

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

GIOVANNI FRANCISCO WEISS

ESTUDO TEÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ESTABILIDADE
PARA A UTILIZAÇÃO DE UM TELESCÓPIO SOBRE UMA EMBARCAÇÃO.

Joinville

2018

GIOVANNI FRANCISCO WEISS

ESTUDO TEÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ESTABILIDADE
PARA A UTILIZAÇÃO DE UM TELESCÓPIO SOBRE UMA EMBARCAÇÃO.

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Naval do Centro
Tecnológico de Joinville da Universidade
Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Helton Gaspar da Silva.

Coorientador: Me. Luiz Eduardo Bueno
Minioli.

Joinville

2018

GIOVANNI FRANCISCO WEISS

ESTUDO TEÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ESTABILIDADE
PARA A UTILIZAÇÃO DE UM TELESCÓPIO SOBRE UMA EMBARCAÇÃO.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:

Dr. Helton Gaspar da Silva

Orientador

Presidente

Prof. Luiz Eduardo Bueno Minioli

Coorientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Thiago Pontin Tancredi

Membro

Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Diego Alexandre Duarte

Membro

Universidade Federal de Santa Catarina

Eu não creio que exista algo mais emocionante para o coração humano do que a emoção sentida pelo inventor quando ele vê alguma criação da mente se tornando algo de sucesso.

Nikola Tesla.

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais Jorge L. Weiss e Mirian E. N. Weiss e meus irmãos Vinicius M. Weiss e Michael L. Weiss, por tudo o que proporcionaram para eu estar onde estou hoje, pelo o amor e o apoio incondicional. Ao meu amor, Tainá Kramel, por toda sua ajuda, amor, apoio e suporte em todos os momentos.

Agradeço os professores Dr. Helton Gaspar da Silva e Me. Luiz Eduardo Bueno Minioli pelas orientações, dedicação, entusiasmo com o desenvolvimento deste trabalho de conclusão.

Ao professor Dr. Diogo Nardelli pela disponibilização do Laboratório de Computação Científica (LCC) para a execução da pesquisa. Agradeço o professor Dr. Diego Alexandre Duarte pelo auxílio no entendimento dos conceitos explorados neste trabalho. Também, não menos importante, ao professor Thiago Pontin Tancredi por ajudar com conceitos envolvidos do meio naval.

A todos os meus amigos e colegas que estiveram presentes no decorrer da caminhada da graduação, compartilhando dificuldades e conhecimentos.

Aos que compõem essa universidade, pela qual tive a honra de fazer parte como aluno e por sua estrutura oferecida. E aos professores que compartilharam seus conhecimentos durante essa jornada.

RESUMO

Um sistema capaz de compensar por movimentos de rotação oriundos de uma embarcação é proposto com o intuito de montar um telescópio sobre a mesma para observar fenômenos do tipo de ocultação. O sistema é composto por dois anéis montados por uma suspensão Cardan manipulada por servomotores, de forma que a plataforma sobre a qual o telescópio é montado seja capaz de ter rotações livres no sentido de *roll* e *pitch*. Considerou-se o navio como um gerador destas rotações, que atingem o telescópio, que foram estimadas por meio de cálculos propostos por uma norma regulamentadora e um navio modelo. O movimento de *yaw* do navio foi desconsiderado para a análise presente. Adicionalmente, um elemento giroscópico é instalado em conjunto ao telescópio de forma a dar mais resistência e capacidade de movimentação à estrutura. Um modelo físico é proposto, e equações do movimento são formuladas para este por meio de rotações de Euler, para que possam ser utilizadas para futuras simulações. Por fim, equações são definidas para as rotações do telescópio, e podem ser utilizadas para controlar a dinâmica do equipamento, ou qualquer objeto colocado sobre o mesmo.

Palavras-chave: Estabilizador giroscópico; Telescópio; Ocultação; Meio naval; Cargueiro.

ABSTRACT

A system capable of compensating for rotation movements that originate from a ship is proposed with the purpose of installing a telescope on top of it in order to observe phenomena such as occultations. The system is composed of two rings mounted by gimbals controlled with servomotors, in a way that the platform upon which the telescope is mounted on is capable of having free motion on its roll and pitch axis. The ship was considered a generator of these rotations that affect the telescope, and were estimated through the calculations proposed by a classification society with a model ship. The yaw movement was not considered for the analysis. Additionally, a gyroscopic element was installed together with the telescope, in order to give the structure more rotational resistance and finer response time. A physical model is proposed and movement equations are formulated for it through Euler rotations, such that they may be used for future simulations. Then the equations are defined for the rotation of the telescope, and may be used to control the dynamic movement of the equipment, or any other installed upon it.

Keywords: Gyroscopic stabilizer; Telescope; Occultation; Naval medium; Container ship.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Movimentos de um navio.....	15
Figura 2 – Diagrama do Movimento Giroscópico.....	16
Figura 3 – Diagrama Representativo da Variação de Momento Angular num Sistema.....	17
Figura 4 – Um giroscópio.....	18
Figura 5 – Diagrama de um estabilizador montado sobre uma embarcação.....	19
Figura 6 – A esfera celeste cortada por planos.....	21
Figura 7 – Fotografia do SOFIA sobrevoando as montanhas da Sierra Nevada (EUA).....	28
Figura 8 – Sistema de Estabilizador Giroscópico em 3 graus de liberdade.....	29
Figura 9 – Dirigível proposto por Bredenkamp (2007).....	29
Figura 10 – Sistema de Coordenadas para uma Plataforma de Estabilidade.....	30
Figura 11 – Ocultação de Chariklo, dada em 19/02/2012.....	33
Figura 12 – Estrela Canopus Observada da Posição Original.....	35
Figura 13 – Estrela Canopus observada de uma posição deslocada em 2 minutos de arco.....	35
Figura 14 – Estrela Canopus observada de um ponto deslocado em 9 minutos de arco.....	36
Figura 15 – Sobreposição de 3 observações de Canopus de diferentes localidades.....	36
Figura 16 – Sistema de Coordenadas proposto aos movimentos da embarcação.....	38
Figura 17 – Comparação gráfica entre sequências de aplicação de movimentos de rotação para ângulos pequenos.....	41
Figura 18 – Comparação gráfica entre sequências de aplicação de movimentos de rotação para ângulos grandes.....	41
Figura 19 – Comparação gráfica entre sequências de aplicação de movimentos de rotação para ângulos variando com o tempo.....	42
Figura 20 – Ilustração da diferença entre sequências de rotações.....	43
Figura 21 – Ilustração de Sistema Proposto com Plataformas Retangulares.....	45
Figura 22 – Ilustração de Sistema Proposto com Plataformas Circulares.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DLR – *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V*

DNV GL – *Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd*

DSLR – *Digital Single-Lens Reflex*

NASA – *North American Space Agency*

N – Norte Geográfico

SI – Sistema Internacional

SOFIA – *Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivos Específicos.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO	15
2.2	MOVIMENTO GIROSCÓPICO	16
2.2.1	Estabilizador Giroscópico	18
2.3	ESFERA CELESTE.....	19
2.3.1	Sistema de Coordenadas Celestes	20
2.4	OBSERVAÇÕES ASTRONOMICAS.....	22
2.4.1	Ocultações Estrelares	22
2.5	ESPECTRO DE MAR.....	23
2.5.1	Espectro de mar padronizado.....	23
2.5.2	Espectro de Pierson-Moskowitz.....	24
2.5.3	Espectro Padronizado de Jonswap	24
2.6	CÁLCULO DE MOVIMENTOS DA EMBARCAÇÃO.....	25
2.7	MILHA NÁUTICA.....	26
2.8	SISTEMAS DE ESTABILIDADE EXISTENTES	27
2.8.1	SOFIA.....	27
2.8.2	Sistema de Estabilidade para uma Câmera Fotográfica montada sobre um dirigível.....	28
3	METODOLOGIA	31
4	DADOS DE ENTRADA.....	32
4.1	ASPECTOS DA FOTOGRAFIA.....	32

4.1.1	Fenômenos Observáveis.....	32
4.1.2	Efeitos de deslocamento sobre o telescópio.....	34
4.1.3	Efeitos de rotações sobre o telescópio	37
4.2	A EMBARCAÇÃO MODELO E SEUS MOVIMENTOS.....	37
4.2.1	Deslocamentos da embarcação	38
4.2.2	Distância percorrida pela embarcação	38
4.2.3	Rotações da Embarcação	39
4.2.4	Ordem de Rotações	40
4.3	MASSA E DIMENSÕES DO TELESCÓPIO.....	43
4.4	SISTEMA DE ESTABILIDADE	44
4.4.1	Modelo Físico.....	44
4.4.2	Condições de Estabilidade	46
5	ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS	47
5.1	CONVENÇÕES ADOTADAS.....	47
5.2	EQUAÇÕES DO MOVIMENTO.....	48
5.2.1	Torques Envolvidos no Sistema.....	50
5.2.2	Condições de Contorno	51
5.2.3	Resultados.....	51
6	CONCLUSÃO	53

1 INTRODUÇÃO

Existem fenômenos astronômicos cuja observação raramente é feita por um único observador, ao invés disso, forma-se o que se chamam campanhas observacionais, onde um grupo de astrônomos observam o céu noturno no decorrer de determinado período de tempo e, posteriormente, reúnem as informações coletadas para verificar as coerências entre as mesmas.

A observação de um mesmo fenômeno de diferentes localidades propicia vantagens tais como determinação da geometria do objeto por paralaxe e garantia de observação do evento em casos de condições climáticas desfavoráveis. Como a superfície da Terra é encoberta em mais de 70% de sua área por água, a existência de uma embarcação que possa se deslocar até locais onde é possível coletar essas informações se torna uma ideia válida, pois dados poderiam ser obtidos de qualquer posição global onde houvesse água.

Telescópios, por sua vez, necessitam estar bem estabilizados para que imagens coerentes possam ser capturadas pelos mesmos. Uma embarcação, porém, estará em constante movimento por consequência dos movimentos de ondas.

Neste trabalho propõe-se realizar um estudo teórico a respeito de um sistema capaz de realizar observações destes fenômenos em locais remotos por meio do deslocamento de um telescópio montado em uma embarcação, onde esse sistema será capaz de estabilizar os movimentos do telescópio utilizado para esses estudos. Uma pesquisa bibliográfica será feita a respeito de sistemas de estabilidade já existentes e aplicados a diversas áreas, para entender como esses funcionam e quais as suas limitações, como esse telescópio operará no meio do oceano, qual sistema de coordenadas ele utilizará e qual será a sua reação esperada dados os típicos comportamentos de mar.

Ao final, um modelo matemático será proposto e uma simulação será realizada em um software comercial para testar o sistema de estabilidade para um telescópio em uma embarcação em alto mar.

1.1 OBJETIVOS

Com o propósito de realizar um estudo teórico sobre um sistema para observações astronômicas a partir do meio naval, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo sobre a dinâmica de um sistema de estabilidade capaz de compensar pelos movimentos oriundos de uma embarcação de forma a manter uma plataforma estável a fim de realizar observações astronômicas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Propor um modelo de sistema de estabilidade capaz de compensar pelas movimentações de uma embarcação;
- Desenvolver um modelo dinâmico para o sistema proposto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

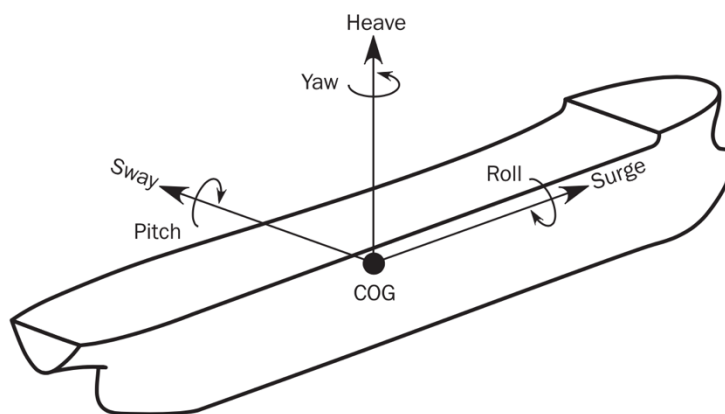
Para a formulação do sistema proposto, alguns conceitos e tecnologias já existentes serão empregados. Esses mesmos serão descritos em detalhe nesse capítulo.

2.1 MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO

Uma embarcação, quando colocada na água e exposta aos fenômenos de ondas, vento, vibrações entre demais influências incluindo seu próprio deslocamento, sofre uma série de movimentos que quase nunca a permitem estar verdadeiramente parada.

Esses movimentos podem ser de deslocamento e rotação em 3 direções, e são bem caracterizadas na literatura. A DNV GL (2018) descreve a típica notação utilizada para descrever esses movimentos, e pode-se ver uma imagem ilustrando estes comportamentos sobrepostos a um modelo na Figura 1.

Figura 1 – Movimentos de um navio.



Fonte: DNV GL (2018).

Onde *surge* é o deslocamento da embarcação no seu sentido longitudinal, sendo positivo no sentido de avanço, *sway* é o deslocamento no sentido lateral, tendo valor positivo no sentido bombordo da embarcação, e *heave* é o deslocamento no seu sentido vertical, sendo positivo em direção ao céu.

Roll é a rotação da embarcação no seu sentido longitudinal, sendo positivo quando a embarcação inclina-se no sentido bombordo a boreste, *pitch* é a rotação da embarcação no seu

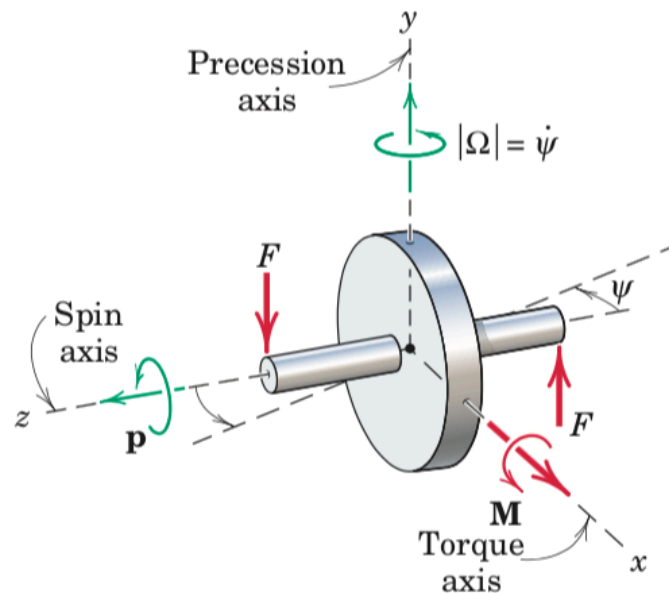
sentido lateral, sendo positivo quando à vante da embarcação entra na água, e *yaw* é a rotação da embarcação em torno de seu eixo vertical, sendo positivo quando a embarcação rotacional a esquerda. As rotações ocorrem em torno do centro da área de flutuação do navio.

2.2 MOVIMENTO GIROSCÓPICO

O movimento giroscópico é um fenômeno que ocorre em objetos simétricos em rotação sujeitos a um torque perpendicular ao eixo de rotação, e Meriam e Kraige (2012, p.558) o conceitua minuciosamente. Suponha um objeto como o da Figura 2, onde o mesmo está sobre rotação relativamente alta e constante no eixo *z* (*spin axis*). Aplicando-se um binário de forças sobre o eixo *y*, forma-se um torque *M* na direção do eixo *x* (*torque axis*).

