

SAA0167

Princípios de Avionica e Navegação

Instrumentos de Voo Inerciais

Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto
jhbidi@sc.usp.br

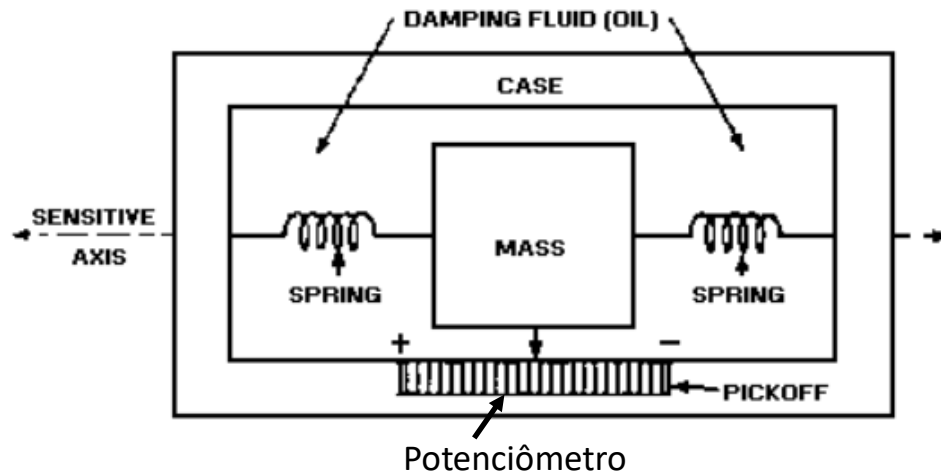
- **Introdução**
- **Componentes Inerciais**
- **Acionamento**
- **Instrumentos Inerciais**
- **Instrumentos Inerciais Modernos**
- **Indicadores Digitais**
- **Navegação Inercial**

- **Introdução**
- Componentes Inerciais
- Acionamento
- Instrumentos Inerciais
- Instrumentos Inerciais Modernos
- Indicadores Digitais
- Navegação Inercial

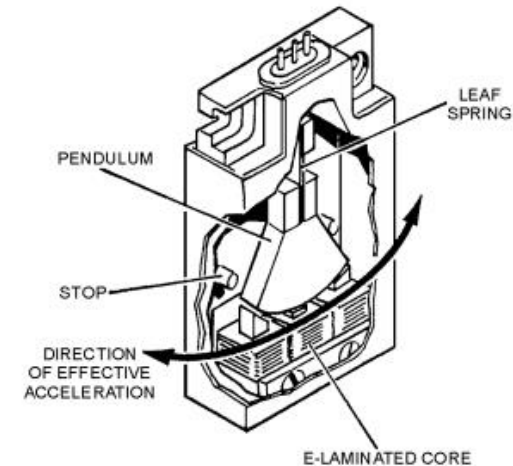
- Sistema fundamental para voo sem contato visual com o horizonte
- Consiste em três instrumentos diferentes de indicação, que fornecem quatro tipos de informação
- Tais instrumentos se baseiam em dois componentes básicos:
 - Acelerômetro
 - Giroscópio
 - Plataformas Giro-estabilizadas

- Introdução
- **Componentes Inerciais**
- Acionamento
- Instrumentos Inerciais
- Instrumentos Inerciais Modernos
- Indicadores Digitais
- Navegação Inercial

- Acelerômetros
- Podem ser de vários tipos
- Os mais comuns são os de massa móvel e os de pêndulo



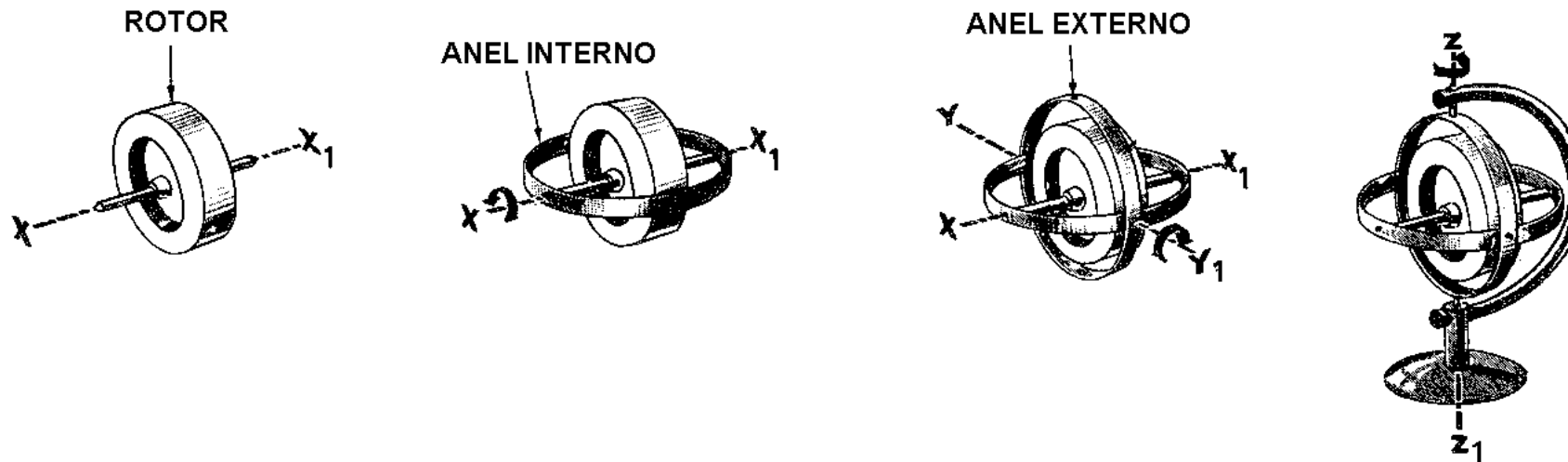
Acelerômetro de massa móvel



Acelerômetro de pêndulo

FONTE: Navy electricity and Electronics Training Series – Module 15 (1998)

- **Giroscópios**
- Consiste em um rotor com anéis que permitem girar em torno de qualquer eixo (gimbal ou suporte cardan)



FONTE: Belo, E. M. (2004)

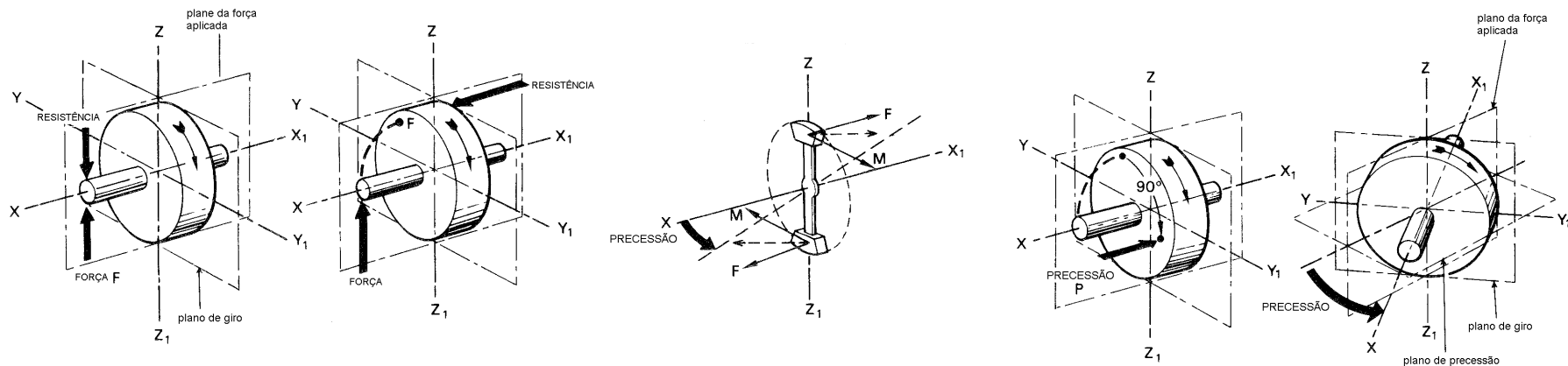
- **Giroscópios**



FONTE: Wikipedia

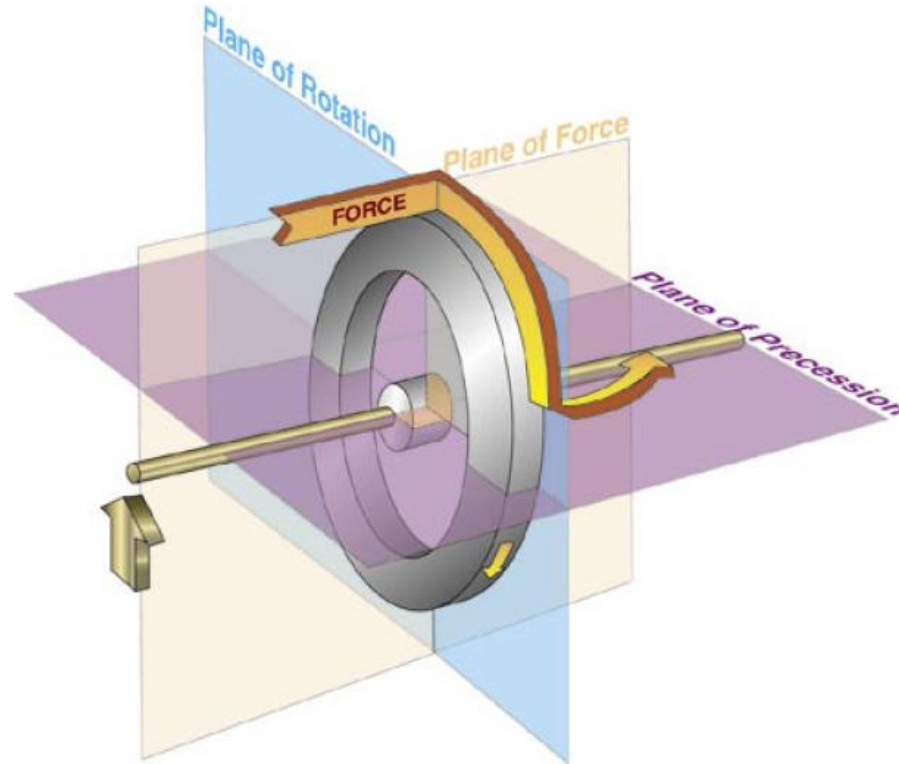
- **Giroscópios**
- Quando o rotor está em movimento, o sistema apresenta três propriedades muito importantes para o funcionamento do giroscópio:
 - Precessão
 - Rigidez
 - Ereção

