

**MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
Sistema de Controle e Eletricidade de Navios**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**SISTEMA DE CONTROLE DO GOVERNO DO NAVIO: Uma análise da modelagem em
Simscape.**



PRIMEIRO- TENENTE MATHEUS COSTA DE ASSIS

Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO- TENENTE MATHEUS COSTA DE ASSIS
SISTEMA DE CONTROLE DO GOVERNO DO NAVIO: Uma análise da modelagem em
Simscape.

Monografia apresentada ao Centro de Instrução
Almirante Alexandrino como requisito parcial à
conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em
Sistema de Controle e Eletricidade de Navios.

Orientadores:

DSc Alessandro Jacoud Peixoto

CT (EN) MSc Victor Hugo Almeida Cruz

CIAA
Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO- TENENTE MATHEUS COSTA DE ASSIS

SISTEMA DE CONTROLE DO GOVERNO DO NAVIO: Uma análise da modelagem em
Simscape.

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial
à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistema de Controle e Eletricidade de
Navios.

Aprovada em 24 de novembro de 2023.

Banca Examinadora:

Alessandro Jacoud Peixoto, DSc - UFRJ



CT (EN) Victor Hugo Almeida Cruz, MSc-UFRJ



CIAA
Rio de Janeiro
2023

À minha família, e a todos que de alguma
maneira me apoiaram nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Não poderia me furtar de agradecer ao constante e incondicional apoio da minha esposa Margaux, motivo inspirador de todos os dias. E à minha família, sou grato por tê-los ao meu lado, pois são um porto seguro. Aos professores e em especial ao orientador CT(EN) Hugo, o qual municiado de grande paciência acompanhou-me nos momentos de dificuldade. Espero aqui ter cumprido com meu dever, e agradeço por nunca estar sozinho em minhas batalhas.

“Espero poder cumprir o meu dever de brasileiro até ao sacrifício.
Cumprir o vosso.”

Almirante Saldanha da Gama

SISTEMA DE CONTROLE DO GOVERNO DO NAVIO: Uma análise da modelagem em Simscape.

Resumo

A simulação é uma ferramenta importante para avaliar um sistema de controle do governo de um navio. Neste trabalho foi descrita a utilização do ambiente de simulação Simscape na modelagem física do sistema de controle do rumo do navio. O Simscape permite implementar o modelo, utilizando um método de modelagem física em que as equações do sistema dinâmico são transformadas em diagramas de blocos físicos interligados, de modo a representar desta forma a estrutura do sistema modelado. O desempenho do controle de rumo do modelo de navio foi analisado por simulação à luz das hipóteses existentes e dos testes de validação previamente realizados com dados operacionais. Os resultados obtidos a partir da sequência de manobras de mudança de rumo servem para demonstrar a utilidade da abordagem baseada na modelagem física, com elevada precisão e baixo custo computacional, quando comparada com a abordagem clássica baseada em equações diferenciais ou com os diagramas adimensionais orientados por blocos. Desse modo, o trabalho propõe uma modelagem física no ambiente Simscape de um Sistema de Controle do Governo do Navio, que possa ser utilizado pela Marinha do Brasil, com o intuito de realizar testes de parâmetros de controladores.

Palavras-chave: Sistema de Governo; Sistema de Controle; Máquina do Leme; Leme; Simscape; Modelagem Simscape; Modelagem Controle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Timão.	18
Figura 2: Batentes.	19
Figura 3: Visão longitudinal do leme.	19
Figura 4: Monitor do ângulo de leme real.	21
Figura 5: Monitor do ângulo de leme desejado.	22
Figura 6: Dinâmica do sistema de governo.	22
Figura 7: Par de polos complexos no plano-s.	26
Figura 8: (a) Sistema de malha aberta. (b) Sistema de malha fechada.	30
Figura 9: Sistema em malha fechada.	33
Figura 10: Diagrama de blocos do controlador PID: (a) Com o termo D na realimentação; e (b) Com o termo D na malha direta.	37
Figura 11: Diagrama de blocos do controle em cascata para um HEV.	38
Figura 12: Estrutura do sistema de controle do governo do navio, em subsistemas físicos.	42
Figura 13: Dinâmica de movimentos rotacionais e translacionais do navio.	43
Figura 14: Modelo matemático de um navio no <i>simulink</i>	44
Figura 15: Modelo físico da válvula de acionamento.	45
Figura 16: Modelo físico do Atuador Hidráulico.	45
Figura 17: Modelo físico do controle do atuador.	46
Figura 18: Modelo físico do circuito de controle do atuador hidráulico (controlador P).	46
Figura 19: Modelo físico do leme no Simscape.	47
Figura 20: Conversor ângulo-tensão.	48
Figura 21: Comparador de ângulo.	48
Figura 22: Modelo em Simscape de um giroscópio.	49
Figura 23: Modelo em Simscape do controlador PD.	50
Figura 24: Interface do modo de governo automático.	51
Figura 25: Implementação do sistema de controle do governo do navio no Simscape.	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Respostas temporais associadas com pontos no plano s (sp_e , semiplano esquerdo; sp_d , semiplano direito).	27
Gráfico 2: Respostas ao degrau para os casos de amortecimento de sistemas de segunda ordem.	29
Gráfico 3: Resposta ao degrau unitário.	32
Gráfico 4: Sintonização controlador P, sistema em Malha Aberta.....	53
Gráfico 5: Sintonização controlador PD, com referências de ângulo em graus.	55
Gráfico 6: Simulação do sistema considerando a entrada ZigZag, $K_p=1$ e $K_d=18$, referências de ângulo em graus.	57
Gráfico 7: Simulação do sistema considerando a entrada degrau, $K_p=1$ e $K_d=18$, referências de ângulo em graus.....	58
Gráfico 8: Simulação do sistema considerando a entrada rampa, $K_p=1$ e $K_d=18$	59
Gráfico 9: Simulação do sistema no modo de governo automático, considerando a entrada zigzag, ângulo de leme limitado a 20° , $K_p=1$ e $K_d=18$	60

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

GPS	<i>Global Position System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
MATLAB	<i>software</i> de computação numérica da empresa MathWorks
P	Proporcional
PD	Proporcional Derivativo
PID	Proporcional Integral Derivativo
TVF	Teorema do Valor Final
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>

LISTAS DE SÍMBOLOS

π	Constante matemática com valor aproximado de 3,1415
$c(t)$	Resposta do sistema
$ctr(t)$	Resposta transitória
$css(\infty)$	Resposta estacionária
ω_n	Frequência natural
ω_d	Frequência natural amortecida
ζ	Coefficiente de amortecimento
s	Polo da função de transferência
k	Constante
k_p	Constante associada ao controlador proporcional
k_i	Constante associada ao controlador integral
k_d	Constante associada ao controlador derivativo
η	Dinâmica do navio relativa ao eixo especificado
Res	Resistência