Complementarmente, um segundo momento angular é gerado na direção do eixo *y* (*precession axis*), conhecido como precessão, resultante da variação de um momento angular já existente na estrutura. Como resultado dessa combinação de forças, o corpo parece, de um ponto de vista, resistir à movimentos senão a rotação inicial.

Figura 2 – Diagrama do Movimento Giroscópico.



Fonte: Meriam e Kraige (2012, p.558).

O cálculo da velocidade angular de precessão é dado indiretamente pela Equação (1):

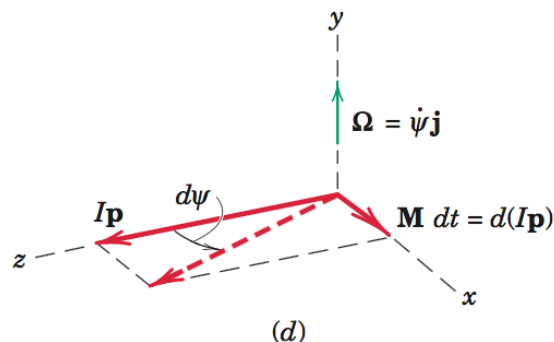
$$\mathbf{M} = I \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{p} \quad (1)$$

Onde \mathbf{M} refere-se ao torque resultante da força aplicada sobre o eixo de rotação, I diz respeito ao momento de inércia do corpo em torno do seu eixo de rotação principal, $\boldsymbol{\Omega}$ é a velocidade angular de precessão e \mathbf{p} é a velocidade angular de rotação do eixo, onde \mathbf{M} , $\boldsymbol{\Omega}$ e \mathbf{p} são vetores.

Esse fenômeno ocorre devido à conservação do momento angular conforme a segunda lei de Newton. Quando um corpo sujeito a uma quantidade de momento angular inicial é sujeito à aplicação de um torque perpendicular a este, uma velocidade de precessão passa a afetar o sistema como decorrência da variação da direção do momento angular do sistema.

Meriam e Kraige (2012, p.559) apresentam o diagrama ilustrado na Figura 3 para representar a interação de uma variação de momento angular decorrente de um torque \mathbf{M} aplicado sobre um elemento de quantidade de momento angular inicial $I\mathbf{p}$, onde há uma mudança na direção do momento angular inicial dada por um ângulo $d\psi$. Essa variação representa a velocidade angular de precessão $\boldsymbol{\Omega}$.

Figura 3 – Diagrama Representativo da Variação de Momento Angular num Sistema



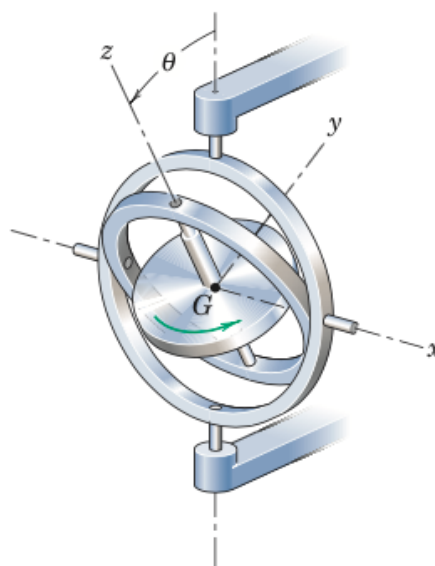
Fonte: Meriam e Kraige (2012, p.559).

Desse conceito, surge o equipamento propriamente conhecido como giroscópio. Beer, Johnston e Clausen (2006, p.762) determinam que:

Um giroscópio consiste essencialmente de um rotor que pode girar livremente em torno de seu eixo geométrico. Quando montado em um quadro de suspensão Cardan, o giroscópio pode assumir qualquer orientação, mas seu centro de massa precisa permanecer fixo no espaço.

A Figura 4 ilustra a questão de um rotor montado em uma suspensão Cardan.

Figura 4 – Um giroscópio.



Fonte: Meriam e Kraige (2012).

Meriam e Kraige (2012, p.558) expõem mais utilidades para o movimento giroscópico, em particular que o mesmo pode ser utilizado no meio naval para enular efeitos de *roll* no mar.

O estabilizador giroscópico é um equipamento descrito que auxilia na estabilidade de uma embarcação, por meio desse princípio de funcionamento.

2.2.1 Estabilizador Giroscópico

A *Marine Motion Control LLC* (2007, p.1) descreve a utilização de estabilizadores giroscópicos para suavizar os movimentos de *roll* em uma embarcação. Esse aparato é composto por um rotor de massa considerável, aproximadamente 1% do deslocamento de uma embarcação, e conseqüente momento de inércia, montado a uma suspensão Cardan. A suspensão é montada sobre um eixo perpendicular à rotação do rotor, e sua orientação pode ser manipulada por um servomotor.

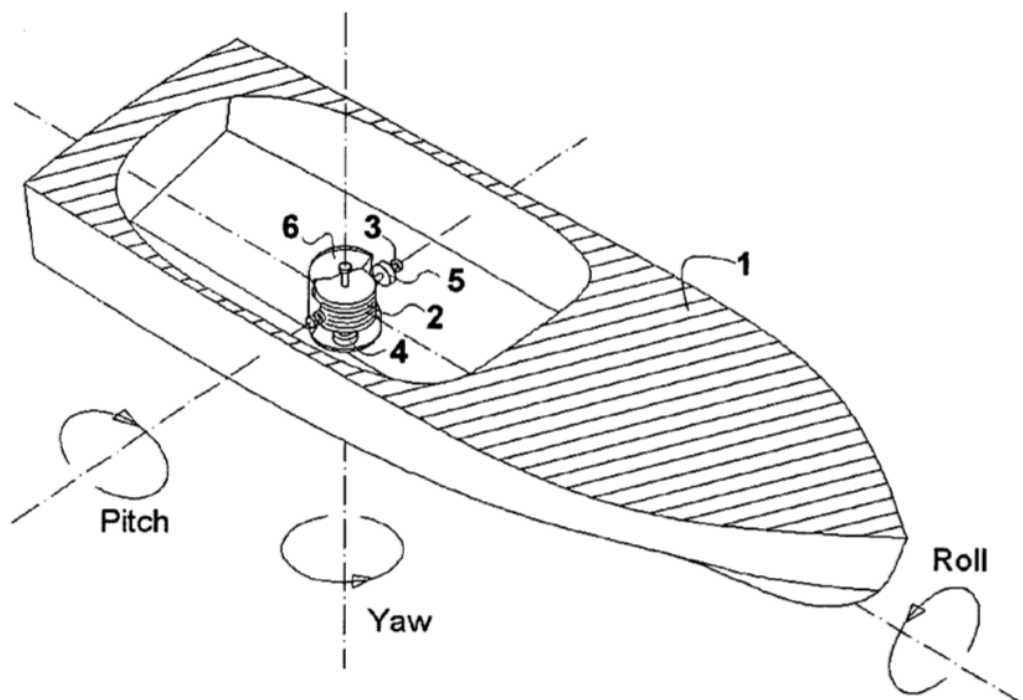
De acordo com a Equação (1), percebe-se que quanto maior o torque aplicado sobre o rotor, maior será a velocidade de precessão dada uma rotação fixa neste mesmo. Cabe ao servomotor essa função de aplicar o torque. O estabilizador realiza uma precessão como consequência no sentido perpendicular ao eixo do servomotor e do eixo de rotação. Porém, como o rotor não tem liberdade de rotação no eixo onde ocorreria a precessão, o aparato tem uma reação rotacionando toda a estrutura na qual estiver montada, isto é, na embarcação como um todo.

A Figura 5 ilustra o estabilizador proposto pela *Marine Motion Control LLC* colocado dentro de uma embarcação, onde cada ponto representa os objetos a seguir:

1. Embarcação;
2. Volante do motor;
3. Rolamento da suspensão Cardan;
4. Motor do rotor;
5. Servomotor;
6. Carcaça do estabilizador.

A figura 5 apresenta os elementos descritos acima.

Figura 5 – Diagrama de um estabilizador montado sobre uma embarcação.



Fonte: *Marine Motion Control LLC* (2012).

2.3 ESFERA CELESTE

Para fins de caracterizar e facilitar a coerência de dados quando se observa os astros, é interessante utilizar-se o conceito de esfera celeste. Lima Neto (2018, p.1) define a esfera celeste como sendo uma simplificação do céu noturno que pode ser observado a partir da Terra.

Sabe-se que todos os objetos no espaço se movem tridimensionalmente, e que, ao observar-se um corpo neste, este move-se livremente irrestrito.

Porém, com o intuito de simplificar esses dados e considerando que as distâncias envolvidas nesse processo de observação são muito grandes, é seguro aproximar-se o espaço que envolve a Terra e os seus corpos em movimento como sendo projeções sobre uma esfera de raio infinito, centralizada no ponto de observação ou de referência.

Uma vez estabelecida a esfera celeste, torna-se necessário determinar um sistema de coordenadas que permita localizar-se dentro desta. Lima Neto (2018, p.2) ressalta a importância da determinação deste:

Para que possamos comunicar nossas observações a outros observadores, é preciso haver um sistema de referências onde as coordenadas dos astros sejam definidas, análogo ao sistema de latitudes e longitudes que utilizamos para localizar um dado lugar no globo terrestre. Além do sistema de referência, dado o caráter dinâmico dos objetos celestes, também é necessária a definição de escalas de medida de tempo. Em outras palavras não somente precisamos das coordenadas de um astro, mas também do momento em que a observação foi (ou será) feita.

Dito isso, define-se a seguir o que são esses sistemas de coordenadas celestes.

2.3.1 Sistema de Coordenadas Celestes

Sistemas de coordenadas celestes são tipos de sistemas de referência utilizados por astrônomos para haver mais coerência na localização de objetos sobre a esfera celeste. Existem alguns destes sistemas, usualmente relacionados à localização e rotação de algum objeto de forma a facilitar também a observação de fenômenos.

Lima Neto (2018, p.10) explica que os sistemas de coordenadas celestes,

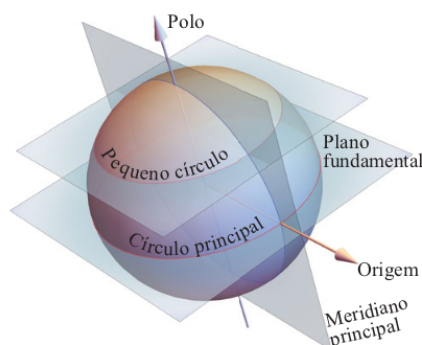
“[...] são definidos por um plano principal que divide a esfera em duas partes iguais definindo-se assim um grande círculo [...]. Definimos arbitrariamente um ponto de origem neste círculo principal, por onde passa o meridiano principal, outro grande círculo perpendicular ao grande círculo precedente.”

A Figura 4 ilustra tal fato, onde:

Os (pequenos) círculos paralelos ao círculo principal definem as latitudes da esfera enquanto os grandes círculos perpendiculares ao círculo principal definem as longitudes. Estes ângulos são similares ao que utilizamos para localizar um ponto na superfície terrestre, a longitude e a latitude. (LIMA NETO, 2018, p.11).

A Figura 6 ilustra os planos na esfera celeste cortada pelos planos descritos de forma a descrever coordenadas sobre a esfera.

Figura 6 – A esfera celeste cortada por planos.



Fonte: Lima Neto (2018, p.11).

Os movimentos dos astros na esfera celeste normalmente seguem algum padrão. Os astros observáveis da superfície da Terra podem seguir movimentos nos mais diversos planos imagináveis dependendo de suas trajetórias. Porém, como esses planos são definidos normalmente pelo astro que um corpo orbita, a seleção de um sistema de coordenadas que se aproxima ao movimento deste pode tornar a orientação na esfera celeste um processo muito mais simples.

Kuga, Carrara e Rao (2012, p.45), definem que:

"O sistema é definido de acordo com o centro de coordenadas ou a origem da referência escolhida: topocêntrico, se o centro estiverem na superfície terrestre; geocêntrico, se o centro coincidir com o centro da Terra; heliocêntrico, se o centro de coordenadas coincidir com a posição do Sol [...]".

Como exemplo, faz sentido escolher-se o sistema heliocêntrico quando pretende-se observar os movimentos dos planetas e asteroides do sistema solar.

Lima Neto (2018) e Kuga, Carrara e Rao (2012) definem sistemas de coordenadas considerados essenciais ao trabalho presente:

- Sistema Horizontal: onde o plano fundamental da esfera é formado pelo horizonte local do observador;
- Sistema Topocêntrico/Equatorial: onde o plano fundamental é formado pelo plano do Equador da Terra;
- Sistema Eclíptico: onde o plano fundamental é formado pelo plano da órbita da Terra com o Sol.

2.4 OBSERVAÇÕES ASTRONOMICAS

Uma observação astronômica é o ato de coletar-se informações a respeito de astros ou fenômenos ocorrentes na esfera celeste. Usualmente são realizadas com telescópios, sensores ou equipamentos ópticos e podem coletar informações tanto no espectro de luz visível quanto em outras faixas de frequências, como infravermelho e ultravioleta.

Como uma regra geral, quanto maior o tempo de exposição de uma observação, mais informação consegue-se coletar, entretanto nem todas as observações se dão por longos períodos de tempo. A ocultação estelar é um exemplo de fenômeno de rápida duração.

2.4.1 Ocultações Estelares

De acordo com o *MIT Planetary Astronomy Lab* (2011), ocultações estelares ocorrem quando a luz de uma estrela ou objeto brilhante é bloqueada para um observador por um outro corpo no espaço. Devido a essa natureza, muitos desses fenômenos são visíveis da Terra, e ocorrem particularmente em grande quantidade a cada 6 anos, quando os asteroides troianos de Júpiter se alinham com as luas de Galileu sobre a perspectiva da Terra. Entretanto, a faixa de visibilidade desse tipo de evento é relativamente baixa.

Esses fenômenos são interessantes de se observar, particularmente a respeito dos objetos mencionados pois,

Observações fotométricas de ocultações mútuas e eclipses de satélites naturais de planetas oferecem uma nova fonte de dados astronômicos. Esses dados podem ser utilizados para melhorar os modelos dinâmicos de movimento de planetas e satélites e seus posicionamentos no espaço. (EMELYANOV, 2009, p.1037, tradução do autor).

Também permitem chegar-se a uma conclusão concisa do formato de um objeto.

Observações fotométricas de ocultações também garantem uma precisão muito elevada para a observação de objetos no espaço. Dias-oliveira et al. (2013, p.225) afirmam ter chegado a observações com uma média 3,10 mas (miliarcosegundos) de erro, comparados com os típicos 134 a 170 mas para métodos tradicionais. Isso é relevante para esse tipo de observação pois permite a derivação de informações muito mais precisa, em particular para corpos pequenos.

A fotometria de ocultações é feita utilizando-se um telescópio ótico tipo DSLR captando luz no espectro visível.

2.5 ESPECTRO DE MAR

Stewart (2008, p.278) descreve o espectro de mar como sendo uma simplificação dos comportamentos do mar para compreendermos como ocorre a interação de ondas de diversas frequências neste meio. Este conceito permite descrever a distribuição de energia em diversas frequências para um dado mar, e, assim, facilita as questões de caracterizar e lidar com o mesmo matematicamente.

Para construir um espectro de mar experimental, seria necessário coletar um registro de mar sobre um determinado período, com precisão temporal aceitável para registrar até os menores períodos de onda desejados e utilizar o conceito.