- **Giroscópios**
- *Precessão*
- Mudança na direção do eixo de rotação devido à aplicação de uma força
- Ocorre em direção perpendicular à de rotação e da força



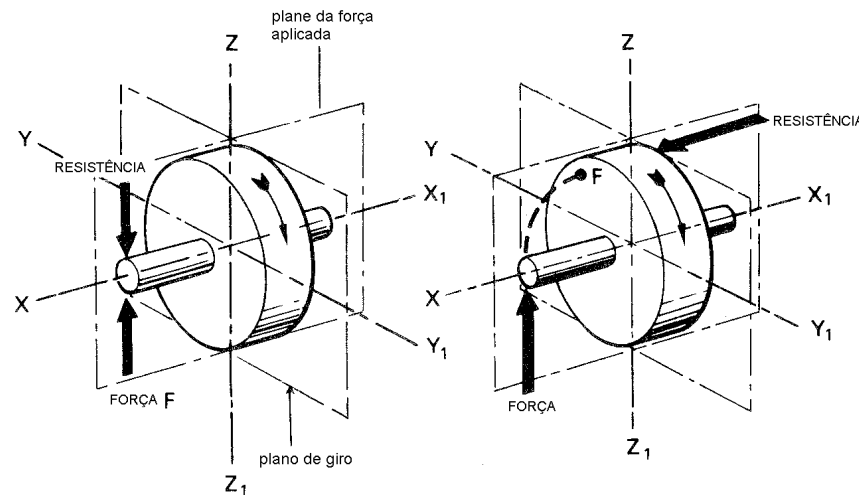
FONTE: Belo, E. M. (2004)

- **Giroscópios**
- *Precessão*



FONTE: FAA-H-8083-15B (2012)

- **Giroscópios**
- *Rigidez*
- Resistência aplicada pelo rotor a forças externas que tendam a mudar a direção de rotação do mesmo
- Ocorre em sentido oposto ao da força



FONTE: Belo, E. M. (2004)

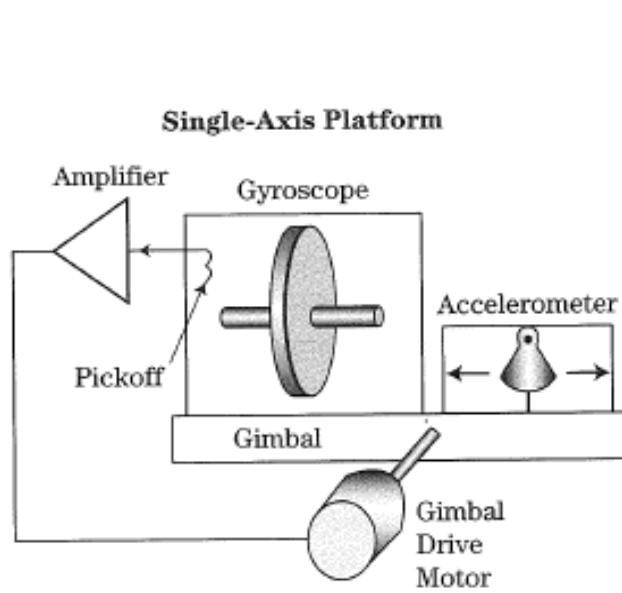
- **Giroscópios**
- *Ereção*
- Um giroscópio sempre tem a tendência a fazer o eixo de rotação do rotor ficar na vertical (alinhado com a gravidade)
- Esta propriedade é chamada ereção

- **Giroscópios**

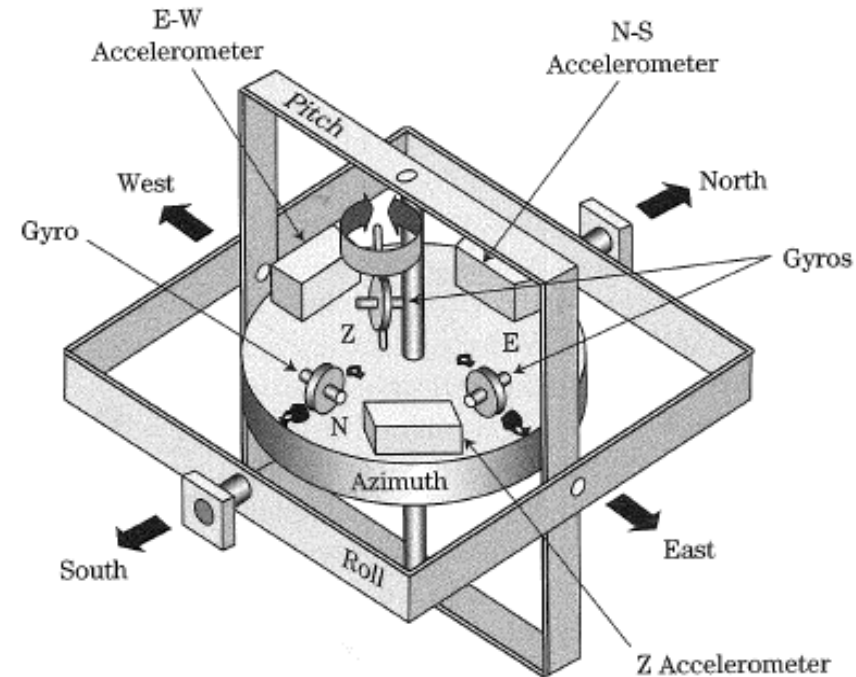
https://www.youtube.com/watch?v=cquvA_lpEsA

- **Plataformas Giro-estabilizadas**
- Um acelerômetro só é totalmente eficaz se estiver perfeitamente alinhado com a direção do movimento
- Pra isso, utiliza-se um giroscópio garantindo o alinhamento do acelerômetro
- Essa combinação de ambos os componentes, montados em um gimbal, é chamada de Plataforma Giro-estabilizada

- Plataformas Giro-estabilizadas



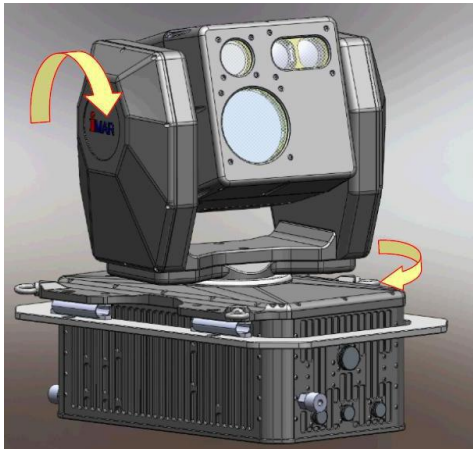
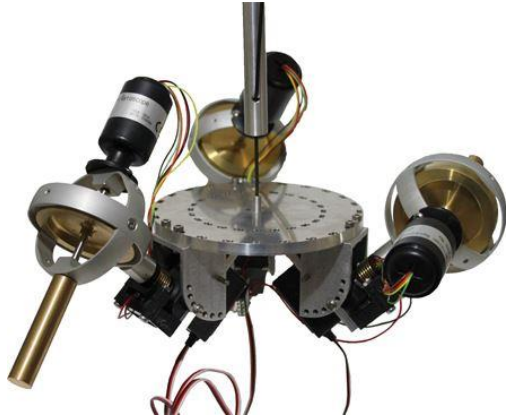
Direção única



Tridimensional

FONTE: McShea, R. E. (2010)

- Plataformas Giro-estabilizadas



FONTE: imar-avigation.de



FONTE: militaryaerospace.com



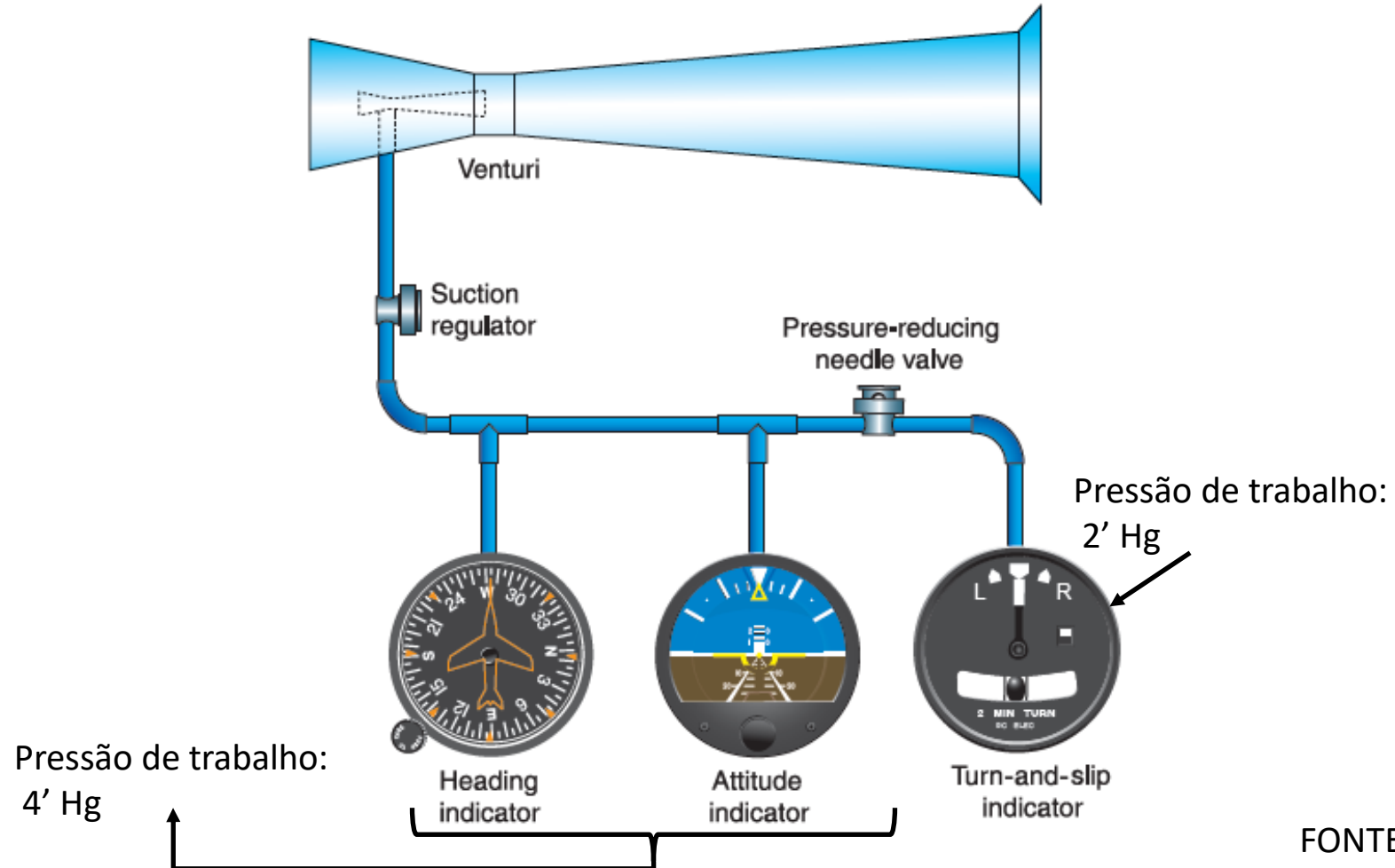
FONTE: tacticalelectronics.com

- Introdução
- Componentes Inerciais
- **Acionamento**
- Instrumentos Inerciais
- Instrumentos Inerciais Modernos
- Indicadores Digitais
- Navegação Inercial