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	15
1.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	15
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	15
1.3	OBJETIVOS	16
1.3.1	OBJETIVO GERAL	16
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	<u>REFERENCIAL TEÓRICO</u>	17
2.1	O SISTEMA DE GOVERNO	17
2.1.1	DEFINIÇÕES	17
2.1.2	ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE GOVERNO	19
2.2	SISTEMA DE CONTROLE	22
2.2.1	ELEMENTOS DO CONTROLE CLÁSSICO:	22
2.2.2	OBJETIVO DO SISTEMA DE CONTROLE	23
2.2.3	FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE UM SISTEMA	24
2.2.4	SISTEMAS DE SEGUNDA ORDEM	25
2.2.5	ESTABILIDADE	26
2.2.6	AMORTECIMENTO	27
2.2.7	CLASSIFICAÇÃO QUANTO A REALIMENTAÇÃO	29
2.2.8	ANÁLISE DA RESPOSTA	30
2.2.9	ESPECIFICAÇÕES DE DESEMPENHO DO SISTEMA COM BASE NO ERRO EM REGIME PERMANENTE OU CONSTANTES DE ERRO ESTÁTICO	32
2.2.10	CONTROLADORES ANALÓGICOS	35
2.2.11	CONTROLE EM CASCATA	37
2.3	SISTEMA DE CONTROLE DO GOVERNO DO NAVIO:	38
3	<u>METODOLOGIA</u>	40
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	40

4	DESCRIÇÃO E ANÁLISE DO CASO	41
4.1	MODELAGEM E SIMULAÇÕES NO SIMSCAPE	41
4.2	MODELAGEM DO NAVIO	42
4.2.1	MODELAGEM MATEMÁTICA DA DINÂMICA DO NAVIO	42
4.3	MODELAGEM FÍSICA DO CONTROLE DO ATUADOR	44
4.3.1	MODELAGEM FÍSICA DO ATUADOR HIDRÁULICO	44
4.3.2	MODELAGEM FÍSICA DO CONTROLE DO ATUADOR HIDRÁULICO	45
4.3.3	MODELAGEM FÍSICA DO LEME	46
4.3.4	MODELAGEM FÍSICA DO COMPARADOR DE ÂNGULO	47
4.4	MODELAGEM DO GIROSCÓPIO	48
4.5	MODELAGEM FÍSICA DO CONTROLADOR PD	49
4.6	MODELAGEM DA INTERFACE DO OPERADOR	50
4.7	IMPLEMENTANDO O SISTEMA DE CONTROLE DO GOVERNO DO NAVIO	51
4.8	ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES	52
4.8.1	ANÁLISE DO CONTROLADOR P DO ATUADOR HIDRÁULICO	52
4.8.2	ANÁLISE DO CONTROLADOR PD	54
4.8.3	ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DO GOVERNO DO NAVIO	56
5	CONCLUSÃO	61
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE – A	64

1 INTRODUÇÃO

A concepção de um Controlador do Sistema de Governo de um Navio de Superfície começa com a formulação de um modelo matemático adequado que descreva as propriedades físicas na sua totalidade. A modelagem exata de um navio e a estimativa de todas as variáveis constituem um desafio, uma vez que os navios estão sempre sob a influência de inúmeras forças e momentos, tanto externos como internos (Das S; Tatole S, 2016).

Com o fim de evitar dispendiosos gastos com testes em escala do Navio, a utilização de modelos matemáticos, quer para prever a capacidade de manobra do Navio, quer para o refinamento do Sistema de Controle, é de suma importância (Perez T; Blanke M, 2002).

Existem diversos programas computacionais, de uso geral ou especializados, que permitem a modelagem de sistemas físicos dinâmicos. O MATLAB-*Simulink* é um ambiente de simulação de uso geral amplamente utilizado na modelagem Sistemas de Controle do Governo de Navios (Das, 2020).

Nesse sentido, este trabalho utiliza o MATLAB-Simscape para implementar a modelagem física de um navio e o seu sistema de controle do leme, sintonizando o controlador da máquina do leme utilizando o *Simulink*, e finalmente validar o modelo e o controle por meio de simulações, ainda na plataforma *Simulink*.

1.1 Apresentação do Problema

Uma vez que a hidrodinâmica envolvida no governo de um navio é não linear, as equações diferenciais não lineares acopladas são essenciais para descrever completamente a manobra do navio. Sendo um modelo complexo baseado em leis físicas que requer um conhecimento aprofundado de cada um dos fenômenos envolvidos, a identificação dos parâmetros, a sua relação mútua e a influência de várias perturbações externas e internas. No caso dos navios, o método não só é dispendioso como também tem de ser repetido para cada tipo de navio. Por conseguinte, na indústria naval, para desenvolver um sistema de controle do governo do navio, são utilizados modelos matemáticos relativamente mais simples que descrevem as dinâmicas mais importantes (Das S; Tatole S, 2016).

1.2 Justificativa e Relevância

Os resultados obtidos através da utilização de sequências de manobras de alteração de rumo com perturbações variáveis servem para demonstrar a utilidade da abordagem baseada na

modelagem física, com elevada precisão e baixo custo computacional, quando comparada com a abordagem clássica baseada em equações diferenciais ou com os custosos testes operacionais com modelos em escala.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

A partir da modelagem do comportamento de um navio, identificar um modelo do sistema de controle, então através de simulações validá-lo, baseando-se em parâmetros operacionais desejáveis de um sistema de referência. Sendo todas as simulações e modelagens criadas a partir da aplicação Matlab, utilizando as ferramentas Simscape/ *Simulink*.

1.3.2 Objetivos Específicos

O trabalho propõem uma modelagem física no ambiente Simscape de um sistema de controle do governo do navio, que possa ser utilizado pela Marinha do Brasil, com o intuito de realizar testes de parâmetros de controladores de sistemas de governo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O Sistema de Governo

O Sistema de Governo do Navio permite uma solução para o problema principal da navegação para o qual o Capitão de Mar e Guerra (CMG) Altineu Pires Miguens (1996), define como: “Navegação é a ciência e a arte de conduzir, com segurança, um Navio (ou embarcação) de um ponto a outro da superfície da terra”.

Dos primeiros Sistemas projetados com cabos de força e roldanas, até as tecnologias atuais de transmissão de força hidráulica, o contínuo aprimoramento busca aumentar a sua disponibilidade e confiabilidade, critérios fundamentais na escolha de um equipamento de alto nível de criticidade para o navio.