O procedimento padrão, de acordo com Stewart (2008, p.282) envolveria processar estas informações por meio de uma série de Fourier, utilizando a equação (2):

$$Z_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \zeta(t) \exp(-i2\pi nft) dt, \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

Em que $\zeta(t)$ é a elevação temporal do mar dada em metros, $f = 2\pi/T$ é a frequência fundamental do sistema dada em Hz, t é o registro temporal da observação dado em segundos e Z_n é dito ser a transformada de Fourier da elevação temporal do mar.

Posteriormente, o espectro de mar é construído conforme a equação (3).

$$S(nf) = Z_n * Z_n^* \quad (3)$$

Em que Z_n^* corresponde ao complexo conjugado de Z_n , e S é o espectro de mar dado em m^2/Hz .

2.5.1 Espectro de mar padronizado

A partir de diversas observações do comportamento do mar em função de variáveis como vento, tempo e espaço, alguns cientistas, como Pierson e Moskowitz em 1964 e Hasselmann et al. em 1973 foram capazes de determinar espectros de mares idealizados, a partir

dos quais se torna possível estipular um espectro de mar sem necessariamente observar um mar em questão.

2.5.2 Espectro de Pierson-Moskowitz

Stewart (2008, p.285) descreve que o espectro de Pierson-Moskowitz como sendo o espectro de mar idealizado mais simples que existe. Simplesmente dito, o espectro assume que o mar está totalmente desenvolvido a todo instante de tempo, ou seja,

“[...] um vento soprou sobre uma região muito grande de forma constante sobre um longo período de tempo. Aqui, um longo período de tempo corresponde a mais de 10000 períodos de onda e uma grande região corresponde a 5000 ondas de um lado a outro.” (STEWART, 2008, p.285, tradução do autor).

Este espectro é inerentemente pouco amplo devido a essas características, e depende apenas da variável da velocidade do vento. A equação que descreve este espectro está descrita na equação (4).

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-\beta \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^4 \right] \quad (4)$$

Em que S é o espectro de mar, dado em m^2/Hz , em função de ω , que é a frequência de onda dada em Hz. α é uma constante adimensional e vale $8,1 \times 10^{-3}$, β também é uma constante adimensional e vale 0,74, $\omega_0 = g/U_{19,5}$, onde $U_{19,5}$ diz respeito à velocidade do vento a 19,5m acima do nível do mar em m/s e g é a aceleração gravitacional que vale $9,81m/s^2$

2.5.3 Espectro Padronizado de Jonswap

Hasselmann et al. (1973, apud STEWART, 2008, p. 287) chegou à conclusão, a partir de suas observações do projeto JONSWAP, que nunca um espectro de mar estará plenamente desenvolvido, devido a interações entre ondas sobre longos períodos de tempos sobre áreas vastas. Como tal, ele propôs o equacionamento descrito na equação (5) para representar o espectro de mar.

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right] \gamma^r \quad (5)$$

Em que S é o espectro de mar em função de ω , que é a frequência de onda dada em Hz, dado em m^2/Hz . F é a distância sobre a qual o vento atua de forma constante, chamada também de *fetch*, dada em metros. As demais variáveis são constantes dadas por:

- $\alpha = 0,076 \left(\frac{U_{10}^2}{Fg} \right)^{0,22}$;
- $\omega_p = 22 \left(\frac{g^2}{U_{10}F} \right)^{1/3}$;
- $\gamma = 3,3$;
- $\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{caso } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{caso } \omega > \omega_p \end{cases}$.

O espectro de Jonswap pode ser considerado mais sofisticado que o de Pierson-Moskowitz pois leva em efeito os efeitos de distância.

2.6 CÁLCULO DE MOVIMENTOS DA EMBARCAÇÃO

Existem métodos capazes de estimar os movimentos de uma embarcação resultantes da sua interação com o mar e outros efeitos, um destes é o método proposto pela norma regulamentadora para embarcações proposta pela DNV GL (2018, p.28 e 29). O método proposto pela mesma utiliza as equações (6), (7), (8) e (9) para a determinação de período de *roll*, magnitude de *roll*, período de *pitch* e magnitude de *pitch*, respectivamente.

$$T_{\theta} = \frac{2,3\pi k_r}{\sqrt{gGM}} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{9000(1,4-0,035T_{\theta}) f_p f_{BK}}{(1,15B+55) \pi} \quad (7)$$

$$T_{\varphi} = \sqrt{\frac{2\pi \lambda_{\varphi}}{g}} \quad (8)$$

$$\varphi = 920 f_p L^{-0,84} \left\{ 1,0 + \left(\frac{2,57}{\sqrt{gL}} \right)^{1,2} \right\} \quad (9)$$

Essas informações dizem respeito ao movimento na frequência natural da embarcação perante uma aplicação de cargas dinâmicas oriundas de ondas de amplitude unitária e frequência igual à natural do navio sobre o mesmo.

Por conveniência, os trechos da norma referentes aos valores destas equações e como utiliza-las estão inclusas nos Anexos B, C e D.

Lewis (1989, p.107) explora o procedimento de determinação de equações que descrevam os movimentos de uma embarcação. As conclusões dele são iguais às da norma, implicando que as mesmas surgem por meio de cálculos para encontrar o pico da função RAO que descreve o movimento da embarcação no sentido em questão, efetivamente calculando a frequência natural da mesma.

Balachandran e Magrab (2011, p.158) demonstram a relação entre uma frequência de excitação e a amplitude de resposta de um sistema qualquer. Como o sistema da embarcação pode ser aproximado a um de tipo massa mola superamortecido, onde a massa pode pesar até centenas de milhares de toneladas, é seguro delimitar a amplitude do movimento resultante a um valor específico pois a excitação não tem energia suficiente ao ponto de causar a divergência da amplitude das rotações dada a excitação de uma única frequência de onda.

2.7 MILHA NÁUTICA

A milha náutica trata-se de uma unidade de comprimento usualmente utilizada para o meio naval e equivale a 1852m.

De acordo com a definição do SI:

De acordo com a definição das unidades do Sistema Internacional A milha náutica é uma unidade especial empregada para navegação marinha e aérea para expressar distância. O valor convencional dado aqui (1852m) foi adotado pela Primeira Conferência Internacional Hidrográfica Extraordinária, Monaco, 1929, sobre o nome de “Milha Náutica Internacional”. [...] A unidade foi originalmente escolhida, e continua a ser utilizada, pois uma milha náutica sobre a superfície da Terra corresponde a aproximadamente um minuto de arco de ângulo no centro da Terra, o que é conveniente quando latitude e longitude são medidas em graus e minutos de ângulo. (BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES, 2006)

A unidade derivada de milha náutica, de acordo com *Bureau International Des Poids Et Mesures* (2006), utilizada para velocidade e extremamente usual para o meio naval, é o nó,

que equivale a uma milha náutica por hora. Ou, em outras palavras, um minuto de arco por hora.

2.8 SISTEMAS DE ESTABILIDADE EXISTENTES

É interessante para o estudo presente pesquisar sobre sistemas com funcionamento semelhante já existentes para compreender os mecanismos e particularidades envolvidos nos mesmos e confirmar que é possível. Foram separados alguns destes que serão descritos nessa seção.

2.8.1 SOFIA

O SOFIA (*Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy*), de acordo com Gehrz et al. (2014, p.2, tradução do autor) é um projeto conjunto entre a NASA e a DLR, com o intuito de realizar observações astronômicas na faixa de frequências do infravermelho. O projeto consiste num telescópio de 2,5m montado sobre uma aeronave Boeing 747SP, completo com um sistema de estabilidade giro estabilizado, além de outros sistemas que auxiliam na aplicação do mesmo, que serve para atenuar as movimentações da aeronave que o atingem.

De acordo com Gehrz et al. (2014, p.4 e 5, tradução do autor), a respeito do sistema de estabilidade do projeto SOFIA:

O telescópio, estabilizado inercialmente por giroscópios eletrônicos de fibra óptica, reside sobre uma cavidade da seção da popa da aeronave e observa o céu por meio de uma porta lateral. A porta, que é aberta a uma certa altitude, [...] permite o telescópio de operar dentro de uma angulação de 23 a 58 graus. O telescópio giro estabilizado é operado por aplicadores de torque ao redor de um rolamento esférico hidrostático de 1,2m de diâmetro que flutua dentro de óleo a 50 atm de pressão entre dois anéis esféricos justamente montados na antepara de pressão de 21' de diâmetro no eixo perpendicular à viga de Nasmyth.

Tal aparato é necessário de acordo com os autores pois, dessa forma, os tripulantes podem ficar dentro da aeronave num ambiente a temperatura controlada, sem interferência do ambiente externo.

O observatório foi montado de forma a ocupar toda a aeronave com os sistemas envolvidos, com uma escotilha localizada à ré da mesma podendo ser aberta para expor o

telescópio ao ambiente externo. A figura 7, disponibilizada pelo próprio centro de pesquisa, representa a aeronave em pleno voo com o telescópio sendo operado e visível.

Figura 7 – Fotografia do SOFIA sobrevoando as montanhas da Sierra Nevada (EUA)



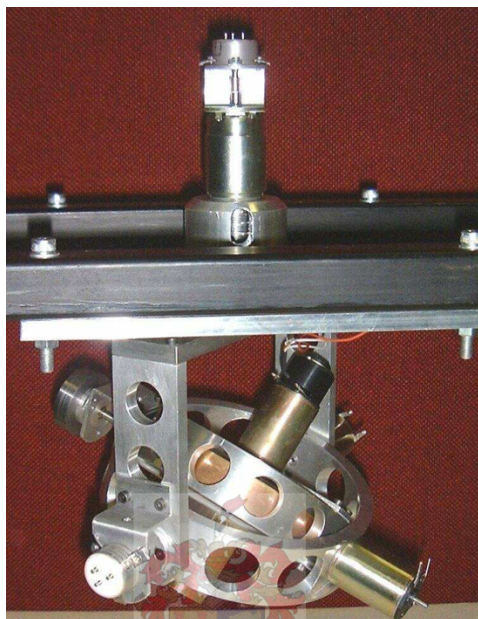
Fonte: SOFIA Science Center (2018)

2.8.2 Sistema de Estabilidade para uma Câmera Fotográfica montada sobre um dirigível

Bredenkamp (2007, p.2) propõe um sistema de estabilidade para uma câmera fotográfica montada sobre dirigível, de forma que esta seria capaz de tirar fotografias abaixo da mesma.

O sistema consiste da câmera montada sobre um sistema de suspensão cardan com 3 graus de liberdade de rotação, sendo a sua movimentação controlada por meio de um elemento giroscópico manipulado por servomotores de forma a induzir momentos de precessão sobre o mesmo. Na figura 8, pode-se ser observado o sistema proposto pelo autor em seu trabalho.

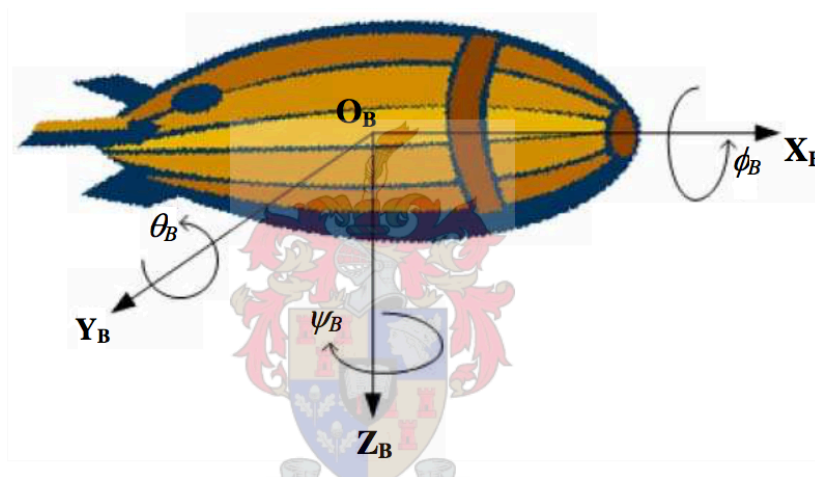
Figura 8 – Sistema de Estabilizador Giroscópico em 3 graus de liberdade.



Fonte: Bredenkamp (2007, p.24).

Uma representação gráfica do dirigível em questão proposta pelo autor está representada na Figura 9.

Figura 9 – Dirigível proposto por Bredenkamp (2007)



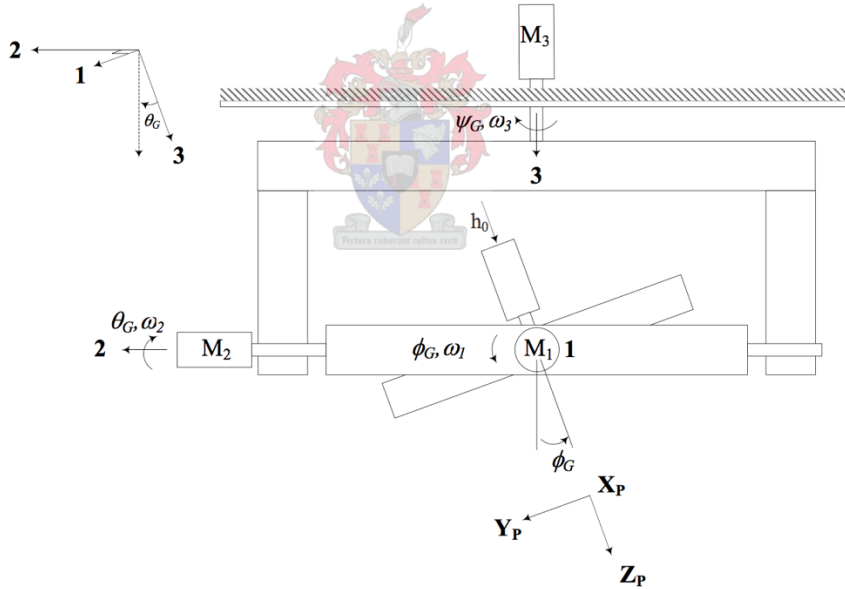
Fonte: Bredenkamp (2007).

O autor propõe um sistema de coordenadas para a plataforma estabilizada, que pode ser observada na Figura 10. É importante ressaltar no modelo proposto por Bradenkamp (2007) o eixo de rotação ao qual se refere cada número na Figura 10.

- O eixo 3 refere-se à rotação de *yaw* da plataforma;
- O eixo 2 ao eixo de *pitch*;

- O eixo 1 ao eixo de *roll* da mesma.

Figura 10 – Sistema de Coordenadas para uma Plataforma de Estabilidade



Fonte: Bredenkamp (2007, p.9).

As equações (10), (11) e (12), propostas por Bredenkamp (2007), descrevem as movimentações deste sistema em *roll*, *pitch* e *yaw*, respectivamente:

$$I_{11}\dot{\omega}_1 = N_{m1} + N_{w1} - \omega_2 h_0 \cos \varphi_G - \omega_3 h_0 \sin \varphi_G \cos \theta_G \quad (10)$$

$$I_{22}\dot{\omega}_2 = N_{m2} + N_{w2} - \omega_1 h_0 \cos \varphi_G - \omega_3 h_0 \cos \varphi_G \sin \theta_G \quad (11)$$

$$I_{33}\dot{\omega}_3 = N_{m3} + N_{w3} - \omega_1 h_0 \sin \varphi_G \cos \theta_G - \omega_2 h_0 \cos \varphi_G \sin \theta_G \quad (12)$$

Onde I_{NN} diz respeito ao momento de inércia em torno do eixo N, N_{mN} é o torque aplicado ao eixo N pelos servomotores, N_{wN} é o torque aplicado por atrito ao eixo N, ω_N é a taxa angular do eixo N, $\dot{\omega}_N$ é a aceleração angular do eixo N, h_0 é o momento angular do eixo do giroscópio, θ_G é o ângulo do *gimbal* de *pitch* e φ_G é o ângulo do *gimbal* de *roll*.