- O acionamento (rotação) do giroscópio pode se dar de três formas:
 - Acionamento pneumático
 - Acionamento por bomba de vácuo
 - Acionamento elétrico

- **Acionamento Pneumático**
- Aeronaves sem bomba pneumática possuem acionamento pelo ar coletado por um tubo de venturi
- A pressão é regulada por válvulas ao longo da linha
- Recomendada para aeronaves com voo em baixa altitude, devido ao risco de congelamento das linhas

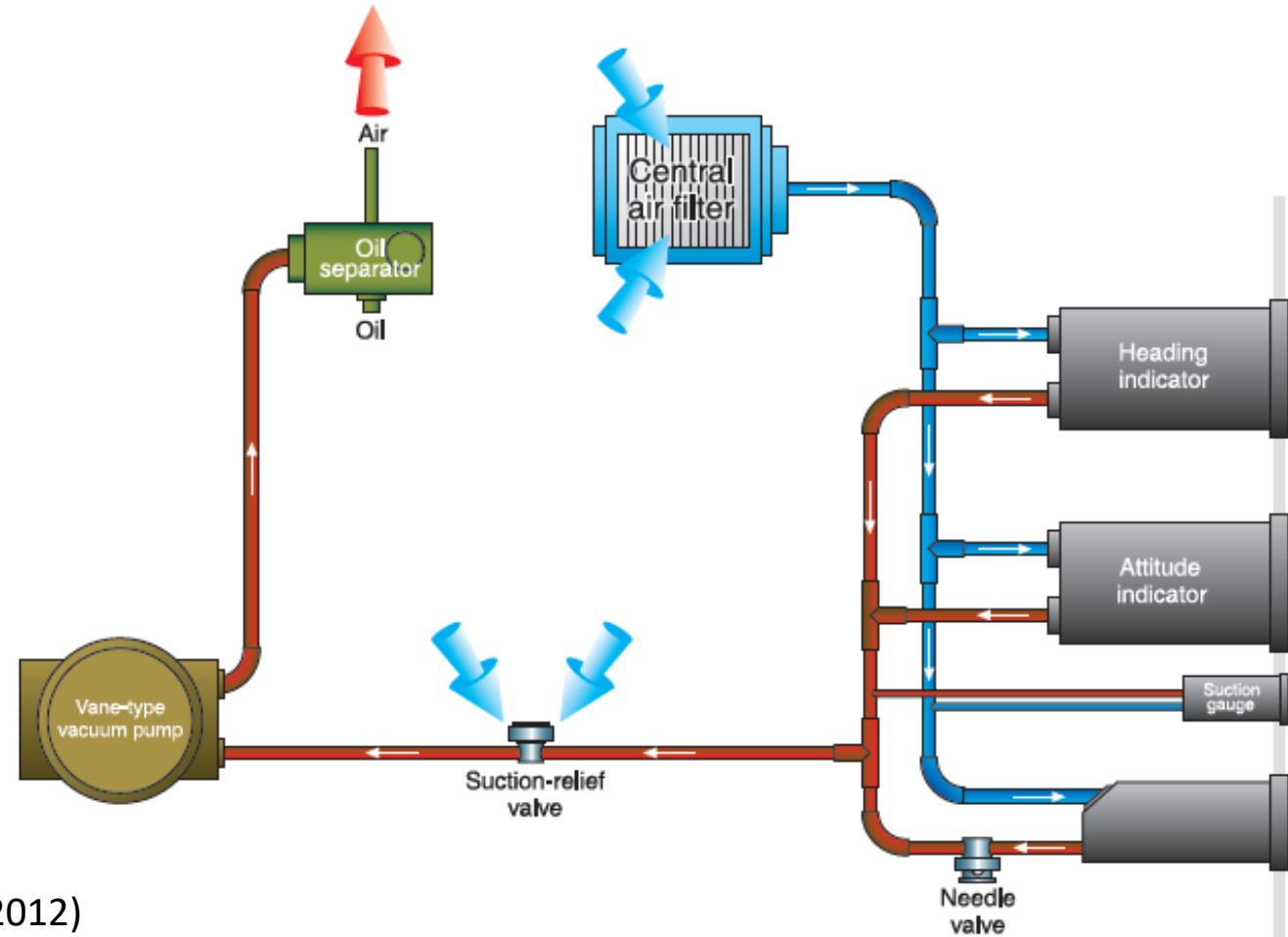
- Acionamento Pneumático



FONTE: FAA-H-8083-15B (2012)

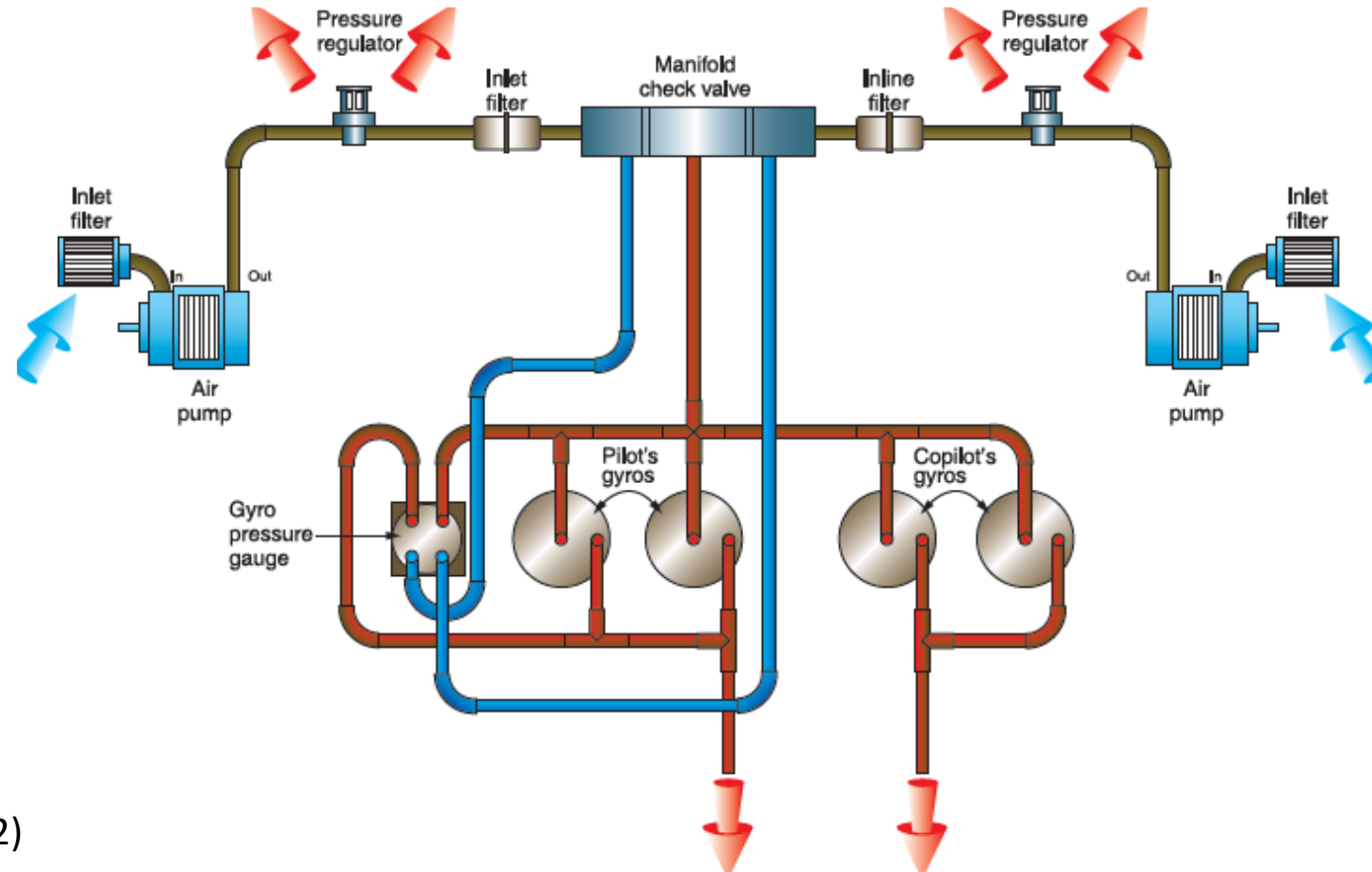
- **Acionamento por Bomba de Vácuo**
- Uma bomba de vácuo puxa ar externo a pressão controlada, e este alimenta os giroscópios
- Aeronaves que voam em baixa altitude possuem óleo borrifado na linha pneumática, para lubrificar os instrumentos
- Aeronaves para altas altitudes não possuem óleo na linha, já que o ar é menos denso e portanto precisa ter maior velocidade na sucção
- Para suprir a lubrificação, os instrumentos são feitos com materiais especiais, que dispensam lubrificação constante

- Acionamento por Bomba de Vácuo



FONTE: FAA-H-8083-15B (2012)

- **Acionamento por Bomba de Vácuo**
- Sistema completo para aeronaves bimotores

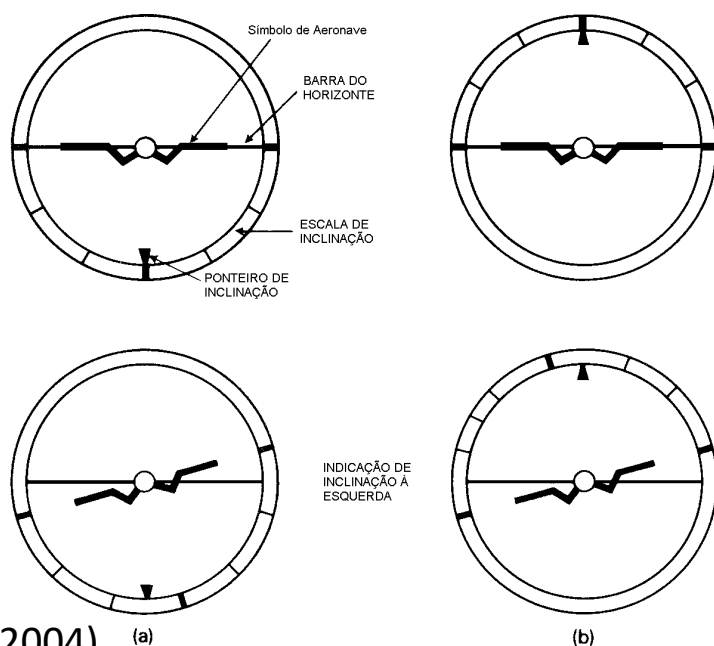


FONTE: FAA-H-8083-15B (2012)