2.1.1 Definições

De acordo com o CMG Maurílio Fonseca (2019), são definidas as seguintes partes constituintes do Sistema de Governo:

Timão: Aparelho que pode ser nomeado como a Roda do Leme (Figura 1). Localiza-se no passadiço e em navios de guerra há redundância, sendo também instalado em uma estação chamada de Governo Secundário. O movimento do timão irá guiar o direcionamento do leme, conforme marcações de ângulos desejados;

Máquina do Leme: Recebe esse nome, pois é o compartimento onde estão localizadas as máquinas responsáveis pelo efetivo movimento do leme. Estão alocados aqui os conversores de sinais, a bomba de óleo, cilindro de força, madre do leme, potenciômetros, válvulas solenóides, pressostatos e demais componentes que venham a constar no Sistema.

Leme: Aparelho que realiza o governo da embarcação, suas partes principais são madre, cabeça e porta do leme.

Cabeça do Leme: é a parte de cima, onde emecha a cana do leme;

Madre: Considerado o eixo do leme. Sofre grandes esforços de flexão e de torção. Transpassa o casco do navio e por ela é transmitido o movimento ao leme;

Cana: Barra horizontal encaixada na cabeça da madre, onde atua a máquina do leme;

Barra de ligação (*tie bar*): Utilizada em navios que possuem dois lemes, consiste em uma haste de comprimento regulável conectada às canas dos lemes, que sincroniza o movimento dos mesmos.

Porta do Leme: Parte do Leme que suporta a pressão da água.

Batentes – São batentes que limitam o ângulo do leme para ambos os bordos, localizados na madre do leme, conforme a Figura 2. Esse limite nos navios de guerra geralmente variam de 30° a 35°.

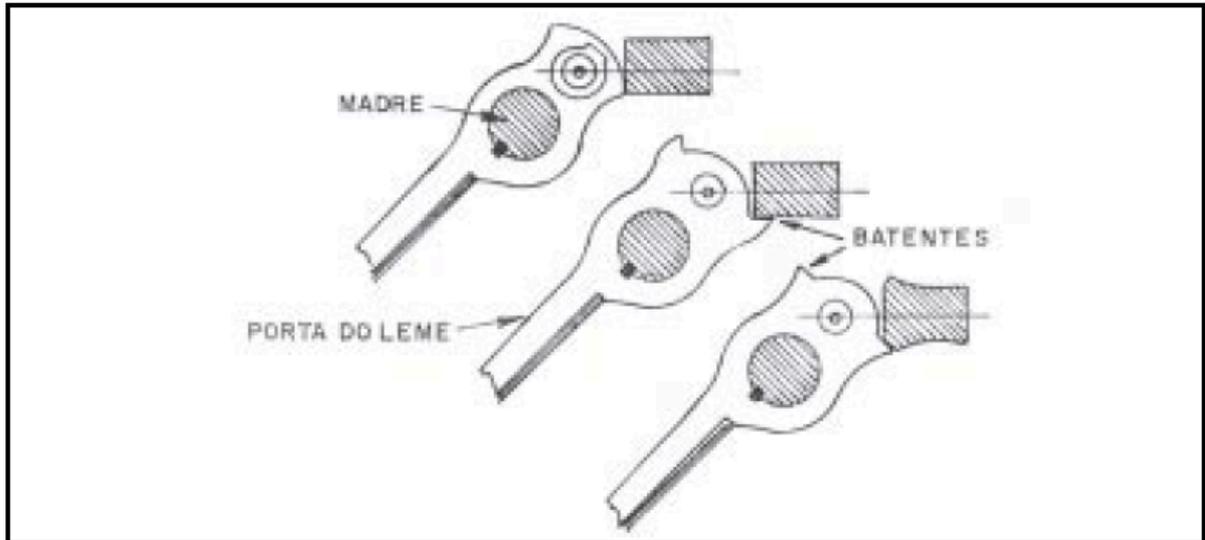
Na Figura 3, é apresentado um recorte longitudinal do leme, onde é possível localizar a porta do leme e a madre.

Figura 1: Timão.



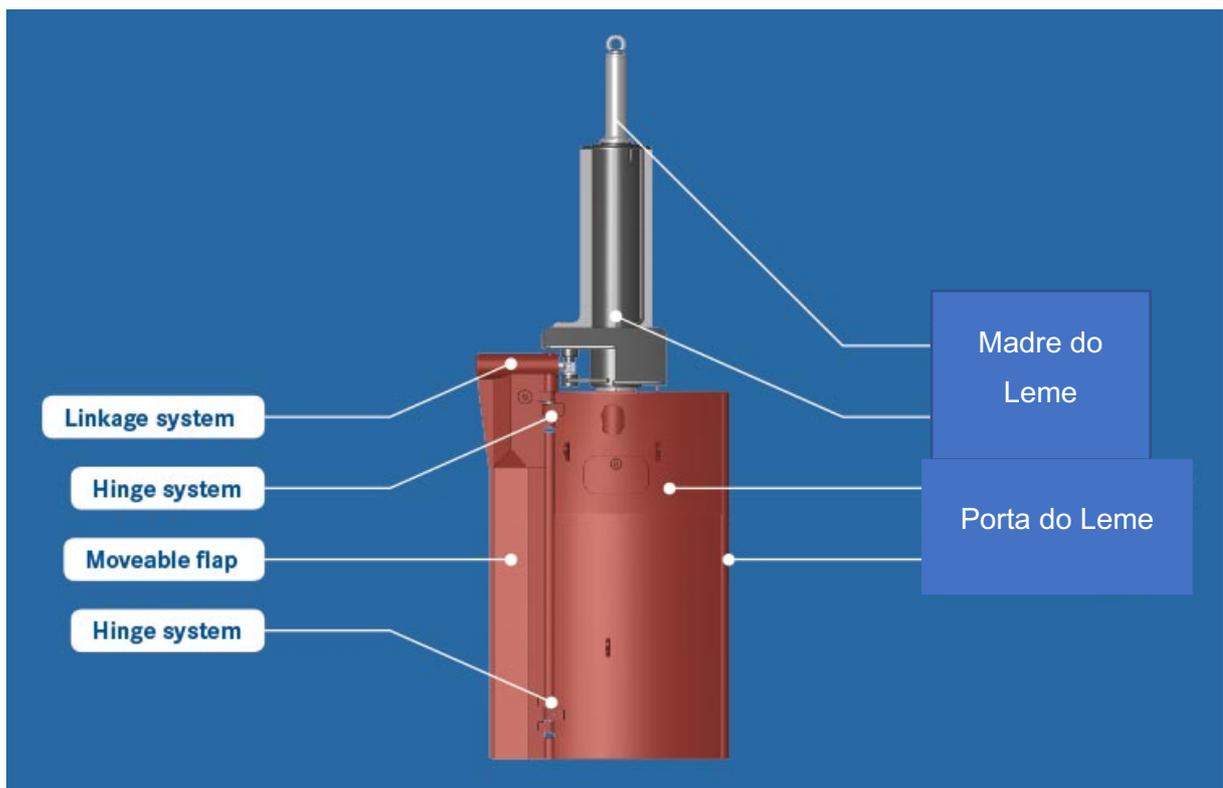
Fonte: Acervo do autor.