Posteriormente, o autor desenvolve uma série de equacionamentos que são capazes de simular o comportamento dinâmico do sistema. Estes podem ser encontrados no Anexo A.

3 METODOLOGIA

Tem-se por objetivo neste trabalho desenvolver conceitualmente um sistema de estabilidade para o suporte de um telescópio montado sobre uma embarcação. Como pretende-se formular um sistema para chegar a essa finalidade, é importante ter em mente o meio no qual esse sistema funcionará, as suas implicações e como será feita a verificação do mesmo.

É necessário compreender-se a respeito do tipo de observação que esse telescópio deve realizar, como o tempo de exposição da lente e o de operação do equipamento. Numa típica fotografia realizada por uma câmera tipo DSLR, é necessário que esta esteja estática em relação ao objeto de observação durante o tempo de exposição de forma a garantir que as imagens não saiam borradas. Quando mais longo for esse tempo, mais estável deverá ser o sistema.

É necessário também quantificar a excitação que atinge esse sistema. Como o sistema do telescópio encontra-se sobre uma embarcação, o mesmo estará sujeito a todas as vibrações, rotações e deslocamentos resultantes da incidência de ondas, do motor e de manobras desta. Como esses dados dependem demasiadamente da embarcação sobre a qual o sistema estiver montado, será suposto para os fins deste trabalho uma embarcação mercante do tipo contêiner. Os motivos por essa decisão se dão pois trata-se de uma embarcação com uma área livre suficiente para montar o sistema proposto, sofre em escala menor os efeitos de ondas em comparação com embarcações de menor porte, por ser de grandes dimensões, e por ser uma classe muito utilizada pelo mundo todo.

Com essa modelagem, é possível propor um sistema utilizando a tecnologia do estabilizador giroscópico, com base na literatura, de forma que esse tenha capacidades de compensar por essas excitações que atingem o telescópio a um nível aceitável para o tipo de observação proposta. Por fim, uma equação do movimento será desenvolvida para este.

4 DADOS DE ENTRADA

Se faz necessário definir alguns critérios para dimensionar o sistema de estabilidade, sendo estes:

- O tempo de exposição da fotografia;
- O tempo de operação do telescópio;
- Uma embarcação modelo;
- A magnitude e velocidade dos deslocamentos da embarcação;
- A magnitude, velocidade e aceleração das rotações da embarcação;
- A massa do telescópio a ser utilizado;
- Sistema a ser utilizado para estabilização.

Cada um dos critérios acima será descrito nas seções a seguir deste capítulo.

4.1 ASPECTOS DA FOTOGRAFIA

A fotografia realizada pelo telescópio tem aspectos muito semelhantes àqueles realizados por uma câmera fotográfica convencional. Desta forma, o telescópio funciona como uma câmera concentrada em um ponto do céu capturando fluxos de fótons e registrando os mesmos no formato de uma imagem, com tempos de exposição fotográfica e um período total de atuação.

Dever-se-á analisar um tipo de observação aceitável para o estudo presente e avaliar-se os efeitos da movimentação da embarcação sobre a fotografia.

4.1.1 Fenômenos Observáveis

Propõe-se observar ocultações com o sistema proposto, pois este é um tipo de fenômeno astronômico de curta duração e pode ser composto por diversas fotos, ao contrário de outros métodos que requerem tempos de exposição maiores.

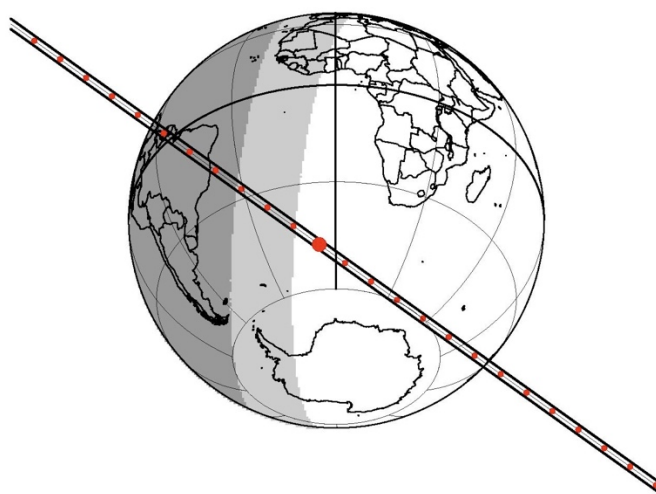
Com base nos trabalhos de EMELYANOV (2009, p.1042) e DIAS-OLIVEIRA (2013, p.231 a 242), conclui-se que a observação de ocultações se dá por meio de várias fotos de curto tempo de exposição, aproximadamente de 0,5s, no decorrer de um período de 12 a 50 minutos.

Esses dados permitem estimar-se o tempo necessário para realizar uma simulação mais precisa do sistema requerido.

Outro argumento a favor da utilização desse sistema sobre uma embarcação, neste caso, é a variedade de locais de ocorrência de ocultações. Na Figura 11, tem-se um diagrama que demonstra a trajetória de uma ocultação ocorrida em 2012, envolvendo o asteroide Chariklo, onde a reta descreve a área de visibilidade do fenômeno e o maior ponto vermelho na reta representa o ponto central da ocultação, ou o melhor ponto de observação possível desse evento. Como pode-se observar, grande parte do fenômeno, incluindo seu ápice, ocorreu no meio do oceano Atlântico, num ponto de difícil visualização.

Figura 11 – Ocultação de Chariklo, dada em 19/02/2012.

Chariklo: Star OPD Julio 10Jan, JPL#19 no Offset Offset (mas): 0.0 0.0



d	m	year	h:m:s UT	ra__dec__J2000_candidate	C/A	P/A	vel	Delta	R*	K*	long
19	02	2012	06 34 31.	16 30 13.3932 -40 44 15.938	0.087	215.59	16.30	14.38	14.9	12.7	0.

Fonte: Ribas (2012).

Emelyanov (2009, p.1037) descreve que a observação de ocultações é muito interessante, pois permite determinar com maior acurácia a dinâmica do movimento de objetos no sistema solar.

4.1.2 Efeitos de deslocamento sobre o telescópio

Por deslocamento, entende-se a todo tipo de movimento sofrido pelo telescópio que faça que o mesmo mude de posição em relação ao seu posicionamento original quando começou a observação.

Ao fazer uma observação, o telescópio percorre milhões de quilômetros em seu perímetro de captura. Assim, o objeto observado estará, por sua vez, a uma distância do observador que os deslocamentos sofridos no telescópio influem infimamente sobre o resultado da observação do fenômeno.

Durante uma observação, parte da esfera enquadrada possui um raio na qual tende ao infinito, com isto, a imagem capturada possui um perímetro de grande dimensão por consequência. Considerando isso, se o ângulo da observação for fixo, deslocamentos no plano de observação terão pouca alteração na imagem.

Entretanto, é importante ressaltar que, para o caso da Terra, se o deslocamento do observador acarretar na mudança do ângulo significativa para manter o objeto no enquadramento, a imagem pode ser perdida de foco.

Para ilustrar esse fenômeno, a Figura 12 demonstra a observação da estrela Canopus. Utilizando o software Stellarium, realizou-se a captura dessa estrela com a variação do deslocamento, com coordenadas S 26° 19' 0" e W 48° 49' 59,89" num determinado instante de tempo. As Figuras 13 e 14 demonstram a observação desta mesma estrela, entretanto deslocando-se no sentido norte em latitude em 2 minutos de arco e 9 minutos de arco em relação ao posicionamento da Figura 12, o que correspondem a deslocamentos de 3704m e 16668m em relação a origem, respectivamente, pode-se observar que, para um campo de visão de 1° de telescópio, a estrela ainda se encontra dentro do enquadramento.

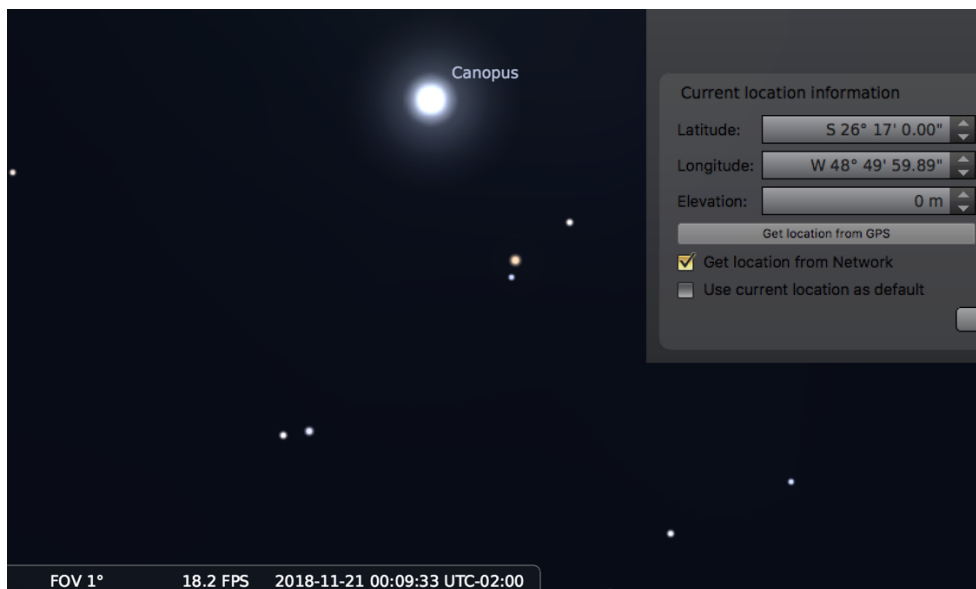
Ressalta-se que seria necessário um deslocamento de 16,7km para haver uma mudança de 9 minutos de arco do posicionamento de um objeto na imagem observada, e que deslocamentos menores que isso são praticamente desprezíveis se não afetarem a angulação do telescópio.

Figura 12 – Estrela Canopus Observada da Posição Original



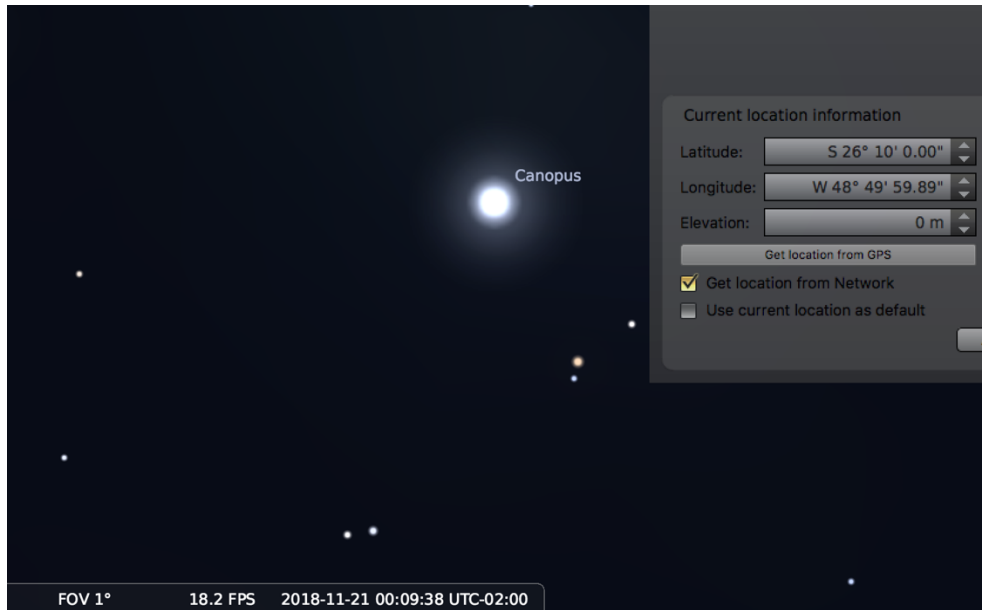
Fonte: O autor (2018).

Figura 13 – Estrela Canopus observada de uma posição deslocada em 2 minutos de arco



Fonte: O autor (2018).

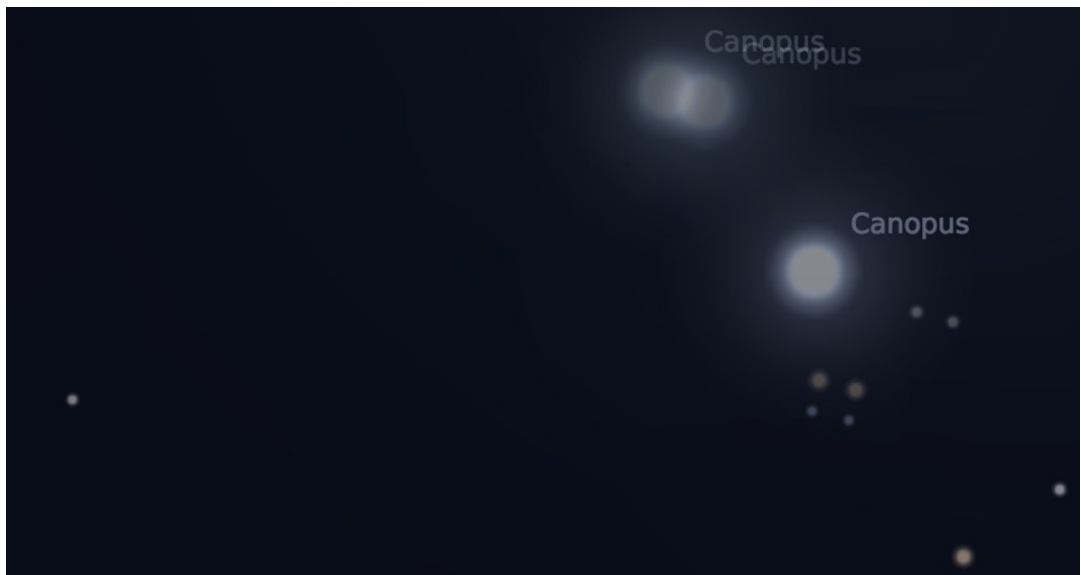
Figura 14 – Estrela Canopus observada de um ponto deslocado em 9 minutos de arco



Fonte: O autor (2018).

Sobrepondo as três figuras, é possível visualizar-se o deslocamento da estrela. A Figura 15 demonstra essa sobreposição, onde a estrela mais ao alto trata-se da posição original e as duas seguintes representam um deslocamento de 2 minutos de arco e 9 minutos de arco, respectivamente.

Figura 15 – Sobreposição de 3 observações de Canopus de diferentes localidades



Fonte: O autor (2018).

4.1.3 Efeitos de rotações sobre o telescópio

Rotações têm um impacto significativo na observação do fenômeno, uma vez que a área projetada sobre a esfera celeste muda consideravelmente de posição para este caso, independente da distância do observador ao objeto.

Se a imagem observada tiver um campo de visão de 1° , por exemplo, é seguro afirmar que uma rotação de $0,5^\circ$ em qualquer direção já bastará para que o objeto saia do campo observacional, portanto estabilidade rotacional é de suma importância.