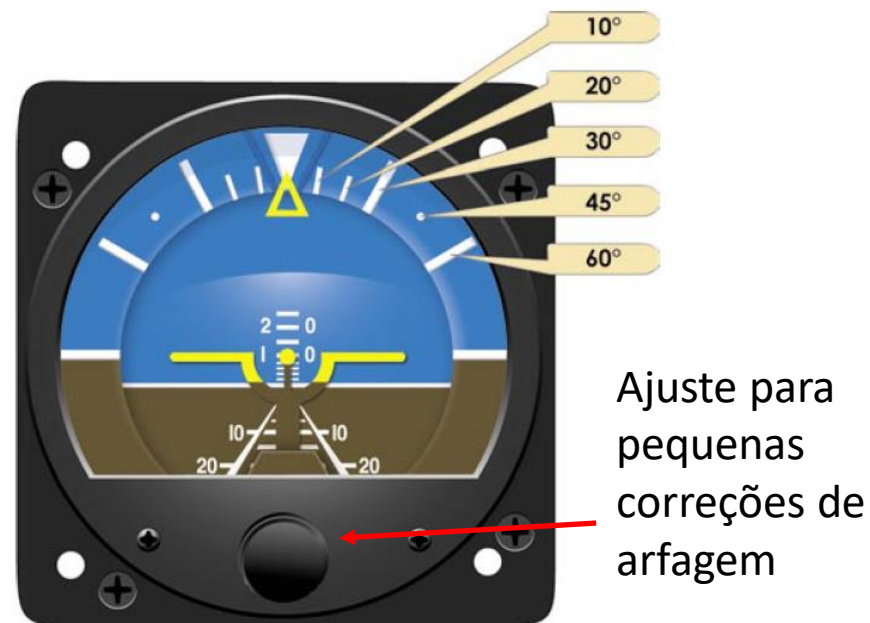
- **Acionamento elétrico**
- Aeronaves maiores normalmente utilizam acionamento dos giroscópios por motores elétricos
- Quando for o caso, os instrumentos devem indicar o tipo de acionamento (A.C. ou D.C.) e sua carga (14 V ou 28 V)

- Introdução
- Componentes Inerciais
- Acionamento
- **Instrumentos Inerciais**
- Instrumentos Inerciais Modernos
- Indicadores Digitais
- Navegação Inercial

- Horizonte Artificial
- Também chamado de Indicador de Atitude
- Fornece indicação de arfagem e rolamento da aeronave

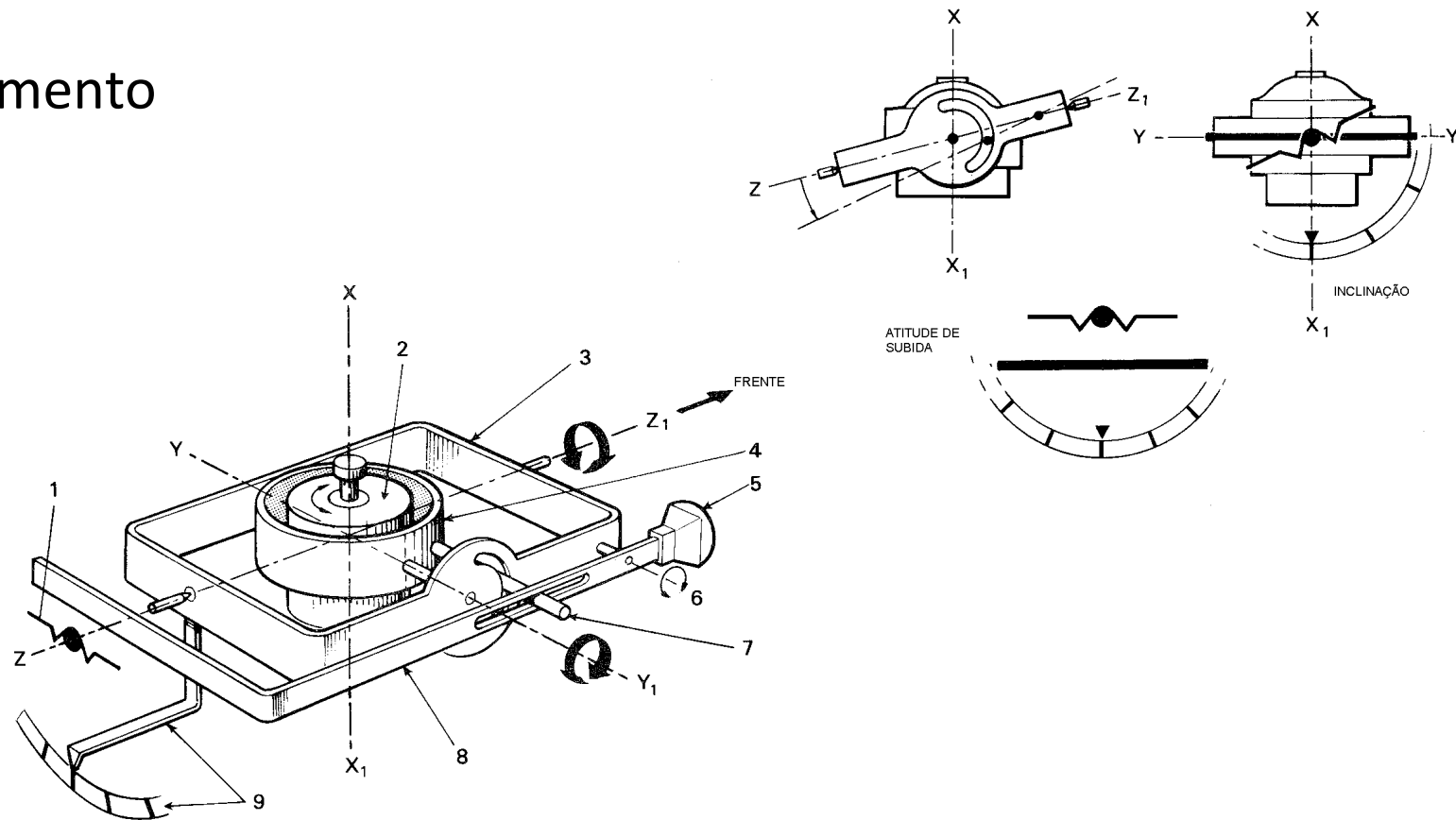


FONTE: Belo, E. M. (2004)



FONTE: FAA-H-8083-15B (2012)

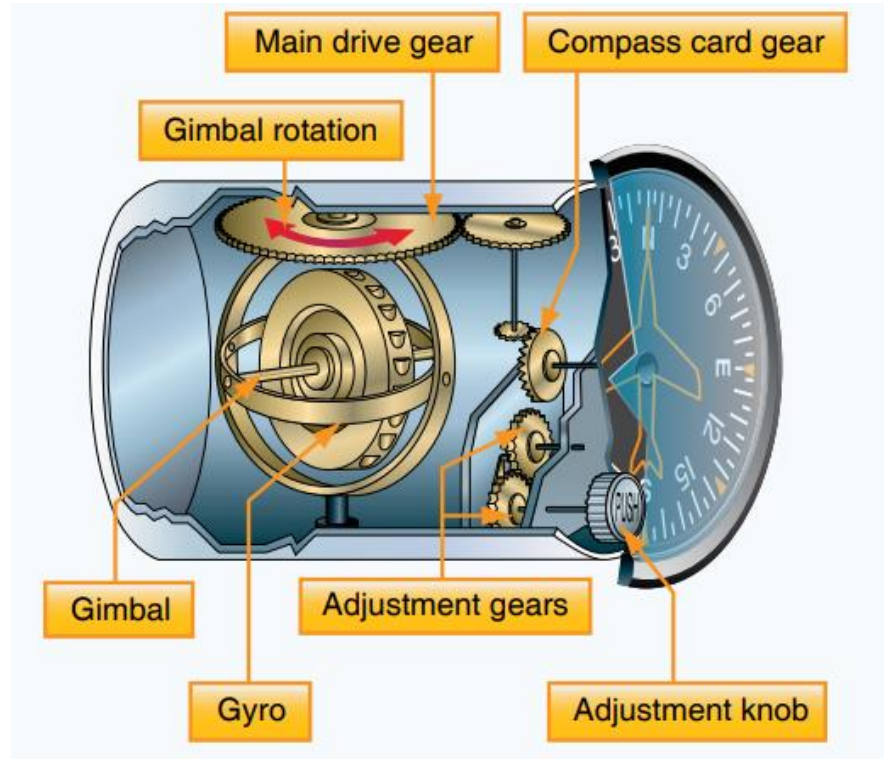
- Horizonte Artificial
- Funcionamento



FONTE: Belo, E. M. (2004)

- **Indicador de Proa**
- Instrumento utilizado como backup para indicação de proa
- A direção deve ser ajustada manualmente com base na bússola magnética e seu giroscópio faz com que tal direção seja mantida pelo princípio da rigidez
- A rotação da Terra causa erros em sua indicação. Logo o padrão é checar a proa a cada 15 minutos de voo, comparando-a com a bússola

