Faster Than a Speeding Bullet: Guinness Recognizes NASA Scramjet**. Notícia, Washington, 2005. Disponível em: <http://www.nasa.gov/home/hqnews/2005/jun/HQ_05_156_X43A_Guinness.html>. Acesso em: 07 jun. 2010.

CERVO, Amado Luiz; BERVIAN, Pedro Alcino; SILVA, Roberto da. **Metodologia científica**. 6ª Edição. São Paulo. Pearson, 2009.

CRESWELL, John W. **Projeto de Pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 2ª Edição. Porto Alegre. Artmed, 2007.

FIGURA 1. **Teoria da Relatividade Restrita – Trem em movimento**. Disponível em: <<http://www.deducoeslogicas.com/relatividade/restrita>>. Acesso em: 20 abr. 2010.

FIGURA 4. **Constelação de satélites GPS**. Disponível em: <www.fc.up.pt/lic_eg/>. Acesso em: 18 mai. 2010.

FIGURA 5. **X-43A Vehicle During Ground Testing**. Disponível em: <<http://www.dfrc.nasa.gov/gallery/photo/index.html>>, acesso em: 02/06/2010.

FIGURA 6. **Nave Espacial Challenger.** Disponível em: <<http://mediaarchive.ksc.nasa.gov/imageviewer.cfm?mediaid=21528&mr=1&w=0&h=0&fn=83pc0147&sn=KSC-83pc-0147>>, acesso em 21/09/2010.

FIGURA 7. **Diagrama de um *Ring Laser Gyroscope*.** Disponível em: <<http://www.laserfest.org/lasers/innovations.cfm>>, acesso em 28/09/2010.

FIGURA 8. **Giroscópio a Fibra Óptica.** Disponível em: <http://www.ieav.cta.br/efo/efo_S.php>, acesso em 14/06/2010.