4.2 A EMBARCAÇÃO MODELO E SEUS MOVIMENTOS

A escolha de uma embarcação estável simplifica bastante os processos necessários para o dimensionamento do sistema de estabilidade, uma vez que descolamentos e rotações menores resultam em necessidades de atenuação e correção de movimentos menores.

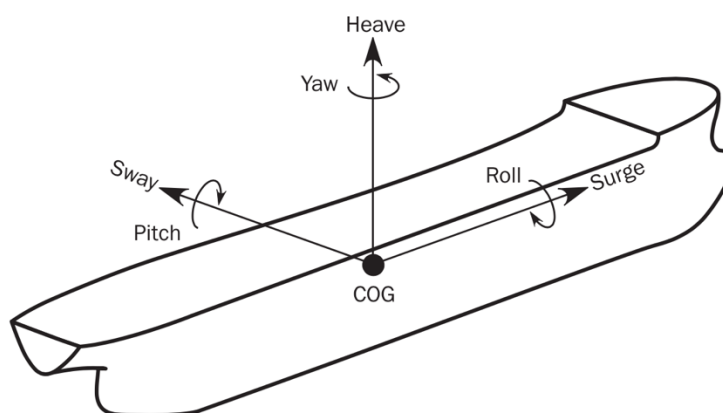
Justifica-se a escolha, assim, de uma embarcação de dimensões mais avantajadas, uma vez que a mesma possuirá um momento de inércia e massa maiores, resultando em frequências naturais menores e diminuindo os efeitos de transferência de energia de ondas para a mesma, o que reduz os efeitos resultantes de excitações de ondas.

Levando em consideração as necessidades descritas acima, escolheu-se uma embarcação cargueira do tipo contêiner para o acoplamento do sistema, esta possui as seguintes características:

- Comprimento de 200 metros;
- Boca de 36 metros;
- Pontal de 21,2 metros;
- Calado de projeto de 12 metros;
- Velocidade de 20 nós.

Como as demais características da embarcação não são relevantes para a análise escolhida, as mesmas foram omitidas. Para os fins de estudos dos movimentos, um modelo de sistema de coordenadas é proposto conforme a figura 16.

Figura 16 – Sistema de Coordenadas proposto aos movimentos da embarcação.



Fonte: DNV GL (2018, p.8).

Desta forma, os movimentos de surge, heave e sway são deslocamento no eixo longitudinal, vertical e transversal da embarcação, enquanto roll, yaw e sway são rotações em torno destes mesmos eixos, respectivamente.

4.2.1 Deslocamentos da embarcação

Os deslocamentos da embarcação contemplam tanto movimentos resultantes pelo efeito de onda, que podem ser denominados de heave, surge ou sway dependendo da direção de atuação, e do próprio deslocamento da embarcação conforme a mesma segue pelo seu trajeto.

Como explorado na seção 4.1.1, sabe-se que pequenos deslocamentos possuem efeitos insignificantes caso os mesmos não acarretem em mudanças de ângulo do ponto de observação a respeito do objeto a ser observado. Assim, é seguro afirmar-se que os movimentos de heave, surge e sway da embarcação não afetam na observação do fenômeno pelo telescópio.

A distância percorrida pela embarcação durante o tempo de operação do telescópio, entretanto, deve ser considerada pois a mesma pode interferir na observação.

4.2.2 Distância percorrida pela embarcação

Supondo que a embarcação modelo esteja percorrendo o oceano a 20 nós de velocidade em linha reta, segundo a definição de um nó, a mesma terá se deslocado um total de 5 arcmin em 12 minutos, até 20 arcmin em uma hora.

Para o telescópio, isso significa capturar uma imagem que contemple pelo menos essa angulação nas laterais do enquadramento do objeto observado, para que o mesmo não saia do campo de observação durante o percurso do navio.

4.2.3 Rotações da Embarcação

Por rotações, compreende-se os fenômenos de *roll*, *pitch* e *yaw* da embarcação, resultantes na maioria das vezes por ondas. Cada tipo de rotação possui uma resistência e frequência natural diferentes, dependentes de inúmeros características da embarcação, inclusive o seu estado no instante de tempo analisado, tornando as rotações da embarcação num problema de maior complexidade.

O *roll* de uma embarcação pode ser descrito, para pequenos ângulos, como um movimento de rotação do navio em torno de um eixo longitudinal do mesmo. Isto é, a embarcação oscila inclinando-se de bombordo a boreste e vice-versa. Usualmente, para a maioria dos navios, é o movimento que possui maior magnitude, devido à dimensão menor da boca de uma embarcação em relação às demais, é um dos pontos fracos de uma embarcação.

A rotação em torno de um eixo na direção da lateral de um navio é chamada de *pitch*, e sua amplitude é usualmente menor do que a de *roll* para grandes embarcações.

O *yaw* é a rotação do navio em torno de um eixo vertical, e pode ser interpretada como o contêiner mudando a sua trajetória. Para a presente análise, supor-se-á que não há movimento de *yaw* significantes durante o funcionamento do telescópio.

Os movimentos de *roll* e *pitch* do contêiner são muito complexos de serem caracterizados de forma realística, uma vez que dependem de comportamentos do oceano e da embarcação não lineares. Como não é o foco desta pesquisa estudar estes fenômenos, opta-se pela utilização de algum método para simplificar estes.

4.2.3.1 Método descrito pela norma da DNV GL

A norma regulamentadora da DNV GL (2018, p.29) descreve equações para aproximar, grosseiramente, as rotações da embarcação por meio de uma função cossenoidal, com variáveis dependentes das dimensões geométricas do navio. Esse método não descreve por completo toda condição de operação do navio com exatidão, mas pode ser utilizada para haver um valor aproximado de utilização para o estudo.

Por meio deste método, chega-se às seguintes definições:

- Período de *roll* de 19s;
- Amplitude de meia onda de *roll* de 7,8 deg;
- Período de *pitch* de 11,6s;
- Amplitude de meia onda de *pitch* de 2,5 deg.

Partiu-se da suposição de que o telescópio só seria capaz de observar os fenômenos astronômicos em condições ideais de tempo – isto é, o céu deve estar limpo e sem nuvens. Para isso, definiu-se o fator f_p como sendo o menor possível dentro das limitações propostas pela entidade uma vez que este mensura a condição de mar da análise.

4.2.3.2 Método Utilizando Informações de Software

Em um primeiro momento, pensou-se em utilizar os dados oriundos do software Maxsurf para gerar um comportamento temporal da embarcação. Por meio da aplicação de uma transformada de Fourier inversa sobre o espectro de resposta da mesma, seguido por um tratamento destes dados para formar uma composição de ondas cossenoidais para cada tipo de rotação. Entretanto, o método provou ser difícil de se aplicar por conta das diversas variáveis envolvidas na análise do software, como posicionamento de pesos sobre a estrutura, que necessitariam de um projeto completo da embarcação para realizar uma análise confiável.

4.2.4 **Ordem de Rotações**

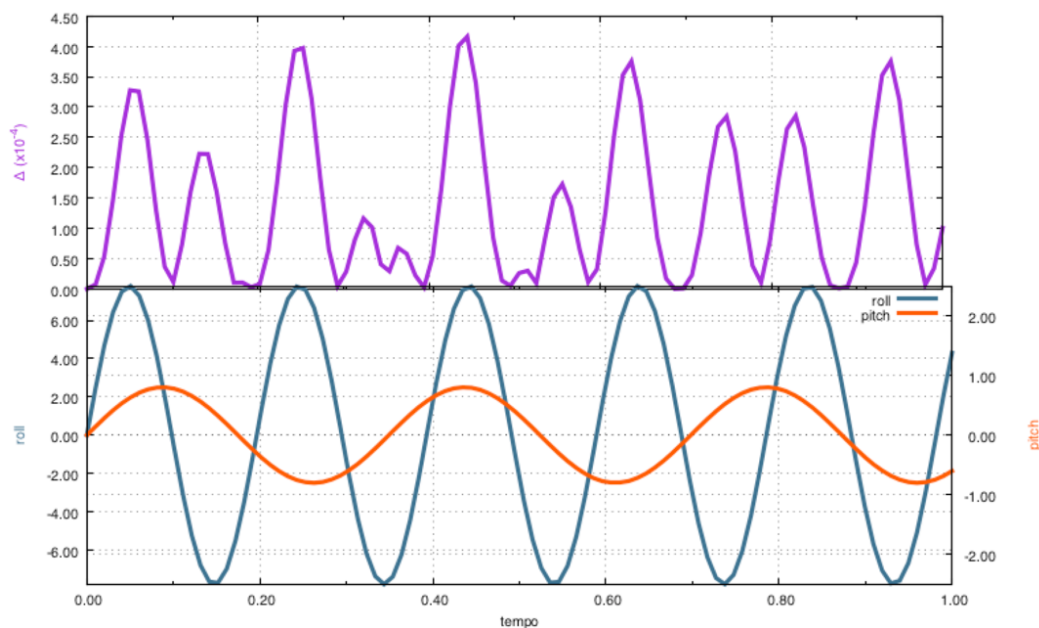
Uma dificuldade em simular as rotações da embarcação é a respeito da ordem das rotações. Deve-se levar em consideração que um objeto que sofre rotação em um eixo e depois em outro, irá diferir de um objeto que sofreu rotações na ordem contrária a esse.

Uma comprovação foi realizada de forma a mostrar que, para os ângulos da embarcação, a diferença entre diferentes sequências de rotação era ínfima, e que a ordem não importaria.

A Figura 17 representa esta constatação. Nela tem-se um gráfico com duas funções senoidais sobrepostas, elas representando rotações de *roll* e *pitch* da embarcação com os valores de amplitude representados anteriormente e período em escala. Acima, na figura, tem-se um gráfico em roxo que representa o deslocamento entre os vetores verticais direcionais das

plataformas rotacionadas, e pode ser interpretado aproximadamente como uma porcentagem de diferença entre os valores de posição calculados aplicando-se roll seguido de pitch e vice-versa, numa escala de 10^{-4} . O erro máximo estimado foi de aproximadamente 0,04%.

Figura 17 – Comparação gráfica entre sequências de aplicação de movimentos de rotação para ângulos pequenos



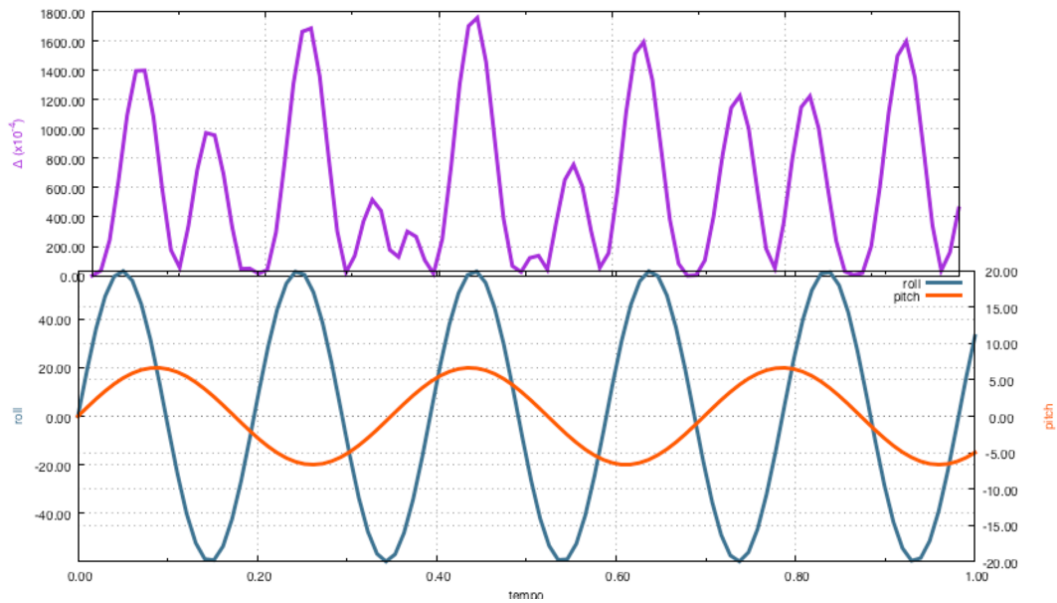
Fonte: Autor (2018).

O cálculo foi realizado conforme a equação 13.

$$|\Delta| = K_{RP} \cdot K_{PR} = \sqrt{2(1 - \cos \theta)} \quad (13)$$

Como um contraexemplo, o mesmo cálculo foi elaborado para ângulos maiores, com 60° de *roll* e 20° de *pitch*, mantendo-se os períodos. Neste caso, apresentado na Figura 18, a diferença entre valores máxima foi de 17%, notando que a escala de Δ é na ordem de 10^{-4} .

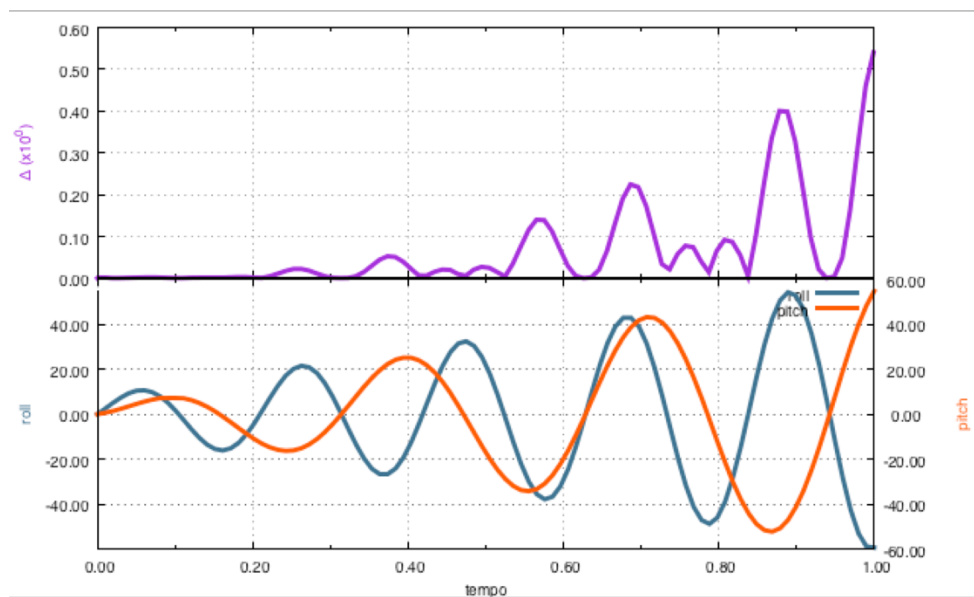
Figura 18 – Comparação gráfica entre sequências de aplicação de movimentos de rotação para ângulos grandes



Fonte: Autor (2018).

E, por último, elaborou-se um exemplo semelhante supondo que a amplitude de rotações aumentava com o passar do tempo, ilustrado na Figura 19. Neste caso, foi visível a diferença entre a ordem de rotações em relação com a magnitude destas. A diferença chegou a 60% numa escala de 10^0 .