- Indicador de Proa

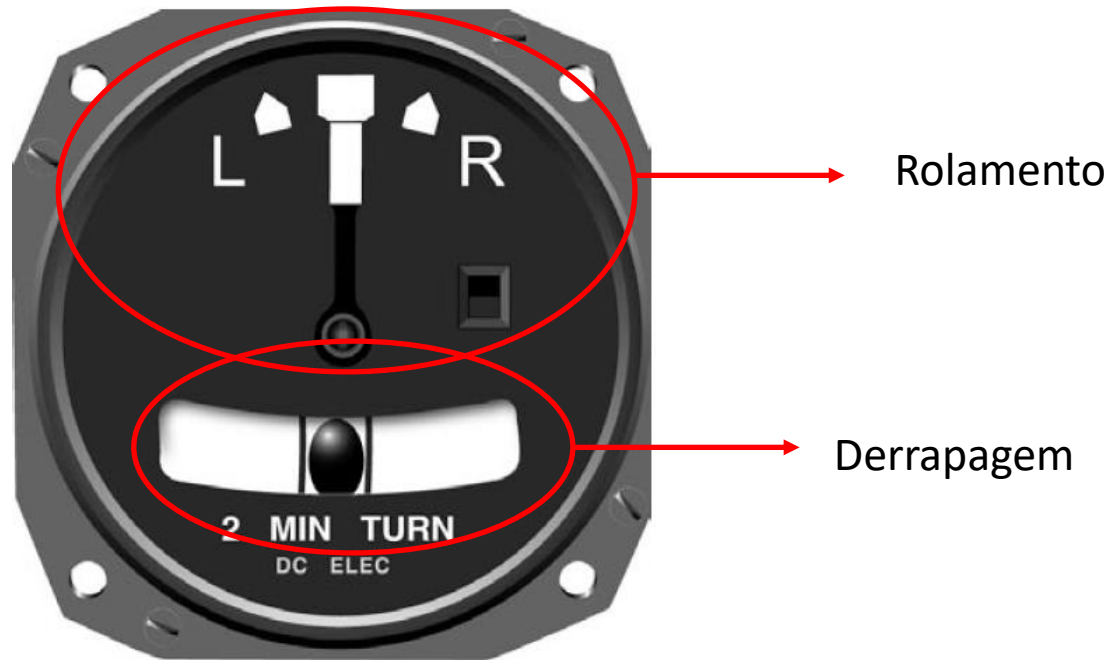


FONTE: FAA-H-8083-25B (2016)



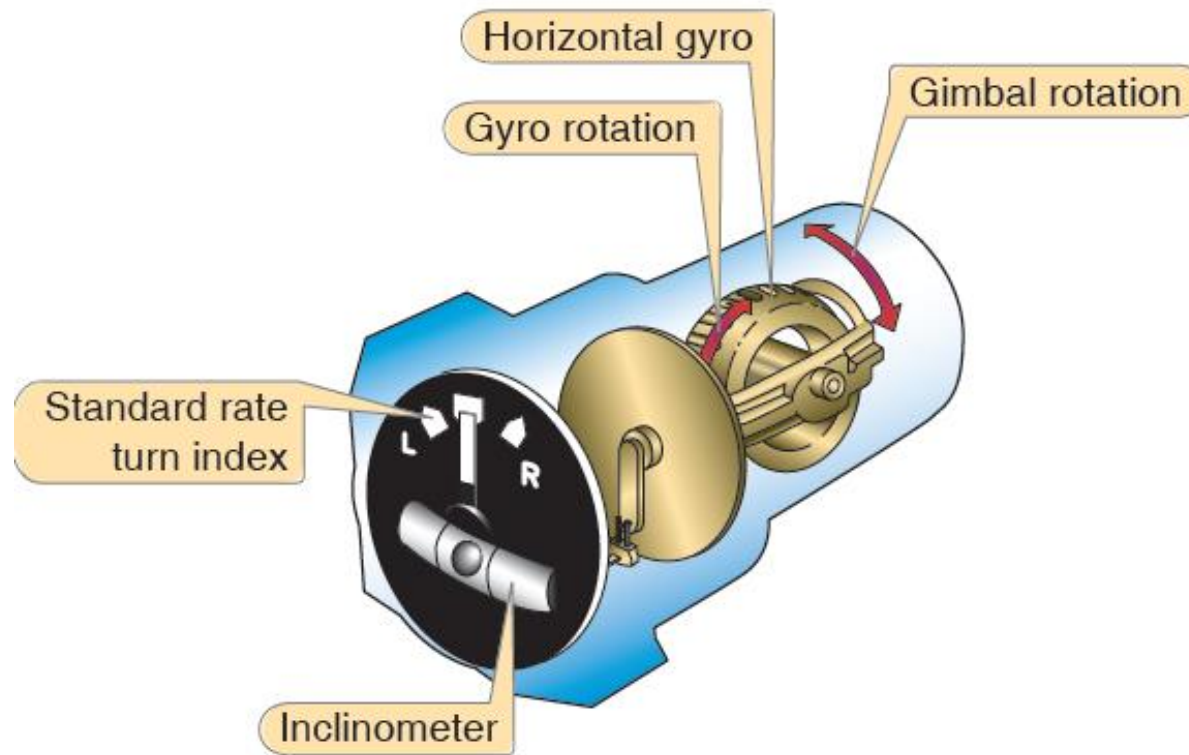
FONTE: FAA-H-8083-15B (2012)

- Indicadores de Curva
- *Indicador de Curva e Derrapagem*
- Dois sensores separados: rolamento e derrapagem



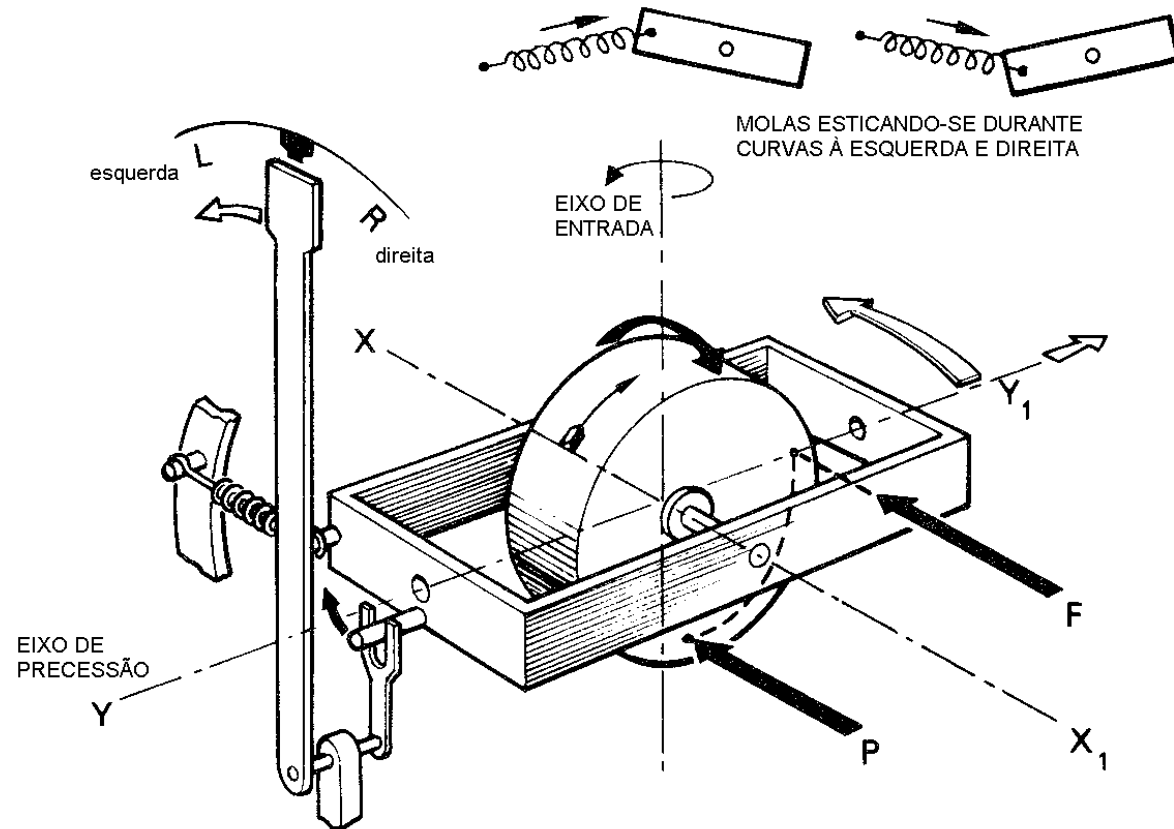
FONTE: FAA-H-8083-15B (2012)

- Indicadores de Curva
- *Indicador de Curva e Derrapagem*



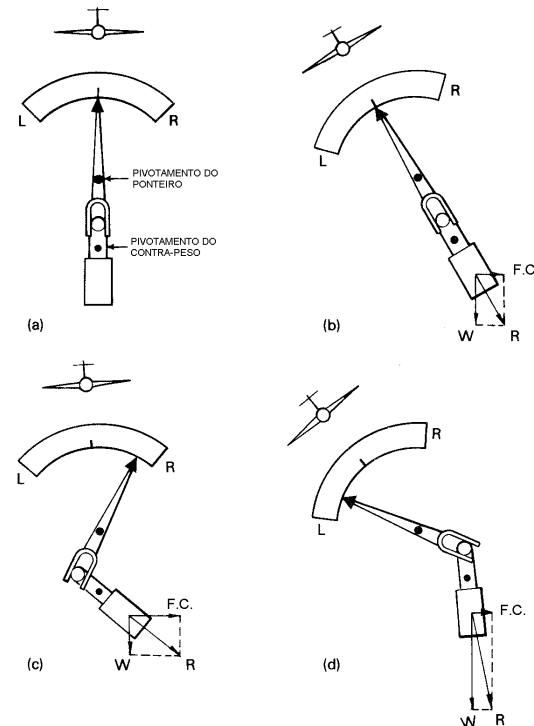
FONTE: FAA-H-8083-15B (2012)

- Indicadores de Curva
- *Indicador de Curva e Derrapagem*
- Rolamento

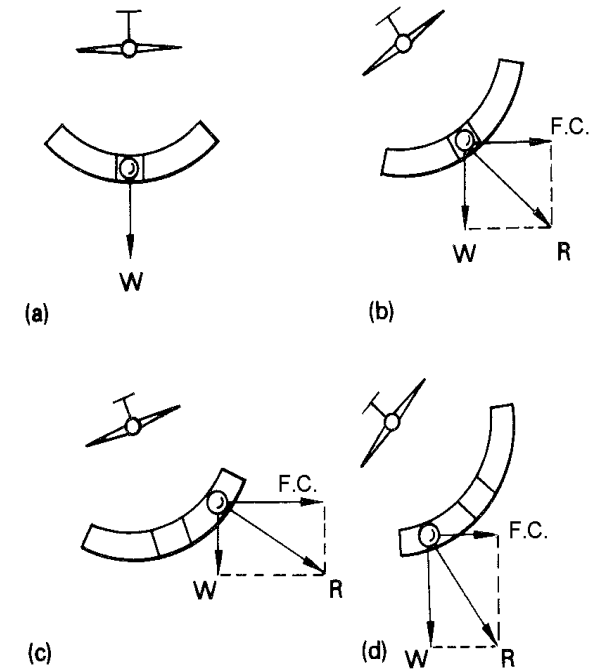


FONTE: Belo, E. M. (2004)