Figura 2: Batentes.



Fonte: Arte Naval, 2002.

Figura 3: Visão longitudinal do leme.



Fonte: Becker Marine Systems.

2.1.2 Análise do funcionamento do Sistema de Governo

O Sistema a ser analisado é composto por 4 modos de governo, sendo eles: automático, principal, por ângulos e de emergência (Marinha do Brasil, 2000).

1- Automático: O timoneiro introduz o valor de rumo desejado e a tolerância ao desvio, ainda poderá limitar o ângulo do leme a ser utilizado na guinada e na correção do desvio, bem como há opção para compensar mau tempo. Dessa forma, o governo do navio é processado automaticamente a partir do Sistema de Controle, sem que haja necessidade do timoneiro corrigir os desvios do rumo manualmente. Esse sistema recebe informação do sinal de referência da agulha (bússola) giroscópica e do odômetro, que envia sinal de comando para as válvulas solenoides direcionais do sistema hidráulico.

2- Principal/Manual: O timoneiro introduz o ângulo de leme operando o timão, as referências serão os indicadores de leme desejado e real (Figura 4 e Figura 5), que irão variar entre 0° e 30° para ambos os bordos, conforme foi estipulado 30° como máximo limite de ângulo do leme. Conforme o timão é movimentado, o sinal é enviado às solenoides direcionais do sistema hidráulico.

3- Por ângulos: O timoneiro introduz o ângulo de leme desejado operando uma manete de demanda. Tendo como referência os indicadores de ângulo desejado e real. Conforme a manete é movimentada, o sinal é enviado às solenoides direcionais do sistema hidráulico.

4- Emergência: O timoneiro introduz o ângulo de leme desejado em um volante que atua em uma bomba manual, havendo a possibilidade de transmissão de demanda para a bomba principal que movimentará os cilindros de força ou, em caso de perda da bomba principal, a partir de manobras de válvulas será possível deslocar diretamente o leme. Contudo, para essa última operação, a cada 30 voltas no volante, desloca-se o leme em 5° .

A fonte de potência principal da Máquina do Leme é eletro-hidráulica. Dois lemes, com madres espaçadas e interligadas pelo *tie-bar* que assegura a atuação simultânea das duas. As madres são acionadas por hastes e estas por êmbolos que são atuados pela pressão desenvolvida pelo fluido no sistema hidráulico.

Há dois conjuntos que geram a pressão hidráulica sendo cada um composto de um motor elétrico, uma bomba principal de débito variável e no mesmo eixo, uma bomba de recalque de deslocamento positivo e débito constante.

Apenas um conjunto de geração de potência hidráulica é usado de cada vez. Em situações de emergência ou que exijam que a redundância do Sistema esteja pronta para atuar, os dois conjuntos deverão estar igualmente funcionando; sendo assim, um dos conjuntos funcionará sem carga apenas recirculando o fluido hidráulico, mas assumirá automaticamente o controle do governo no caso em que falhe o conjunto que prioritariamente estava em carga.

Essa troca é efetivada automaticamente por um "interloque hidráulico" comum aos dois conjuntos. Cada um dos conjuntos possui um sistema hidráulico de controle pressurizado pela bomba de recalque, acionada pelo mesmo eixo da bomba principal.

Quando um sinal elétrico é transmitido de uma das estações de governo (passadiço, secundária de governo ou emergência) para as solenoides direcionais do sistema hidráulico, o sistema hidráulico de controle pressuriza um atuador linear e este opera o mecanismo de controle que faz variar a inclinação do dispositivo controlador do débito das bombas principais. O débito varia de 0 ao máximo, em um ou outro sentido, conforme o bordo da demanda do leme. A Figura 6 representa o fluxo de funcionamento do sistema.

A bomba principal passará, eventualmente, pela situação de débito zero, porém a bomba de recalque manterá, em funcionamento normal sua pressão constante sempre que ocorrer a inclinação nula do dispositivo variador do débito da bomba principal.

Quando a bomba principal estiver debitando, enviará sinal de alta pressão para o conjunto de comunicação de potência hidráulica. Este conjunto composto de válvulas de retenção, recebendo os sinais de entrada necessários, comunicará através do fluido, pressão de trabalho para os cilindros de força e o leme será deslocado com uma intensidade proporcional à duração do sinal elétrico de governo.

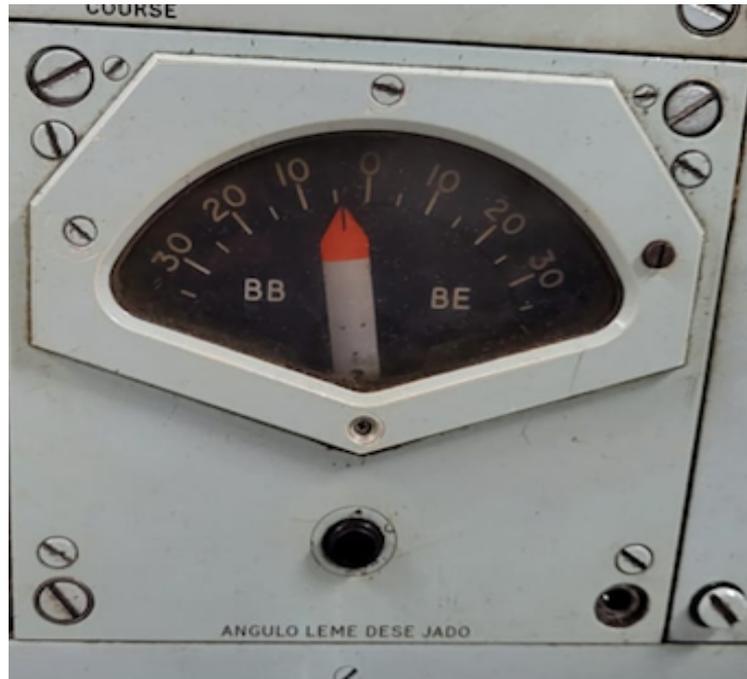
O sinal de resposta (*feedback*) gerado pela atuação dos lemes através da madre, informa gradativamente que os graus desejados estão sendo alcançados e à medida que isto acontece, vai retornando o dispositivo de controle de débito das bombas à situação de débito nulo preparando-as para debitar caso haja um eventual sinal de governo.