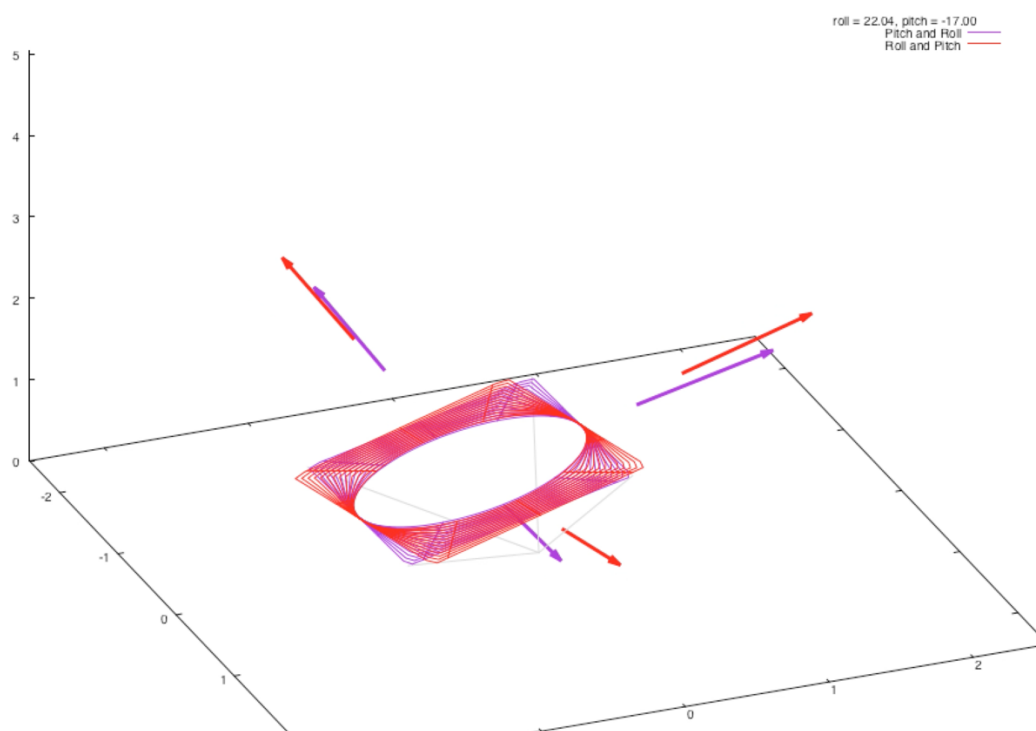
Figura 19 – Comparação gráfica entre sequências de aplicação de movimentos de rotação para ângulos variando com o tempo.



Fonte: Autor (2018).

Juntamente a esse desenvolvimento, foram feitas animações para visualizar esse comportamento. Uma imagem da animação está ilustrada na Figura 20, que ilustra duas plataformas, representando o convés do navio, sofrendo rotações sequenciais, de forma que na roxa aplica-se pitch seguido de roll e na vermelha roll seguido de pitch. Os vetores direcionais de cada plataforma estão indicados em suas cores respectivas, e é possível visualizar a diferença entre estes.

Figura 20 – Ilustração da diferença entre sequências de rotações



Fonte: Autor (2018).

4.3 MASSA E DIMENSÕES DO TELESCÓPIO

O telescópio proposto neste estudo, é um sistema simples composto por um telescópio sem liberdade de movimentação, de forma que, quando necessário que o sistema altere sua orientação para observar um fenômeno no céu, a plataforma ficará totalmente responsável pela orientação do equipamento.

Para facilidade dos cálculos, o telescópio foi dado como tendo um formato cilíndrico comprido, com centro de gravidade situado exatamente na metade de seu comprimento, de onde o mesmo será fixado sobre as plataformas de estabilidade.

Supor-se-á que o telescópio em questão tem massa de 30kg, e dimensões de 1m de comprimento por 20cm de diâmetro.

4.4 SISTEMA DE ESTABILIDADE

Propõe-se utilizar um estabilizador de tipo giroscópico para a plataforma onde será acoplado o telescópio. Esse sistema será composto por um elemento giroscópico que pode ser rotacionado dentro de uma suspensão tipo Cardan, com seus pinos controlados por servomotores de forma a induzir um torque de precessão nos apoios pinados onde se encontra. A precessão pode ser controlada dessa forma para anular demais movimentos deste sistema apoiado. A plataforma, com um elemento giroscópico estabilizador, então será montada sobre uma superfície que permite a rotação da plataforma no sentido de *yaw* da embarcação.

O motivo desta escolha se dá na capacidade deste tipo de sistema de responder rapidamente e com precisão tanto em *pitch* quando *roll* para a situação dada, e de poder responder aos três tipos de rotação com um elemento só, não havendo interferência, como seria o caso se houvessem mais elementos semelhantes.

Com o estabilizador, a plataforma compensaria pelas rotações da embarcação rotacionando os graus de liberdade da mesma, de forma a manter o vetor normal sempre orientado com a posição pré-determinada, condicionando o telescópio a se manter na mesma posição independente do navio.

4.4.1 Modelo Físico

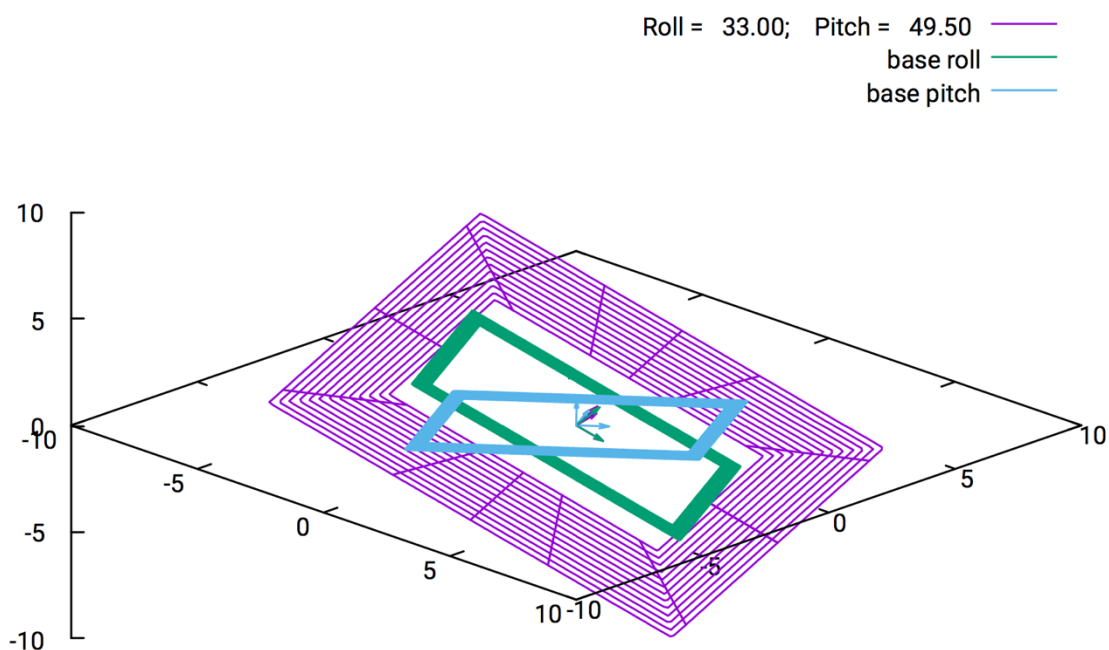
Propôs-se um modelo físico do sistema descrito acima, com uma suspensão tipo Cardan. Sendo modelado de forma que um anel circular externo é pinado à embarcação, na qual tem livre movimentação no sentido de *roll* do navio, e um segundo anel circular interno é pinado a este primeiro, possuindo livre movimentação no sentido de *pitch*. Neste segundo anel, são montados o telescópio e o estabilizador giroscópico.

Pensou-se inicialmente de utilizar anéis retangulares ao invés de circulares, mas como pode-se observar na Figura 21, que serve também para ilustrar o sistema proposto, a utilização

de anéis retangulares resultaria em eventuais choques físicos entre os mesmos, o que impossibilitaria a utilização do sistema.

Na Figura 21, observa-se um retângulo roxo, que representa a embarcação sofrendo uma angulação de *roll* e *pitch*, e duas retângulos internos, um verde e outro azul, representando os anéis externo e interno, respectivamente, compensando por estas angulações. Dessa forma, o telescópio montado sobre a plataforma interna se manteria estável.

Figura 21 – Ilustração de Sistema Proposto com Plataformas Retangulares.

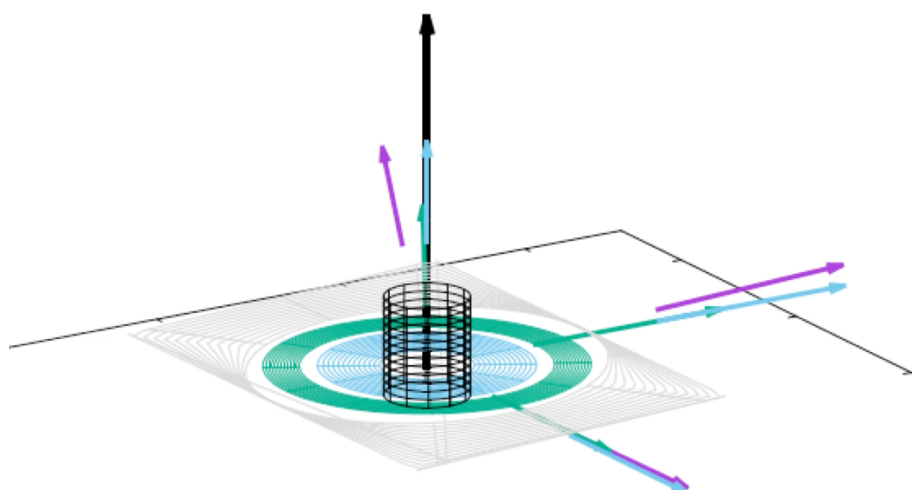


Fonte: Autor (2018).

Adicionalmente, observa-se que a plataforma interna sofre também uma rotação de *yaw*, o qual é importante considerar, pois implica que o telescópio deverá estar alinhado com o eixo vertical do anel interno. Dessa forma, as imagens do telescópio aparecerão rotacionadas em torno do fenômeno sendo observado, o que necessitará de correção posterior. Caso contrário, a imagem se perderá completamente por conta deste movimento.

Na Figura 22, observa-se o modelo proposto com anéis circulares, com o telescópio incluso representado pelo cilindro preto.

Figura 22 – Ilustração de Sistema Proposto com Plataformas Circulares



Fonte: Autor (2018).

Propõe-se, por fins de simplificação de cálculos, que o sistema seja montado de tal forma que o centro de gravidade do mesmo, como um todo, se localize exatamente no centro dos anéis, onde estará o estabilizador giroscópico.

4.4.2 Condições de Estabilidade

A condição de estabilidade para que o estabilizador opere conforme se espera, o mesmo terá que manter um apontamento na direção pré-definida a todo momento presente. Essa condição pode ser compreendida como o vetor normal da superfície do anel interno, de onde o telescópio aponta, como tendo direção constante e inalterável.

Bredenkamp (2007, p.41 a 42) propõe um sistema de equações diferenciais para a resolução de seu sistema, semelhante ao proposto. Um diagrama formulado pelo mesmo autor, no software Simulink (MathWorks Inc., Natick, MA., EUA) está contido no Anexo A, e pode ser utilizado para comparar as equações desenvolvidas.

O sistema do autor, apesar de ser oriundo de um sistema de estabilidade proposto para fotografias no meio aeronáutico, pode ser aproveitado para o meio naval pois o funcionamento do sistema será semelhante, com a diferença da câmera estar sendo apontada para o céu, e não para baixo.

5 ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS

Neste capítulo serão explicados os procedimentos utilizados e os resultados do estudo presente.

5.1 CONVENÇÕES ADOTADAS

O procedimento proposto envolve a formulação das equações de movimento, com base nas informações coletadas previamente, para então poder simular as mesmas e observar o comportamento do sistema.

A seguinte convenção de símbolos será adotada para explorar os cálculos adiante.

- θ para o ângulo de *roll* da embarcação;
- θ_1 para ângulo de *roll* do anel externo;
- θ_2 para ângulo de *roll* do anel interno;
- ϕ para ângulo de *pitch*;
- ϕ_1 para ângulo de *pitch* do anel externo;
- ϕ_2 para ângulo de *pitch* do anel interno;
- φ para ângulo de *yaw*;
- φ_1 para ângulo de *yaw* do anel externo;
- φ_2 para ângulo de *yaw* do anel interno;
- I_{11} para o momento de inércia do anel externo na direção de *roll* do mesmo;
- I_{12} para o momento de inércia do anel externo na direção de *pitch* do mesmo;
- I_{21} para o momento de inércia do anel interno na direção de *roll* do mesmo;
- I_{22} para o momento de inércia do anel interno na direção de *pitch* do mesmo.

Adicionalmente, deve-se considerar que os elementos acima possuem derivadas para taxa de variação angular e aceleração angular. Essas serão identificadas por meio de um ponto acima do memo.

Supor-se-á que a embarcação nunca sofrerá movimentos de *yaw* significativos para a análise. Assim, o objetivo do telescópio se torna apenas manter o apontamento indicado a ele.

5.2 EQUAÇÕES DO MOVIMENTO

Primeiramente, é necessário formular a equação do movimento do sistema como um todo. A seguinte formulação da equação (14) é desejada pois dessa forma pode-se relacionar os torques induzidos pelo giroscópio sobre o sistema.

$$\mathbf{M} = I\boldsymbol{\alpha} \quad (14)$$

Para tal, foi escolhido um sistema de coordenadas inercial, que tem como origem fixa o navio sem quaisquer efeitos de rotação sobre o mesmo. Este servirá como referência para os demais. Em seguida, propôs-se um sistema de coordenadas local para o primeiro anel do sistema e então para o segundo.

Para desenvolver as equações que descrevem os movimentos dos vetores constituintes dos sistemas de coordenadas das plataformas, utilizam-se rotações de Euler para encontrar os momentos angulares das partes do sistema. O momento angular que atinge a primeira plataforma é calculado aplicando-se um efeito de *roll* sobre o sistema inercial da embarcação, seguido por um de *pitch* sobre o resultado deste. O cálculo deste procedimento está descrito na equação (15).

$$\begin{matrix} X \\ Y \\ Z \end{matrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix} \quad (15)$$

No lado esquerdo da matriz há um vetor localizado no sistema de coordenadas inercial, enquanto no direito há duas matrizes de rotação e um vetor localizado no sistema de coordenadas rotacionado do convés da embarcação. Por meio da substituição deste segundo vetor por um unitário, encontram-se os valores dos vetores direcionais locais do convés rotacionado em relação ao sistema de coordenadas inercial: \mathbf{I}_P , \mathbf{J}_P e \mathbf{K}_P .

Com estes resultados, se torna possível encontrar o momento angular do primeiro anel, que é descrito pela soma dos momentos angulares em cada eixo na equação (16).

$$L_1 = \dot{\theta}_1 \mathbf{I}_P + \dot{\phi}_1 \mathbf{J}_P = A_x \mathbf{I} + A_y \mathbf{J} + A_z \mathbf{K} \quad (16)$$

Onde $\dot{\theta}_1$ surge por conta de atrito empregado pelos apoios da suspensão na embarcação e da aplicação do estabilizador giroscópico, e $\dot{\phi}_1$ surge por efeito passivo do movimento da embarcação.

Os termos A_x, A_y e A_z servem para indicar que o sistema pode ser interpretado no sistema de coordenadas inercial. É preferível para a análise final que o sistema seja convertido dessa forma.