- Indicadores de Curva
- *Indicador de Curva e Derrapagem*
- Derrapagem



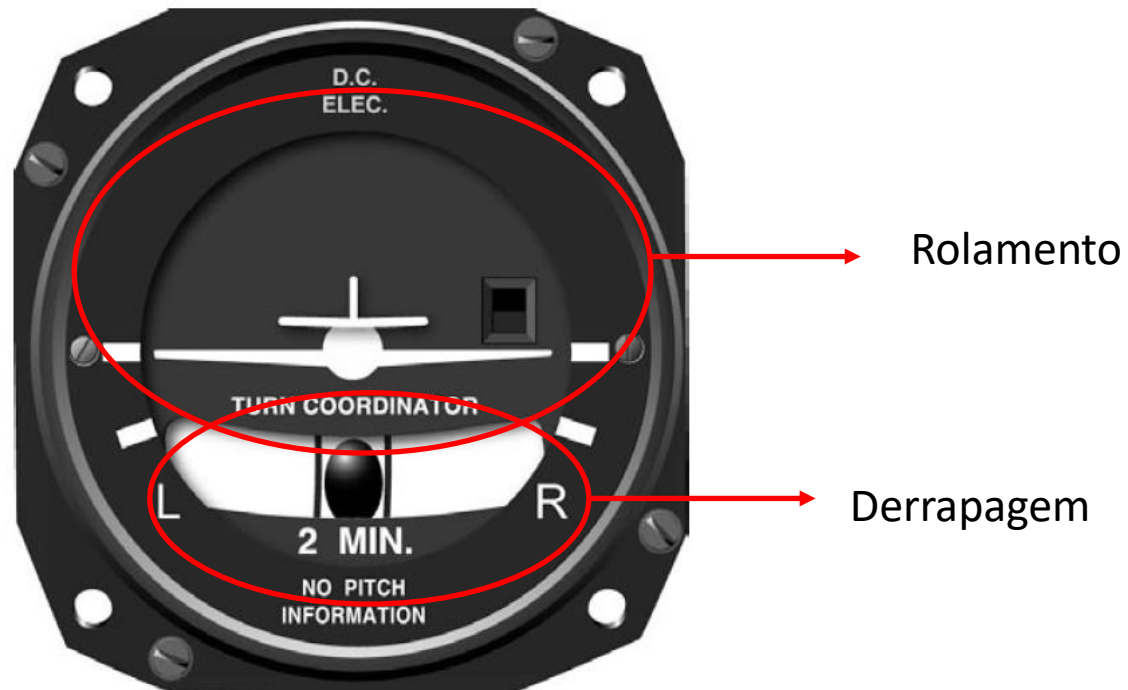
Tipo contrapeso



Tipo esfera

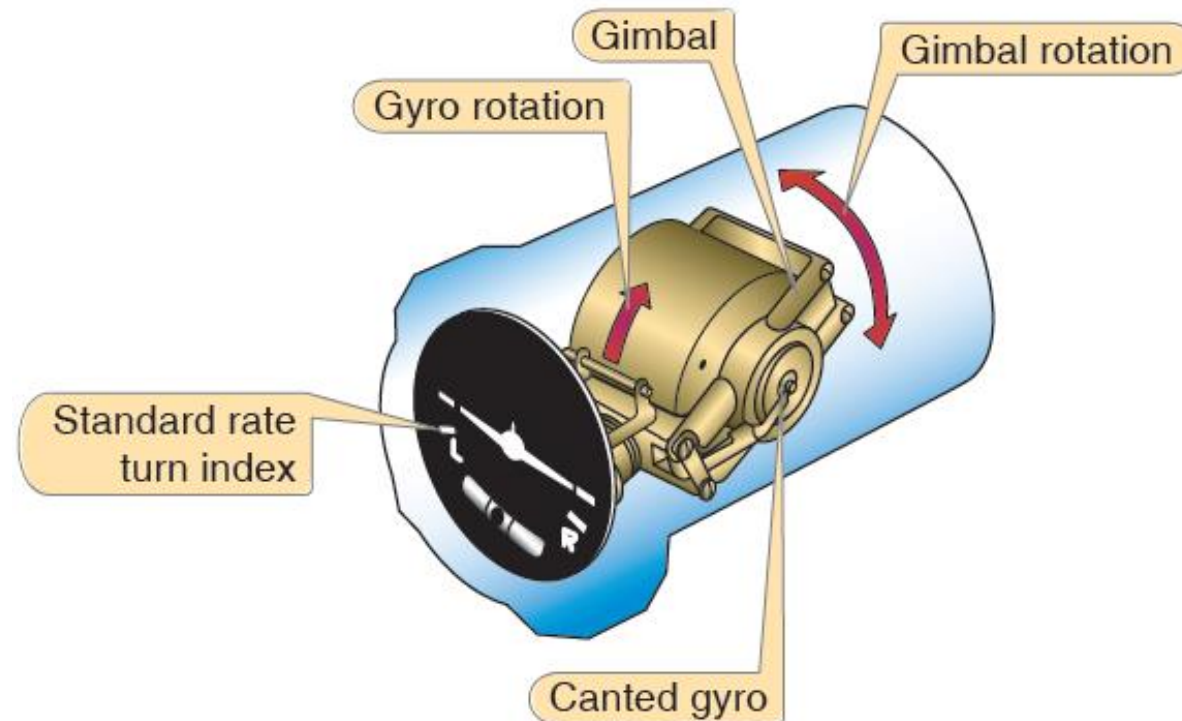
FONTE: Belo, E. M. (2004)

- Indicadores de Curva
- *Coordenador de Curva*
- Mesmo princípio do Indicador de Curva e Derrapagem



FONTE: FAA-H-8083-15B (2012)

- Indicadores de Curva
- *Coordenador de Curva*



FONTE: FAA-H-8083-15B (2012)

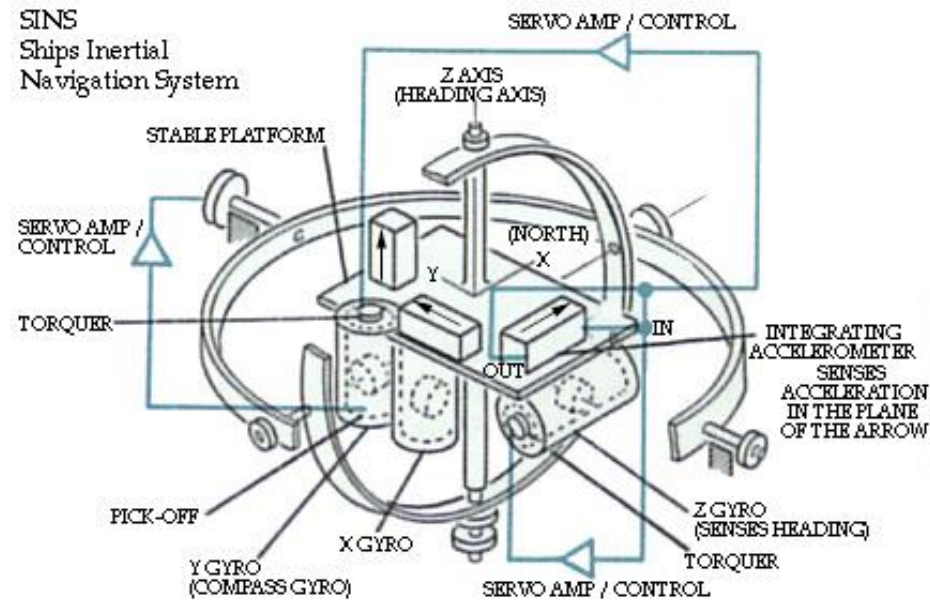
- **Indicadores de Curva**
- Em ambos os casos, a indicação “2 min” significa que, quando o ponteiro estiver na indicação apresentada, a aeronave levará 2 minutos para realizar uma curva de 360 graus.
- Existem também indicadores com “4 min”, com significado análogo



FONTE: FAA-H-8083-15B (2012)

- Introdução
- Componentes Inerciais
- Acionamento
- Instrumentos Inerciais
- **Instrumentos Inerciais Modernos**
- Indicadores Digitais
- Navegação Inercial

- Sistema Inercial
- Sistema que integra giroscópios e acelerômetros nas três direções do espaço



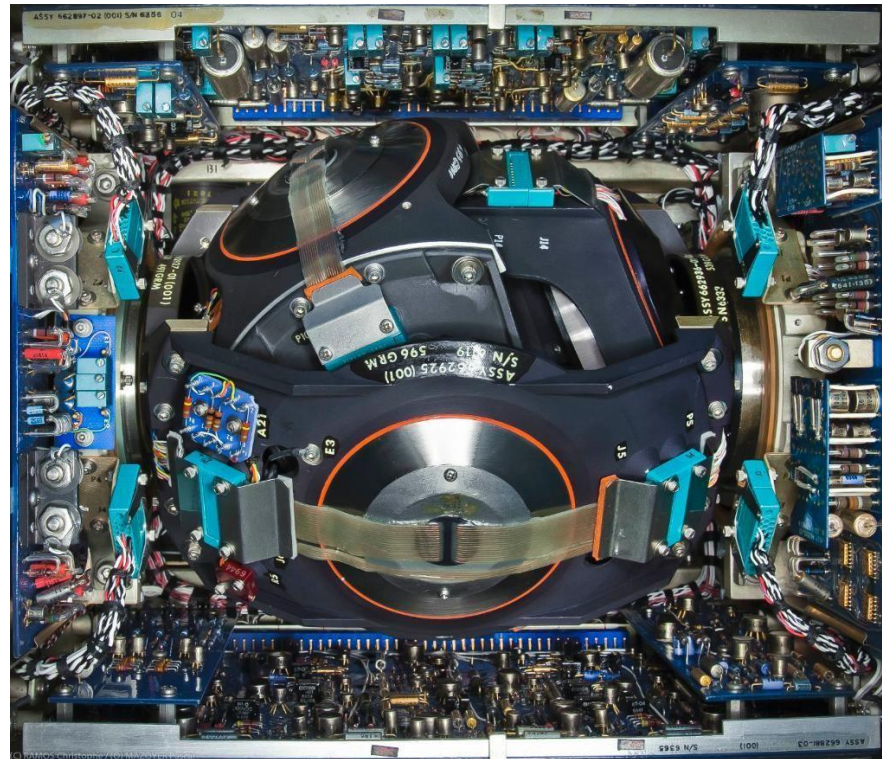
FONTE: tendertale.com

- Sistema Inercial
- Sistema que integra giroscópios e acelerômetros nas três direções do espaço