Figura 4: Monitor do ângulo de leme real.



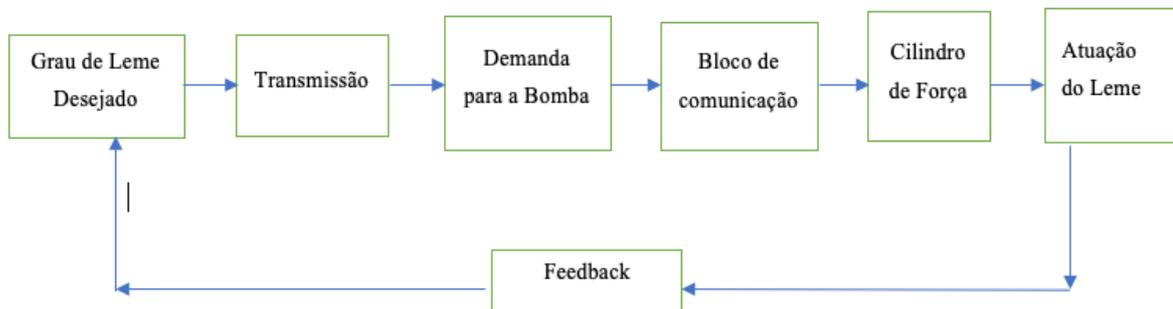
Fonte: Acervo do autor.

Figura 5: Monitor do ângulo de leme desejado.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 6: Dinâmica do sistema de governo.



Fonte: Produzido pelo autor com base nos dados de Marinha do Brasil, 2000.

2.2 Sistema de Controle

Controladores automáticos ganharam deferência conforme a demanda crescente de processos mais precisos e autônomos nos diversos ambientes industriais, militar, aeronáutico, naval, farmacêutico e outros campos da ciência e tecnologia.

2.2.1 Elementos do Controle Clássico:

A engenharia de controle desempenha um papel fundamental nos sistemas tecnológicos modernos. Assim, na concepção de sistemas de controle, o conhecimento da teoria do controle é cada vez mais significativo. Lançando mão de definições necessárias para o decorrer do

trabalho, serão elencados aqueles que são conceitos e elementos básicos da teoria do Controle Clássico (Ogata Katsuhiko, 2014):

Variável controlada: Valor, intensidade ou condição que é dimensionado e controlado.

Sinal de controle ou variável manipulada: É a grandeza modificada pelo controlador, que afetará diretamente a variável controlada. Ao longo deste trabalho, a variável controlada será a saída do sistema.

“Controlar significa medir o valor da variável controlada do sistema e aplicar o sinal de controle ao sistema para corrigir ou limitar os desvios do valor medido a partir de um valor desejado” (Ogata Katsuhiko, 2014, p.02).

Plantas: Será qualquer objeto físico que deseja-se controlar. Pode ser um atuador hidráulico, compressor ou planta de ar-condicionado.

Sistemas: Elementos que interagem para atingir determinado objetivo.

Distúrbios: “Um distúrbio é um sinal que tende a afetar de maneira adversa o valor da variável de saída de um sistema. Se um distúrbio for gerado dentro de um sistema, ele será chamado distúrbio interno, enquanto um distúrbio externo é aquele gerado fora do sistema e que se comporta como um sinal de entrada no sistema.” (Ogata Katsuhiko, 2014, p.03)

Controle com realimentação: Tipo de controle que quando há distúrbios no sistema, atua para reduzir a diferença entre o sinal de saída e a referência.

Resposta transitória e resposta estacionária: A resposta no tempo de um sistema de controle será estudada durante o período de transição do estado inicial ao final (resposta transitória) e um período mais longo até o infinito (resposta estacionária). Por resposta transitória, entende-se aquela que vai do estado inicial ao estado final. Assim, a resposta $c(t)$ do sistema pode ser expressa pela equação 2.1:

$$c(t) = ctr(t) + css(\infty) \quad (2.1)$$

em que o primeiro termo do lado direito da equação é a resposta transitória e o segundo é a resposta estacionária.

Sinais de testes: Os sinais de entrada geralmente são as funções degrau, rampa, parábola de aceleração, impulso, senoidais e ruído branco. A escolha por cada um deles dependerá da característica do sinal de entrada do sistema analisado.

2.2.2 Objetivo do Sistema de Controle

Conhecidos alguns dos elementos básicos do controle clássico, dentre aquilo que o trabalho propôs-se a expor, foi selecionado como objetivo do Sistema de Controle a definição de Norman Nise (2012, p.24), sendo esse: “obter uma saída desejada com um desempenho desejado dada uma entrada especificada”.

2.2.3 Função de Transferência de um Sistema

Para estudo de Sistemas, analisa-se a relação entre entrada e saída por uma função invariante no tempo, em sua forma laplaciana, chamada Função de Transferência.

Expressa por uma equação diferencial linear invariante no tempo é assente como o encadeamento entre a transformada de Laplace da saída (função de resposta) e a transformada de Laplace da entrada (função de excitação), considerando todas as condições iniciais nulas. Sendo a maior potência de s do denominador da função de transferência igual a n , o sistema será denominado sistema de ordem n (Ogata Katsuhiko, 2014). A equação 2.2, representa a função de transferência $G(s)$ com entrada $R(s)$ e saída $Y(s)$.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_{m-1}s + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n} \quad (2.2)$$

Sobre a Função de Transferência, ainda de acordo com o referido autor:

1. A função de transferência de um sistema é um forma de modelo matemático que compõem um método de operação para determinar a equação diferencial que relaciona a variável de saída à variável de entrada.

2. É uma propriedade inerente ao sistema, independente da grandeza e do comportamento da função de entrada.

3. As funções de transferência de diversos sistemas fisicamente diferentes podem ser idênticas, portanto as unidades estão dimensionadas para relacionar a entrada e a saída, contudo não fornece informações quanto a característica do sistema.

4. Conhecendo a função de transferência, ou seja, tendo a relação entre entrada e saída, poderá ser estudada a natureza do sistema, a partir de variações de sua entrada.

5. Se a função de transferência de um sistema for desconhecida, poderá ser determinada experimentalmente variando funções de entradas conhecidas, dessa forma precisando as respectivas respostas do sistema. Uma vez conhecida, a função de transferência fornecerá um detalhamento completo das características dinâmicas do sistema, independente de sua forma física.