Semelhantemente ao processo anterior, a respeito dos sistemas locais do anel interno e do estabilizador giroscópico, reaplicam-se as rotações de *roll* e *pitch* sobre os resultados anteriores, respectivamente. Estes cálculos estão expressos abaixo, nas equações (17) e (18).

$$\begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ 0 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_2 & 0 & -\sin \phi_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi_2 & 0 & \cos \phi_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Onde o vetor da esquerda da equação (17) é o sistema de coordenadas local do convés e o vetor da direita é referente ao sistema de coordenadas local do anel externo. Na equação (18) o vetor da esquerda é referente ao anel externo e o da direita ao anel interno.

As equações que descrevem o momento angular do anel interno e do estabilizador giroscópico estão descritas nas equações (19) e (20).

$$\mathbf{L}_2 = \dot{\theta}_2 \mathbf{I}_1 + \dot{\phi}_2 \mathbf{J}_1 = B_x \mathbf{I} + B_y \mathbf{J} + B_z \mathbf{K} \quad (19)$$

$$\mathbf{L}_G = \dot{\theta}_G \mathbf{K}_2 = C_x \mathbf{I} + C_y \mathbf{J} + C_z \mathbf{K} \quad (20)$$

Onde $\dot{\theta}_2$ é um movimento passivo nesta plataforma e $\dot{\phi}_2$ sofre efeito de atrito nos apoios e é manipulado pelo estabilizador giroscópico. $\dot{\theta}_G$ vem da rotação do estabilizador giroscópico.

Novamente, as equações são convertidas ao sistema de coordenadas global para que possam ser somados posteriormente. É mais interessante trabalhar com as equações no sistema

de coordenadas global para que possam ser aplicadas as rotações da embarcação sobre a plataforma com maior facilidade.

Os resultados destes procedimentos permitem calcular o momento angular do sistema telescópio em função de um conjunto de variáveis relativos ao sistema de coordenadas inercial, que o possibilita ser modelado.

Adicionalmente, integrando estas equações, pode-se encontrar as equações que descrevem diretamente o ângulo do sistema, e derivando-as encontram-se as acelerações angulares das mesmas, e, conseqüentemente, o torque.

5.2.1 Torques Envolvidos no Sistema

Para encontrar-se os torques envolvidos nos sistemas locais dos anéis, propôs-se derivar as equações de momento angular encontradas por meio dos procedimentos detalhados na seção anterior, de acordo com as equações (21), (22), (23), (24), (25) e (26).

$$\mathbf{L}_1 = \mathbf{L}_1(\theta, \phi, \dot{\theta}_1, \dot{\phi}_1) \quad (21)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}_1}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{L}_1}{\partial \theta} \dot{\theta} + \frac{\partial \mathbf{L}_1}{\partial \phi} \dot{\phi} + \frac{\partial \mathbf{L}_1}{\partial \dot{\theta}_1} \ddot{\theta}_1 + \frac{\partial \mathbf{L}_1}{\partial \dot{\phi}_1} \ddot{\phi}_1 \quad (22)$$

$$\mathbf{L}_2 = \mathbf{L}_2(\theta, \phi, \theta_1, \dot{\theta}_2, \dot{\phi}_2) \quad (23)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}_2}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{L}_2}{\partial \theta} \dot{\theta} + \frac{\partial \mathbf{L}_2}{\partial \phi} \dot{\phi} + \frac{\partial \mathbf{L}_2}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1 + \frac{\partial \mathbf{L}_2}{\partial \dot{\theta}_2} \ddot{\theta}_2 + \frac{\partial \mathbf{L}_2}{\partial \dot{\phi}_2} \ddot{\phi}_2 \quad (24)$$

$$\mathbf{L}_G = \mathbf{L}_G(\theta, \phi, \theta_1, \phi_2, \dot{\theta}_G) \quad (25)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}_G}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{L}_G}{\partial \theta} \dot{\theta} + \frac{\partial \mathbf{L}_G}{\partial \phi} \dot{\phi} + \frac{\partial \mathbf{L}_G}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1 + \frac{\partial \mathbf{L}_G}{\partial \phi_2} \dot{\phi}_2 + \frac{\partial \mathbf{L}_G}{\partial \dot{\theta}_G} \ddot{\theta}_G \quad (26)$$

Por fim, somam-se estes componentes, encontrando o torque aplicado sobre o anel interno, onde será colocado o telescópio, conforme a equação (26).

$$\dot{\mathbf{L}}_{SIS} = \dot{\mathbf{L}}_1 + \dot{\mathbf{L}}_2 + \dot{\mathbf{L}}_G = \mathbf{M} = I\alpha \quad (27)$$

Antes de apresentar o resultado deste procedimento, algumas condições de contorno foram aplicadas de forma a simplificar a análise.

5.2.2 Condições de Contorno

Sabe-se que ϕ_1 é igual a ϕ , pois a plataforma estabilizadora está pinada à embarcação, na qual segue o movimento desta no sentido de *pitch*, mas tem livre rotação em *roll*.

Também pode-se igualar θ_2 a θ_1 , porque o anel interno está pinado ao anel externo no sentido de *pitch*, dando liberdade de movimento neste sentido, porém está vinculando ao *roll* deste ao outro.

Como os anéis externo e interno tem um formato circular, a rotação dos mesmos em qualquer direção proposta será atuada por um momento de inércia de mesmo valor. Dessa forma, de acordo com as equações (28) e (29).

$$I_{11} = I_{12} = I_1 \quad (28)$$

$$I_{21} = I_{22} = I_2 \quad (29)$$

5.2.3 Resultados

As equações desenvolvidas ao longo do procedimento descrito podem ser encontradas no apêndice A, e a equação diferencial final tem a seguinte formulação da equação (29)

$$\dot{L}_{SIS} = \dot{L}_X \hat{I} + \dot{L}_Y \hat{J} + \dot{L}_Z \hat{K} \quad (29)$$

Onde os valores de \dot{L}_X , \dot{L}_Y e \dot{L}_Z são descritos pelas equações 30, 31 e 32.

$$\begin{aligned} \dot{L}_X = & \dot{\theta}_1 [-\dot{\phi} \sin \phi (I_2 + I_1) - \dot{\theta}_G (\cos \phi_2 \sin \theta_1 \sin \phi) I_G] + \dot{\phi}_2 [-\dot{\phi} \sin \theta_1 \cos \phi I_2] + \\ & \dot{\theta}_G (\cos \phi_2 \sin \phi - \sin \phi_2 \cos \theta_1 \sin \theta) + \dot{\theta}_1^2 [-\cos \theta_1 \sin \phi I_2] + \ddot{\theta}_1 [\cos \phi I_2] + \\ & \dot{\theta}_G [\dot{\phi} (\sin \phi_2 \cos \phi + \cos \phi_2 \cos \theta_1 \cos \theta) I_G] + \ddot{\theta}_G [\sin \phi_2 \sin \phi + \cos \phi_2 \cos \theta_1 \sin \phi] I_G + \\ & \ddot{\theta} [\cos \phi] I_1 \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned}
\dot{L}_Y = & \dot{\theta}_1 [-(\dot{\theta} \cos \theta \sin \phi + \dot{\phi} \sin \theta \cos \phi) I_2 + \dot{\theta}_G (\cos \phi_2 \cos \theta_1 \cos \theta - \\
& \cos \phi_2 \sin \theta_1 \sin \theta \cos \phi) I_G] + \dot{\theta}_1 \dot{\phi}_2 [(-\sin \theta_1 \cos \theta + \cos \theta_1 \sin \theta \cos \phi) I_2] + \\
& \dot{\phi}_2 [(-\dot{\theta} \cos \phi \sin \theta + \dot{\phi} \sin \theta_1 \cos \theta \cos \phi) I_2] + \dot{\theta}_G (\cos \phi_2 \sin \theta \cos \phi - \\
& \sin \phi_2 \sin \theta_1 \cos \theta - \sin \phi_2 \cos \theta_1 \sin \theta \cos \phi) I_G] - \ddot{\theta}_1 [\sin \theta \sin \phi (I_1 + I_2)] + \\
& \ddot{\phi}_2 [\cos \theta_1 \cos \theta + \sin \theta_1 \sin \theta \cos \phi] I_2 + \dot{\theta}_G [\dot{\theta} (\sin \phi_2 \cos \theta \cos \phi - \cos \phi_2 \sin \theta_1 \sin \theta + \\
& \cos \phi_2 \cos \theta_1 \cos \theta \cos \phi) I_G + \dot{\phi} (-\sin \phi_2 \sin \theta \sin \phi - \cos \phi_2 \cos \theta_1 \sin \theta \sin \phi) I_G] + \\
& \ddot{\theta}_G [\sin \phi_2 \sin \phi + \cos \phi_2 \cos \theta_1 \sin \phi] I_G
\end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned}
\dot{L}_Z = & \dot{\theta}_1 [-(\dot{\theta} \sin \theta \sin \phi (I_1 + I_2) + \dot{\phi} \cos \theta \cos \phi I_2) + \dot{\theta}_G (\cos \phi_2 \cos \theta_1 \sin \theta - \\
& \cos \phi_2 \sin \theta_1 \cos \theta \cos \phi) I_G + \dot{\phi} \cos \theta \cos \phi I_1] + \dot{\theta}_1 \dot{\phi}_2 [(-\sin \theta_1 \sin \theta + \\
& \cos \theta_1 \cos \theta \cos \phi) I_2] + \dot{\phi}_2 [\dot{\theta} (\cos \theta_1 \sin \theta - \sin \theta_1 \sin \theta \cos \phi) I_2 - \\
& \dot{\phi} (\sin \theta_1 \cos \theta \cos \phi) I_2] + \dot{\theta}_G (\cos \phi_2 \cos \theta \cos \phi - \sin \phi_2 \sin \theta_1 \sin \theta - \\
& \sin \phi_2 \cos \theta_1 \cos \theta \cos \phi) I_G] + \ddot{\theta}_1 [\cos \theta \sin \phi (I_1 + I_2)] + \ddot{\phi}_2 [\cos \theta_1 \sin \theta + \\
& \sin \theta_1 \cos \theta \cos \phi] I_2 + \dot{\theta}_G [\dot{\theta} (-\sin \phi_2 \sin \theta \cos \phi - \cos \phi_2 \sin \theta_1 \cos \theta + \\
& \cos \phi_2 \cos \theta_1 \sin \theta \cos \phi) I_G + \dot{\phi} (-\sin \phi_2 \cos \theta \sin \phi - \cos \phi_2 \cos \theta_1 \cos \theta \sin \phi) I_G] + \\
& \ddot{\theta}_G [\sin \phi_2 \cos \theta \cos \phi + \cos \phi_2 \sin \theta_1 \sin \theta + \cos \phi_2 \cos \theta_1 \cos \theta \cos \phi] I_G + \dot{\theta} \dot{\phi} \cos \theta I_1 + \\
& \ddot{\phi} \sin \theta I_1
\end{aligned} \tag{32}$$

Como dito anteriormente, essa equação descreve as forças de torque envolvidas no movimento do telescópio, e por meio dela pode-se propor uma solução para o problema, de forma que o vetor direcional da plataforma do telescópio, $\widehat{\mathbf{K}}_2$, se mantenha constante.

A equação (33) representa a igualdade que permite achar a aceleração do telescópio. Onde $\boldsymbol{\alpha}$ é o vetor aceleração do mesmo e I_{SIS} é o tensor de inércia do sistema.

$$\dot{\mathbf{L}}_{SIS} = I_{SIS} \boldsymbol{\alpha} \tag{33}$$

Entretanto não é o intuito deste trabalho resolver a equação do tensor de inércia, mas sim encontrar a equação que descreve a dinâmica do sistema, como foi feito. Para o desenvolvimento completo desse estudo, a equação (33) deverá ser solucionada. Isolando os termos $\ddot{\theta}_1$ e $\ddot{\phi}_2$, será possível encontrar a aceleração induzida pelo elemento giroscópico, para enfim poder ser desenvolvido um sistema de controle para a atuação dos servomotores. Com isso, um modelo físico poderá ser construído.

6 CONCLUSÃO

A realização deste estudo, foi possível caracterizar as equações de um fenômeno físico complexo composto pela atenuação de rotações por meio da manipulação do movimento giroscópico aplicado a um telescópio sob uma embarcação.

Com o uso de uma simulação proposta, comprovou-se que o telescópio montado sobre a plataforma estabilizadora, após apontado, poderia sofrer rotações de *yaw* localmente sem perder a visualização do objeto em foco. Entretanto, as demais rotações influenciam demasiadamente sobre a observação. Também se percebeu que anéis retangulares não são próprios para o problema proposto, uma vez que iriam colidir uns com os outros, tornando anéis circulares a melhor solução.

Mediante cálculos, também se provou que, para ângulos pequenos, uma sequência de rotações aplicadas sobre um sistema de coordenadas local influi infimamente comparada à sequência inversa. Assim dito, simular um *roll* seguido de *pitch* tem o mesmo resultado que um *pitch* seguido de *roll*, para ângulos pequenos.

Atestou-se com um software que deslocamentos sobre a superfície da Terra, dado um campo de visão razoavelmente amplo do telescópio, teriam efeitos muito pequenos a não que sejam da ordem de quilômetros.

As implicações deste trabalho contribuem para o desenvolvimento científico astronômico para a obtenção de dados em qualquer ponto navegável da Terra, enquanto para o meio naval o sistema estabilizador tem aplicações para o meio militar, pesquisas e transporte de objetos delicados.

REFERÊNCIAS

DIAS-OLIVEIRA, A. et al. Analysis of 25 mutual eclipses and occultations between the Galilean satellites observed from Brazil in 2009. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 432, n. 1, p.225-242, 12 abr. 2013.

EMELYANOV, N. V. Mutual occultations and eclipses of the Galilean satellites of Jupiter in 2002-2003: final astrometric results. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 394, n. 2, p.1037-1044, 1 abr. 2009.

KUGA, H. K.; CARRARA, V.; RAO, K. R. **Introdução à mecânica orbital**. 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2012. 67 p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/263198643_INTRODUCAO_A_MECANICA_ORBITAL_-2A_EDICAO>. Acesso em: 15 abr. 2018.

MIT PLANETARY ASTRONOMY LAB (Massachusetts) (Org.). **Stellar occultations**. 2011. Disponível em: <<http://occult.mit.edu/research/stellarOccultations.php>>. Acesso em: 24 abr. 2018.

RIBAS, F. B. **Chariklo 19/02/2012**. 2012. Disponível em: <http://www.lesia.obspm.fr/perso/braga-ribas/campaigns/2012-02-19_Chariklo.html>. Acesso em: 03 maio 2018.

MERIAM, J. L.; KRAIGE, L. G. **Engineering Mechanics: Dynamics**. 7. ed. Hooken, Nj: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 750 p.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russel; CLAUSEN, William E.. **Mecânica Vetorial para Engenheiros: Dinâmica**. 7. ed. Rio de Janeiro: Mcgraw-hill Interamericana do Brasil, 2006. 2 v.

MARINE MOTION CONTROL LLC (Estados Unidos). Richard H. Akers. **Gyroestabilizer for small boats**. EUA nº US 7,240,630 B2, 04 out. 2004, 14 abr. 2005. 2007. . Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US7240630>>. Acesso em: 21 abr. 2018.

LIMA NETO, Gastão Bierrenbach. **Astronomia de Posição:** Notas de Aula – Versão 09/02/2018. 2018. Disponível em: <<http://www.astro.iag.usp.br/~gastao/astroposicao.html>>. Acesso em: 26 mar. 2018.