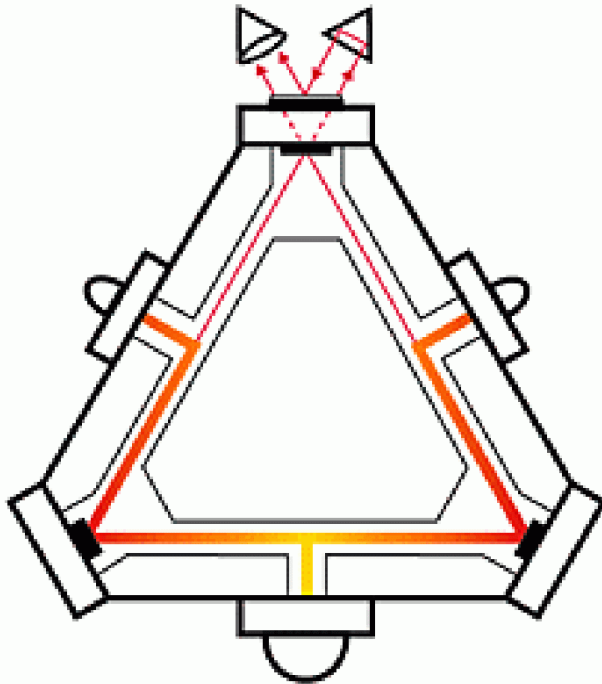
FONTE: aeronsystems.com

- Sistema Inercial
- Sistema que integra giroscópios e acelerômetros nas três direções do espaço

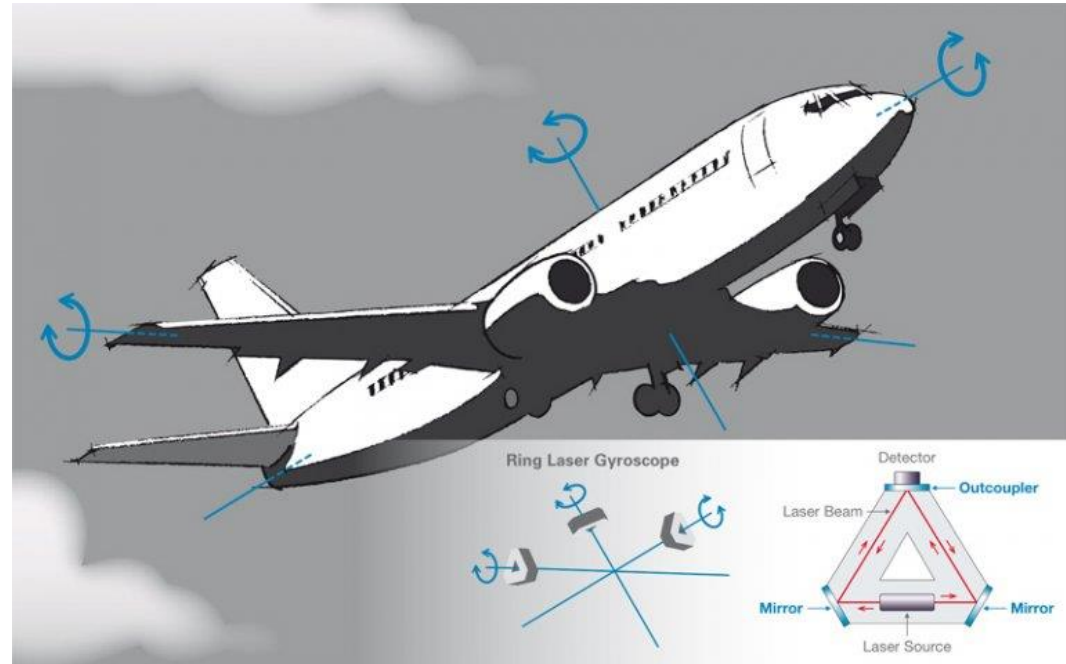


FONTE: rs-online.com

- Ring Laser Gyro
- Sistema a laser para medição de aceleração



FONTE: f-16.net

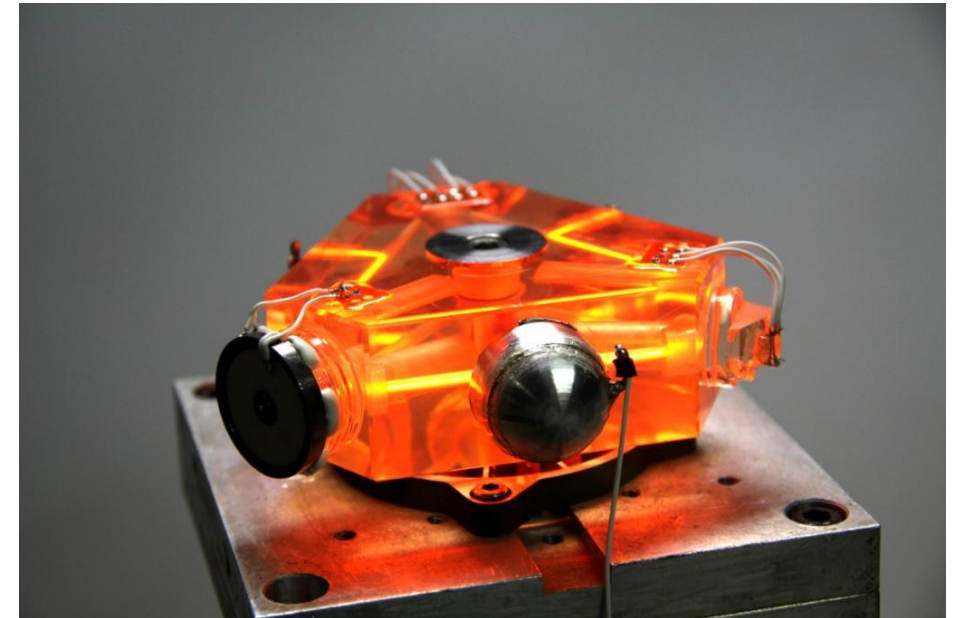


FONTE: opticsbalzers.com

- Ring Laser Gyro
- Sistema a laser para medição de aceleração



FONTE: Rabeendran, N., “A Study of Ring Laser Gyroscopes” (2008)



FONTE: prnewsprime.com

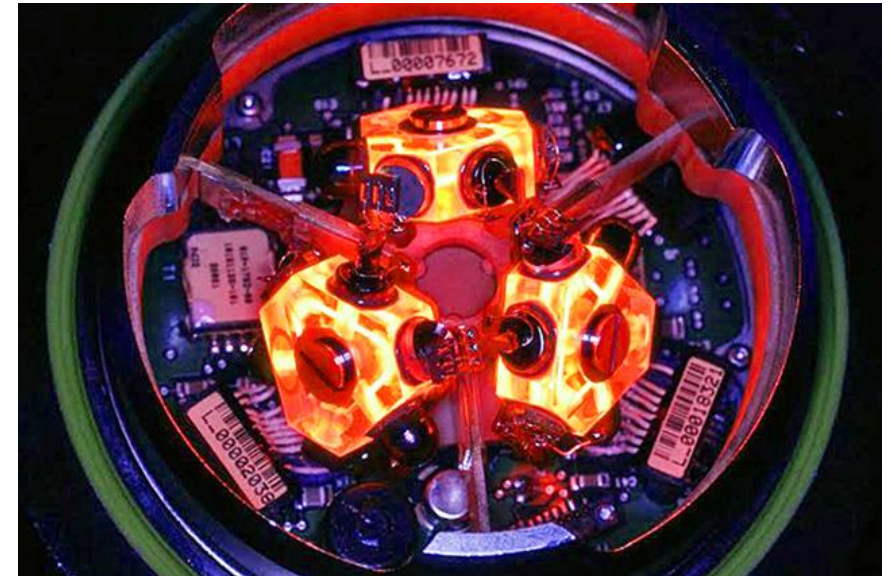
- Ring Laser Gyro
- Cada sistema desse substitui um giroscópio e uma plataforma com ao menos três sensores desse tipo podem formar um sistema inercial



FONTE: FAA-H-8083-15B (2012)



FONTE: imar-navigation.de



FONTE: foxtrotalpha.jalopnik.com

- Introdução
- Componentes Inerciais
- Acionamento
- Instrumentos Inerciais
- Instrumentos Inerciais Modernos
- **Indicadores Digitais**
- Navegação Inercial