6. As raízes do denominador e do numerador, respectivamente, da função de transferência são chamados de polos e zeros.

2.2.4 Sistemas de Segunda Ordem

É aquele em que o grau do denominador da Função de Transferência é igual a 2. Essas funções podem ser expressas pela equação característica 2.3:

$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\omega_n\zeta s + \omega_n^2} \quad (2.3)$$

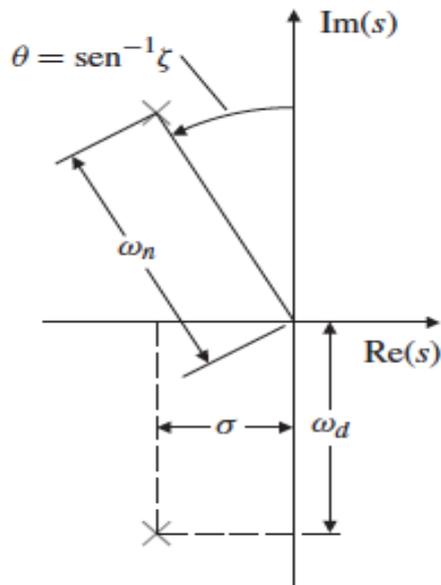
Onde, ω_n representa a frequência natural e ζ é o coeficiente de amortecimento do Sistema. Ainda, as raízes dessa equação característica podem ser escritas da seguinte forma:

$$s_1 = \sigma + \omega_d \text{ e } s_2 = \sigma - \omega_d$$

Sendo, ω_d a frequência natural amortecida, expressa por $\omega_d = \zeta\sqrt{1 - \omega_n}$. Através da análise dos polos será possível confirmar características naturais do Sistema (A Figura 7 representa um par de polos complexos no plano-s).

Os polos da função de transferência estão localizados em um raio de ω_n no plano-s e em um ângulo $\theta = \sin^{-1}\zeta$. Portanto, o coeficiente de amortecimento reflete o nível de amortecimento como uma fração do valor crítico de amortecimento, ponto onde os polos se tornam reais. Em coordenadas retangulares, os polos estão em $s = \sigma \pm \omega_d$. Quando $\zeta = 0$, não temos amortecimento, $\theta = 0$, e a frequência natural amortecida $\omega_d = \omega_n$, a frequência natural não amortecida (Powell Franklin, 2013, p.96).

Figura 7: Par de polos complexos no plano-s.



Fonte: Sistemas de Controle para Engenharia, 2013.

2.2.5 Estabilidade

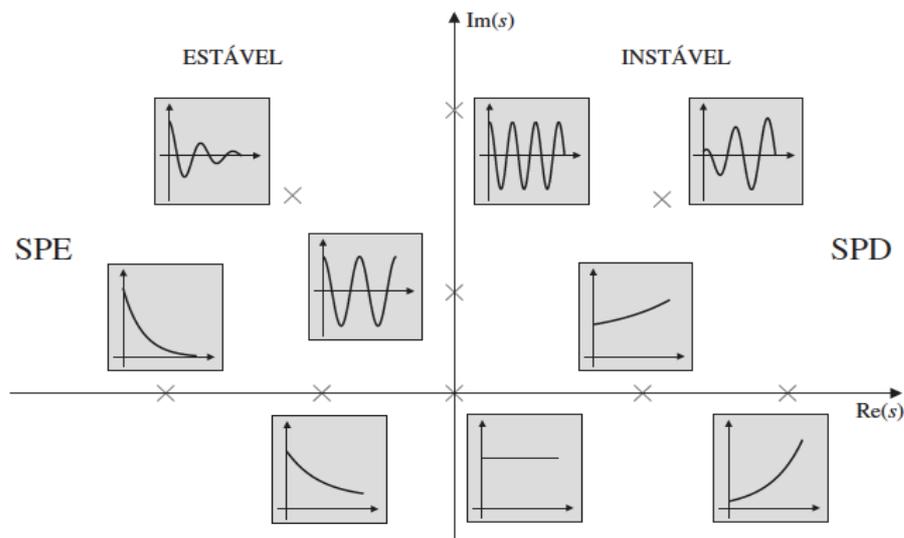
Pode ser verificada a estabilidade do Sistema observando a posição dos polos e zeros nos planos Imaginário ($j\omega$) e Real (σ). Portanto, a estabilidade é uma característica inerente ao Sistema e independe da Função de Entrada. Seguindo as definições de Katsuhiko Ogata (2014), se um desses polos pertencer ao semiplano direito do plano s , então, com o tempo, eles serão dominantes e a resposta transitória aumentará monotonicamente (preserva a relação de ordem, sempre crescente) ou oscilará com amplitude crescente. Isso representa um Sistema Instável.

Assim, a saída desse sistema poderá aumentar com o tempo. Se não alcançar um ponto de saturação do sistema ou não havendo um fim de curso mecânico (hard stop), então poderá danificar o sistema e apresentar falhas, tendo em vista que a resposta em um sistema físico real não pode aumentar infinitamente. Por isso, nos Sistemas Lineares de controle mais usuais não são toleráveis polos de malha fechada no semiplano direito do plano s .

Entretanto, com todos os polos de malha fechada estando à esquerda do eixo $\text{Im}(s)$, a resposta transitória alcançará o equilíbrio. Caracterizando um Sistema Estável. Já se os polos de malha fechada pertencerem ao eixo $\text{Im}(s)$, resultarão em oscilações em que a amplitude não decrescerá nem aumentará com o tempo. Contudo, conforme observa Katsuhiko Ogata (2014), nos casos práticos em que existem ruídos (interferências), a amplitude das oscilações aumentará a uma taxa estipulada pelo nível de potência do ruído. Logo, devido a essas oscilações um Sistema de Controle ideal não deve ter polos de malha fechada no eixo $\text{Im}(s)$.

Ainda observa-se que, estando os polos do lado esquerdo do eixo $\text{Im}(s)$ garante-se que o Sistema alcançará a estabilidade, porém não garante que a resposta transitória seja satisfatória. Para tal, são estudados métodos de sintonização que garantem uma localização ideal dos polos do Sistema, para que atenda os parâmetros preestabelecidos de resposta transitória e estacionária.

Gráfico 1: Respostas temporais associadas com pontos no plano s (spe, semiplano esquerdo; spd, semiplano direito).



Fonte: Sistemas de Controle para Engenharia, 2013.

2.2.6 Amortecimento

Um Sistema será classificado quanto a sua resposta natural em: Não amortecido, subamortecido, criticamente amortecido e superamortecido. Convém lançar mão dos conceitos de cada tipo de resposta, utilizados por Norman Nise (2012):

1. Respostas superamortecidas

Polos: dois reais em $-\sigma_1$ e $-\sigma_2$.