STEWART, Robert H. **Introduction to Physical Oceanography.** [s. l.]: Department Of Oceanography Texas A & M University, 2008. 345 p. Disponível em: <http://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/160216/stewart_textbook_physical%20oceanography.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 ago. 2018.

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (França). **The International System of Units (SI).** 8. ed. [s.l.]: Organisation Intergouvernementale de La Convention Du Mètre, 2006. 180 p. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bureau_International_des_Poids_et_Mesures>. Acesso em: 25 out. 2018.

GEHRZ, R. D. et al. **Status of the Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA).** [s.l.]: Nasa, 2014. 35 p.

DNV GL. DNV GL rules for classification: Ships (RU-SHIP), Part 3 Hull, Ch.4 Loads. Noruega, 2018. Disponível em: [https://rules.dnvgl.com/ServiceDocuments/dnvgl/#!/industry/1/Maritime/1/DNV%20GL%20rules%20for%20classification:%20Ships%20\(RU-SHIP\)](https://rules.dnvgl.com/ServiceDocuments/dnvgl/#!/industry/1/Maritime/1/DNV%20GL%20rules%20for%20classification:%20Ships%20(RU-SHIP)). Acesso em 27/10/2018.

BREDENKAMP, Adolf Friedrich Ludwig. **Development and Control of a 3-axis Stabilised Platform.** 2007. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Master Of Science In Electronic Engineering, Department Of Electrical And Electronic Engineering, University Of Stellenbosch, Matieland, South Africa, 2007.

LEWIS, Edward V.. **Principles of Naval Architecture:** Volume III Motions in Waves and Controllability. 2. ed. Jersey City, Nj: The Society Of Naval Architects And Marine Engineers, 1989. 429 p. 3 v. Disponível em: <<https://www.scribd.com/doc/144293388/Principles-of-Naval-Architecture-Vol-III-Motions-in-Waves-and-Controllability>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

BALACHANDRAN, Balakumar; MAGRAB, Edward B.. **Vibrações Mecânicas**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 616 p.

APÊNDICE A – Equacionamentos dos Momentos Angulares das Plataformas

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{L}}_1 &= \left[-\dot{\phi}\dot{\theta}_1 \sin \phi + \ddot{\theta}_1 \cos \phi \right] \hat{I} \\
&+ \left[\dot{\theta} \left(-\dot{\theta}_1 \cos \theta \sin \phi - \dot{\phi} \sin \theta \right) + \dot{\phi} \left(-\dot{\theta}_1 \sin \theta \cos \phi \right) - \ddot{\theta}_1 \sin \theta \sin \phi + \ddot{\phi} \cos \theta \right] \hat{J} \\
&+ \left[\dot{\theta} \left(-\dot{\theta}_1 \sin \theta \sin \phi + \dot{\phi} \cos \theta \right) + \dot{\phi} \left(\dot{\theta}_1 \cos \theta \cos \phi \right) + \ddot{\theta}_1 \cos \theta \sin \phi + \ddot{\phi} \sin \theta \right] \hat{K} \\
\\
\dot{\mathbf{L}}_2 &= \left\{ \dot{\phi} \left[-\dot{\phi}_2 \sin \theta_1 \cos \phi - \dot{\theta}_1 \sin \phi \right] - \left[\dot{\theta}_1^2 \cos \theta_1 \sin \phi \right] + \ddot{\theta}_1 \cos \phi - \ddot{\phi}_2 \sin \theta_1 \sin \phi \right\} \hat{I} \\
&+ \left\{ \dot{\theta} \left[\dot{\phi}_2 \left(-\cos \theta_1 \sin \theta + \sin \theta_1 \cos \theta \cos \phi \right) - \dot{\theta}_1 \cos \theta \sin \phi \right] + \dot{\phi} \left[\dot{\phi}_2 \sin \theta_1 \sin \theta \sin \phi - \dot{\theta}_1 \sin \theta \cos \phi \right] + \dot{\theta}_1 \left[\dot{\phi}_2 \left(-\sin \theta_1 \cos \theta + \cos \theta_1 \sin \theta \cos \phi \right) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \dot{\theta}_1 \sin \theta \sin \phi + \ddot{\phi}_2 \left(\cos \theta_1 \cos \theta + \sin \theta_1 \sin \theta \cos \phi \right) \right] \right\} \hat{J} \\
&+ \left\{ \dot{\theta} \left[\dot{\phi}_2 \left(\cos \theta_1 \cos \theta - \sin \theta_1 \sin \theta \cos \phi \right) - \dot{\theta}_1 \sin \theta \sin \phi \right] + \dot{\phi} \left[-\dot{\phi}_2 \sin \theta_1 \cos \theta \sin \phi + \dot{\theta}_1 \cos \theta \cos \phi \right] + \dot{\theta}_1 \left[\dot{\phi}_2 \left(-\sin \theta_1 \sin \theta + \cos \theta_1 \cos \theta \cos \phi \right) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \dot{\theta}_1 \cos \theta \sin \phi + \ddot{\phi}_2 \left(\cos \theta_1 \sin \theta + \sin \theta_1 \cos \theta \cos \phi \right) \right] \right\} \hat{K}
\end{aligned}$$

ANEXO A – Solução do Sistema Dinâmico proposto por Bredenkamp (2007)

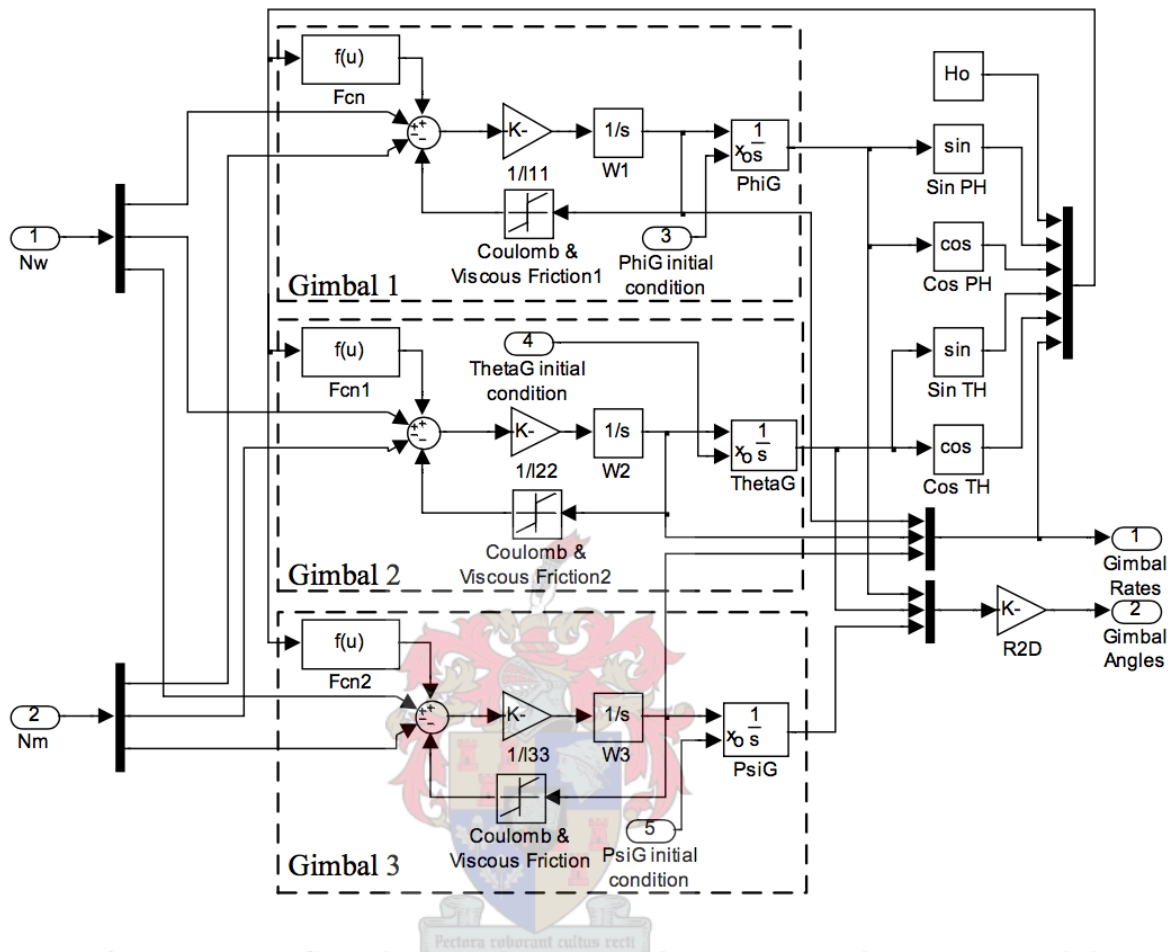


Figure 4.1: Simulation diagram of gyroscope dynamic model

ANEXO B – Página 27 da norma da DNV GL para Navios, pt.3 cap.4

SECTION 3 SHIP MOTIONS AND ACCELERATIONS

Symbols

For symbols not defined in this section, see Ch.1 Sec.4.

- a_0 = acceleration parameter, shall be taken as:
- $$a_0 = \left(1.58 - 0.47C_B\right) \left(\frac{2.4}{\sqrt{L}} + \frac{3.4}{L} - \frac{600}{L^2}\right)$$
- T_θ = roll period, in s, as defined in [2.1.1]
 θ = roll angle, in deg, as defined in [2.1.1]
 T_φ = pitch period, in s, as defined in [2.1.2]
 φ = pitch angle, in deg, as defined in [2.1.2]
 R = vertical coordinate, in m, of the ship rotation centre, shall be taken as:
- $$R = \min\left(\frac{D}{4} + \frac{T_{LC}}{2}, \frac{D}{2}\right)$$
- C_{XG} , C_{XS} , C_{XB} , C_{YG} , C_{YS} , C_{YB} , C_{ZB} , C_{ZP} = load combination factors, as defined in Sec.2
- a_{roll-y} = transverse acceleration due to roll, in m/s^2 , as defined in [3.3.2]
 $a_{pitch-x}$ = longitudinal acceleration due to pitch, in m/s^2 , as defined in [3.3.1]
 a_{roll-z} = vertical acceleration due to roll, in m/s^2 , as defined in [3.3.3]
 $a_{pitch-z}$ = vertical acceleration due to pitch, in m/s^2 , as defined in [3.3.3]
 f_T = ratio between draught at a loading condition and scantling draught, shall be taken as:
- $$f_T = \frac{T_{LC}}{T_{SC}}, \text{ but shall not be taken less than } 0.5$$
- T_{LC} = draught, in m, amidships for the considered loading condition. In case loading condition is not defined, $T_{LC} = T_{SC}$ shall be applied
 x, y, z = X, Y and Z coordinates, in m, of the considered point with respect to the coordinate system, as defined in Sec.1 [1.2.1]
 f_β = heading correction factor, shall be taken as:
for strength assessment:
 $f_\beta = 1.0$ in general
 $f_\beta = 0.8$ for BSR and BSP load cases for the extreme sea loads design load scenario
for fatigue assessment:
 $f_\beta = 1.0$
 f_{ps} = coefficient for strength assessments which is dependant on the applicable design load scenario specified in Sec.7, and shall be taken as:
 $f_{ps} = 1.0$ for extreme sea loads design load scenario
 $f_{ps} = f_r$ for extreme sea loads design load scenario for vessels with service restriction
 $f_{ps} = 0.8$ for the ballast water exchange design load scenario
 $f_{ps} = 0.8 \cdot f_r$ for the ballast water exchange design load scenario for vessels with service restriction
 f_r = reduction factor related to service restrictions as defined in Pt.1 Ch.2 Sec.5:
1.0 for service area notation **R0** (No reduction)
0.9 for service area notation **R1** (10% reduction)
0.8 for service area notation **R2** (20% reduction)

ANEXO C – Página 28 da norma da DNV GL para Navios, pt.3 cap.4

0.7 for service area notation **R3** (30% reduction)
 0.6 for service area notation **R4** (40% reduction)
 0.5 for service area notation **RE** (50% reduction)
 f_R = factor related to the operational profile, as defined in Ch.9 Sec.4 [4.3].

1 General

1.1 Definition

1.1.1 The ship motions and accelerations are assumed to be sinusoidal. The motion values defined by the formulae in this section are single amplitudes, i.e. half of the crest to trough height.

2 Ship motions and accelerations

2.1 Ship motions

2.1.1 Roll motion

The roll period, in s, shall be taken as:

$$T_{\theta} = \frac{2.3\pi k_r}{\sqrt{g GM}}$$

The roll angle, in deg, shall be taken as:

$$\theta = \frac{9000(1.4 - 0.035T_{\theta})f_p f_{BK}}{(1.15B + 55)\pi}$$

where:

- f_p = coefficient shall be taken as:
 $f_p = f_{ps}$ for strength assessment
 $f_p = f_R(0.23 - 4f_T B \cdot 10^{-4})$ for fatigue assessment
- f_{BK} = shall be taken as:
 $f_{BK} = 1.2$ for ships without bilge keel
 $f_{BK} = 1.0$ for ships with bilge keel
- k_r = roll radius of gyration, in m, in the considered loading condition. In case k_r has not been calculated, the following values may be used
 $k_r = 0.39 B$ in general
 $k_r = 0.35 B$ for tankers in ballast
 For fatigue, default values are given in Ch.9.
- GM = metacentric height, in m, in the considered loading condition, minimum $0.05 B$. In case GM has not been calculated, the following values may be adopted:
 $GM = 0.07 B$ in general
 $GM = 0.12 B$ for tankers
 $GM = 0.05 B$ for container ship with $B \leq 32.2$ m
 $GM = 0.11 B$ for container ship with $B \geq 40.0$ m

ANEXO D – Página 28 da norma da DNV GL para Navios, pt.3 cap.4

Linear interpolation may be used for $32.2 \text{ m} \leq B \leq 40.0 \text{ m}$.
For fatigue, default values are given in Ch.9.

2.1.2 Pitch motion

The pitch period, in s, shall be taken as:

$$T_{\varphi} = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_{\varphi}}{g}}$$

where:

$$\lambda_{\varphi} = 0.6(1 + f_T)L$$

The pitch angle, in deg, shall be taken as given in formula below and need not to be taken greater than 20 degree.

$$\varphi = 920f_p L^{-0.84} \left\{ 1.0 + \left(\frac{2.57}{\sqrt{gL}} \right)^{1.2} \right\}$$

where:

f_p = coefficient shall be taken as:
 $f_p = f_{ps}$ for strength assessment
 $f_p = f_R \left[(0.27 - 0.02f_T) - (13 - 5f_T) \cdot L \cdot 10^{-5} \right]$ for fatigue assessment.

2.2 Ship accelerations at the centre of gravity

2.2.1 Surge acceleration

The longitudinal acceleration due to surge, in m/s^2 , shall be taken as:

$$a_{surge} = 0.2 \left(1.6 + \frac{1.5}{\sqrt{gL}} \right) f_p a_0 g$$

where:

f_p = coefficient shall be taken as:
 $f_p = f_{ps}$ for strength assessment
 $f_p = f_R \left[0.27 - (15 + 4f_T)L \cdot 10^{-5} \right]$ for fatigue assessment.

2.2.2 Sway acceleration

The transverse acceleration due to sway, in m/s^2 , shall be taken as:

$$a_{sway} = 0.3 \left(2.25 - \frac{20}{\sqrt{gL}} \right) f_p a_0 g$$

where:

f_p = coefficient shall be taken as:
 $f_p = f_{ps}$ for strength assessment