Indicadores Digitais



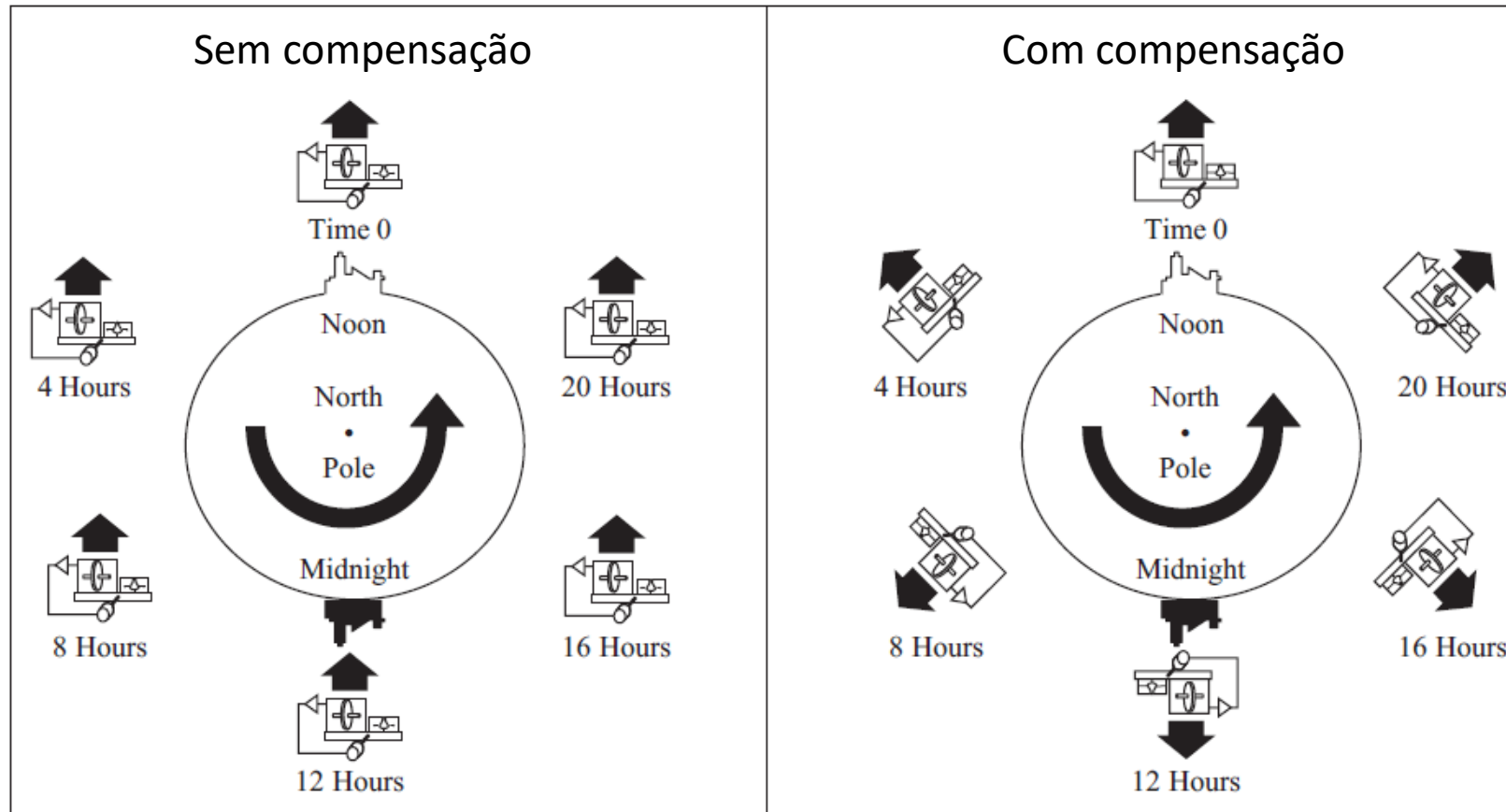
FONTE: Garmin

- Introdução
- Componentes Inerciais
- Acionamento
- Instrumentos Inerciais
- Instrumentos Inerciais Modernos
- Indicadores Digitais
- **Navegação Inercial**

- Os giroscópios possuem a (desejada) característica de sempre apontarem para o mesmo lado
- Porém, isso traz uma desvantagem pelo fato de a Terra estar em movimento de rotação e a aeronave estar sujeita a acelerações aleatórias
- Dessa forma, existem alguns tipos de compensação que uma plataforma giro-estabilizada devem prever, para que sua indicação seja sempre o mais precisa possível

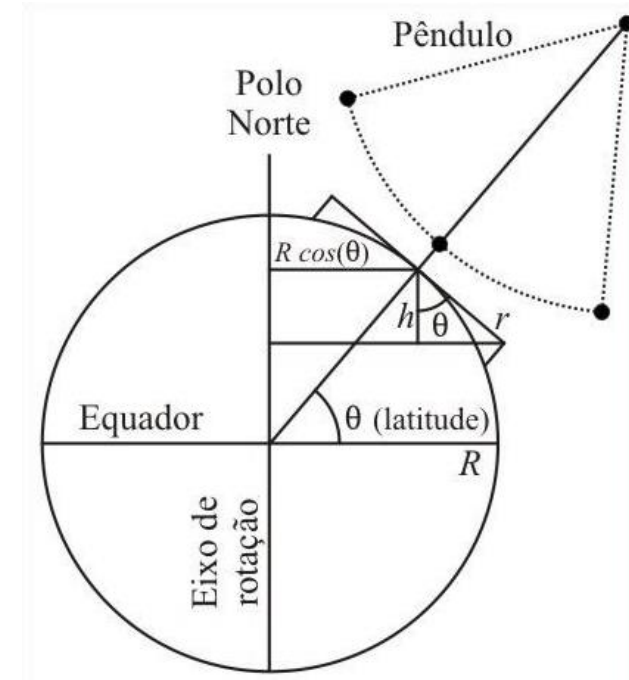
- **Rotação da Terra**
- O fato de a Terra estar sempre em movimento oeste-leste pode trazer um erro nas medições das plataformas
- Por isso, as plataformas giro-estabilizadas devem ser programadas para compensar esse movimento, girando $15,04^{\circ}/h$ no sentido leste-oeste
- Dessa forma, pode-se garantir que o sentido vertical da plataforma estará sempre apontando para o centro da Terra

- Rotação da Terra



FONTE: McShea, R. E. (2010)

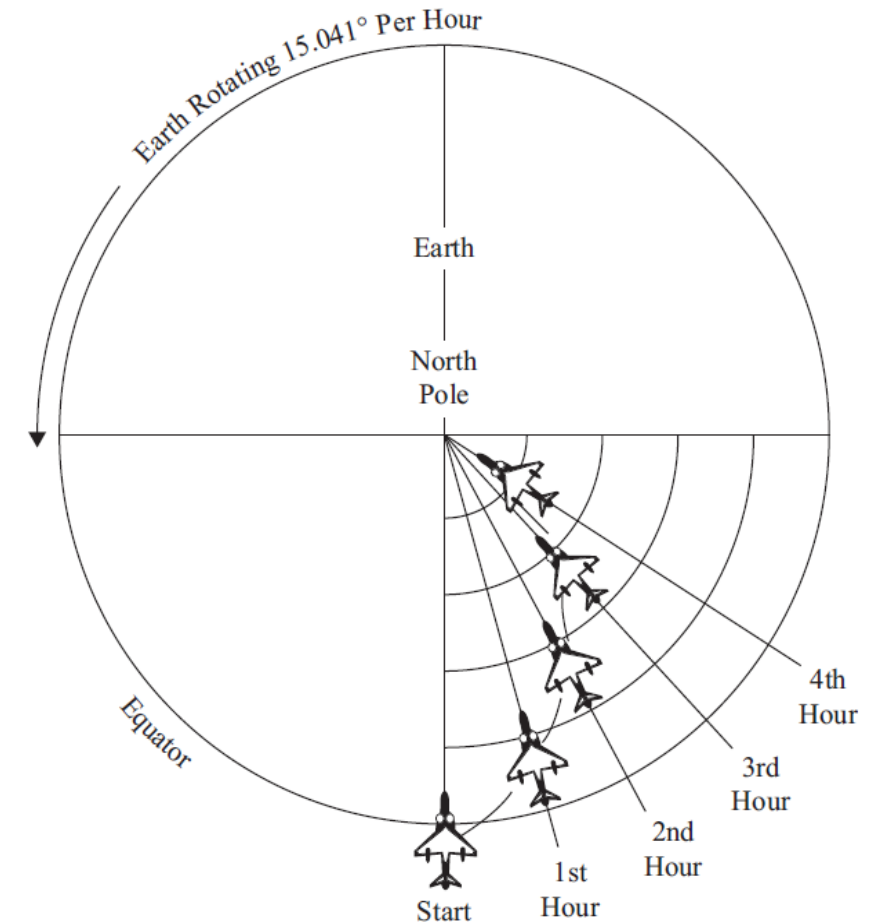
- Schuler Tuning
- O principal tipo de acelerômetro utilizado em plataformas giro-estabilizadas é o acelerômetro de pêndulo
- Sabe-se que um pêndulo é uma massa livre para rotacionar em torno de seu ponto de pivotamento
- O CG da massa e o ponto de pivotamento formam uma reta que coincide com a direção gravitacional



FONTE: obaricentrodamente.blogspot.com

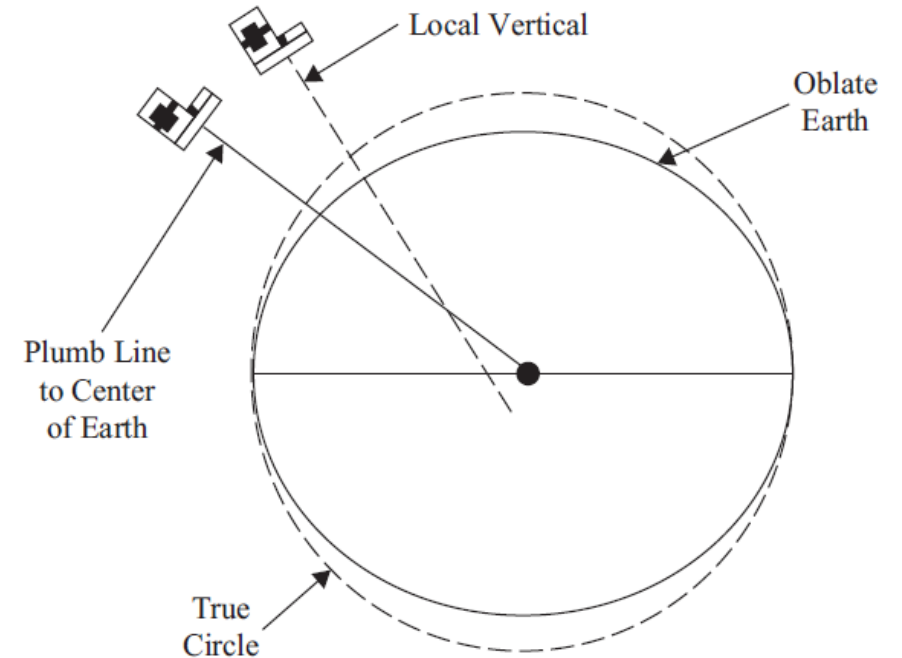
- **Schuler Tuning**
- Quando a aeronave está em condição de aceleração ou desaceleração, esse sistema é alterado
- O Schuler Tuning é a compensação deste efeito fazendo com que, mesmo durante uma aceleração ou desaceleração, o pêndulo do acelerômetro continue a oscilar em torno da direção vertical

- **Efeito Coriolis**
- Quando está em voo, uma aeronave se referencia a um ponto da Terra, que por sua vez está em rotação
- Dessa forma, surge uma força externa que desvia a rota de uma aeronave que esteja voando na direção norte, alterando sua trajetória



FONTE: McShea, R. E. (2010)

- **Achatamento dos Polos**
- Como a Terra é levemente achatada nos polos, em algumas regiões do globo, a direção gravitacional pode não coincidir com o vetor que aponta para o centro do planeta
- Este efeito também deve ser compensado para algumas regiões



FONTE: McShea, R. E. (2010)

- **Sobrevoos dos Polos**
- Considere que uma plataforma giro-estabilizada esteja sempre apontando para o norte
- Em uma rota que sobrevoe o polo norte, esta plataforma deveria, instantaneamente, fazer um giro de 180° , o que é fisicamente impossível e traria danos mecânicos ao sistema
- Para evitar este problema, ao se aproximar de um dos polos, a plataforma fica automaticamente desnivelada de um ângulo conhecido, que é compensado na indicação do sistema, até que a aeronave se afaste o suficiente do polo em questão