Resposta natural: duas exponenciais com constantes de tempo iguais ao inverso das posições dos polos. A equação 2.5 representa uma resposta superamortecida.

$$c(t) = K_1 e^{-\sigma_1 t} + K_2 e^{-\sigma_2 t} \quad (2.4)$$

2. Respostas subamortecidas

Polos: dois complexos em $-\sigma_d \pm j\omega_d$.

Resposta natural: senoide amortecida com uma envoltória exponencial cuja constante de tempo é igual ao inverso da parte real do polo. A frequência em radianos da senoide, a frequência de oscilação amortecida, é igual à parte imaginária dos polos. A equação 2.6 representa uma resposta subamortecida.

$$c(t) = A \cdot e^{-\sigma_d \cdot t} \cos(\omega_d t - \phi) \quad (2.5)$$

3. Respostas não amortecidas

Polos: dois imaginários em $\pm j\omega_1$

Resposta natural: senoide não amortecida com frequência em radianos igual à parte imaginária dos polos. A equação 2.7 representa uma resposta não amortecida.

$$c(t) = A \cos(\omega_1 \cdot t - \phi) \quad (2.6)$$

4. Respostas criticamente amortecidas

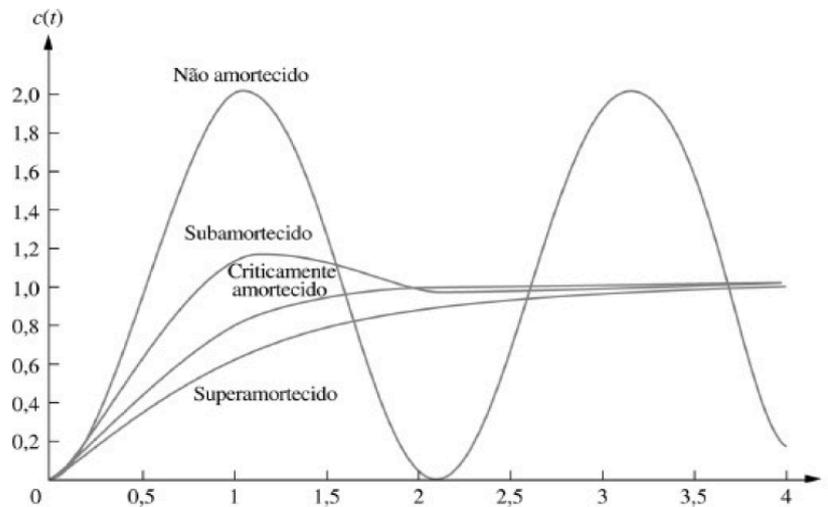
Polos: dois reais em $-\sigma_1$.

Resposta natural: um termo é uma exponencial cuja constante de tempo é igual ao inverso da posição do polo. O outro termo é o produto do tempo, t, por uma exponencial com constante de tempo igual ao inverso da posição do polo. A equação 2.8 representa uma resposta criticamente amortecida.

$$c(t) = K_1 e^{-\sigma_1 t} + K_2 t e^{-\sigma_2 t} \quad (2.7)$$

O diagrama abaixo superpõem as repostas mencionadas. Observa-se que a resposta criticamente amortecida separa aquelas superamortecidas das subamortecidas, e é a resposta mais rápida sem ultrapassar.

Gráfico 2: Respostas ao degrau para os casos de amortecimento de sistemas de segunda ordem.



Fonte: Engenharia de Sistemas de Controle, 2013.

2.2.7 Classificação quanto a realimentação

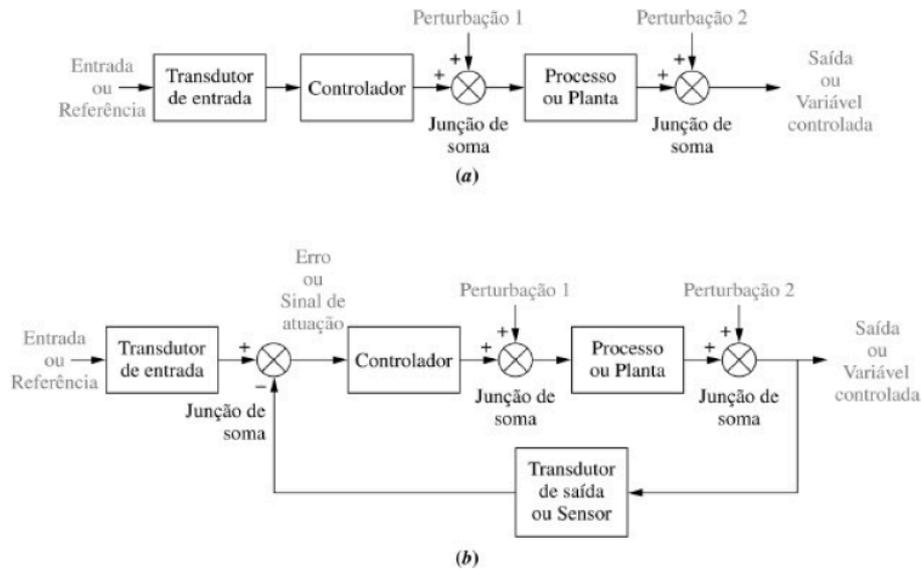
Os Sistemas de Controle são classificados quanto a sua realimentação em Sistemas de Controle de Malha Aberta ou Sistemas de Controle de Malha Fechada (Figura 8). Para Franklin Powell (2013, p.14), as diferenças são:

Malha Aberta: “No controle de malha aberta, o sistema resultante não contém um sensor para medição da saída e, assim, não há uma ação de correção para fazer com que a saída seja igual ao sinal de referência.”

Malha Fechada: “No controle de malha fechada, o sistema inclui um sensor para medir o sinal de saída e utiliza a realimentação para influenciar na variável de controle.”

Para entender a função de cada componente de um Sistema, a Engenharia de Controle adota um diagrama chamado de Diagrama de Blocos, que é uma representação de cada componente e do fluxo de sinais entre cada um deles. Esses blocos também permitem realizar operações matemáticas.

Figura 8: (a) Sistema de malha aberta. (b) Sistema de malha fechada.



Fonte: Engenharia de Sistemas de Controle, 2013.

2.2.8 Análise da Resposta

O Sistema de Controle escolhido para controlar uma planta, deverá garantir uma resposta a partir de um sinal de entrada, dentro das especificações determinadas no início do projeto. As especificações de desempenho, podem ser em termos de requisitos de resposta transitória (como tempo de pico e tempo de acomodação na resposta à entrada em degrau) e de requisitos em regime estacionário (como erro estacionário para uma entrada em degrau), ou podem ser dados em termos de resposta em frequência. É fundamental que as especificações de um sistema de controle sejam informadas antes do início do processo de projeto (Ogata Katsuhiko, 2014).

Por tanto, para que um Sistema de Controle garanta o desempenho esperado do Sistema, deve-se planejar bem suas especificações, tendo em mente que quanto mais rigorosos forem os critérios estabelecidos a tendência é de termos um controle mais complexo e conseqüentemente mais custoso. Ainda, no mesmo sentido

Geralmente as especificações de desempenho não devem ser mais restritivas que o necessário para a realização da tarefa em questão. Se a precisão da operação em estado estacionário for de primordial importância em determinado sistema de controle, então não devemos precisar de especificações desnecessariamente rígidas na resposta transitória, pois essas especificações exigirão componentes dispendiosos. Lembre-se de que

a parte mais importante do projeto de sistemas de controle é estabelecer precisamente as especificações de desempenho, de forma que elas resultem em um sistema de controle ótimo para o fim a que se destina (Ogata Katsuhiko, 2014, p.8).

Especificações da resposta transitória:

Constantemente, são definidas as características de desempenho de um sistema de acordo com sua resposta transitória a uma entrada degrau, considerando o Sistema inicialmente em repouso.

Das considerações de Katsuhiko Ogata (2014) sobre os elementos a serem analisados da resposta transitória, destaca-se:

1. Tempo de atraso, t_d : corresponde ao tempo requerido para que a resposta (saída) atinja metade do valor final pela primeira vez.

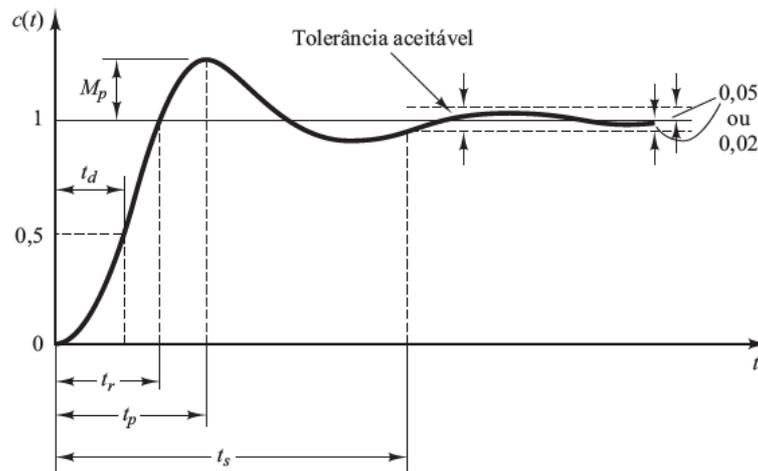
2. Tempo de subida, t_r : trata-se do tempo requerido para que a resposta saia de 10% e atinja 90%, ou de 5% a 95%, ou de 0% a 100% do valor final.

3. Tempo de pico, t_p : é o tempo para que a resposta atinja o primeiro pico de sobressinal.

4. Máximo sobressinal (em porcentagem), M_p : é o valor máximo de pico da curva de resposta, medido a partir da unidade. Porém, se o valor final da resposta em regime permanente não for em unidade, então normalmente é expressa em porcentagem máxima de sobressinal. O valor máximo (em porcentagem) do sobressinal associa diretamente a estabilidade relativa do sistema.

5. Tempo de acomodação, t_s : tempo necessário para que a curva de resposta atinja valores em uma faixa (normalmente de 2% ou 5%) próximo do valor final, ali permanecendo. O tempo de acomodação está associado à maior constante de tempo do sistema de controle. A porcentagem poderá ser determinada no critério de erro tendo em vista os objetivos do projeto do sistema em questão.

Gráfico 3: Resposta ao degrau unitário.



Fonte: Engenharia de Controle Moderno.

2.2.9 Especificações de desempenho do Sistema com base no erro em regime permanente ou constantes de erro estático

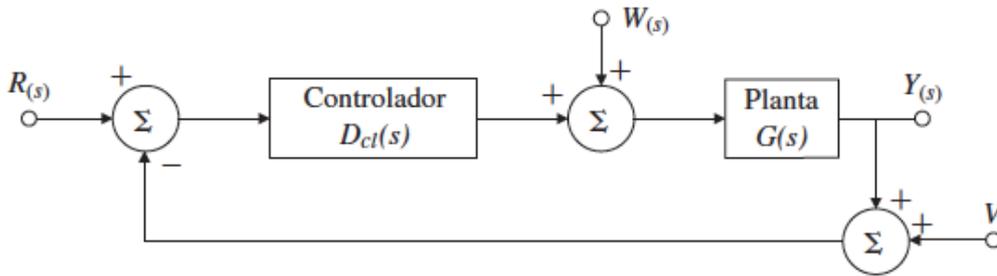
O teorema do valor final (TVF) é utilizado para calcular qual será o erro ou desvio do Sistema quando esse alcançar o regime estático. Valendo-se da entrada $R(s) = \frac{1}{s^{k+1}}$, com $k=0$ tem-se a entrada função degrau (Posição), $k=1$ função rampa (Velocidade) ou $k=2$ função parábola (aceleração). Padroniza-se interferências como constantes nulas (Figura 9). Então, a partir do TVF, expresso pela equação 2.8:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \quad (2.8)$$

Sendo $E(s) = R(s) \cdot \frac{1}{1+G(s) \cdot D_{cl}}$, o TVF será:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} s \cdot \frac{1}{1+G(s) \cdot D_{cl}} \cdot \frac{1}{s} \quad \lim_{s \rightarrow \infty} s \cdot \frac{1}{1+G(s) \cdot D_{cl}} \cdot \frac{1}{s^2} \quad \lim_{s \rightarrow \infty} s \cdot \frac{1}{1+G(s) \cdot D_{cl}} \cdot \frac{1}{s^3}$$

Figura 9: Sistema em malha fechada.



Fonte: Sistemas de Controle para Engenharia, 2013.

Define-se ainda o Tipo do Sistema conforme o grau n do denominador de $G(s)D_{cl}$. Tipo 0 para $n = 0$, Tipo 1 para $n = 1$ e Tipo 2 para $n = 2$.

A partir do Teorema do Valor Final determina-se um erro estacionário para cada tipo de função de transferência, padronizando a função de entrada. Seguindo com as definições que Franklin Powell (2013) expõem, considera-se um sistema para o qual $G(s)D_{cl}$ não tem polo na origem e tem uma entrada degrau para que $R(s) = \frac{1}{s}$. Assim, o denominador de $R(s)$ é um polinômio de grau 0. Neste caso, a equação 2.11 que representa o erro estacionário para uma entrada qualquer $\frac{1}{s^{k+1}}$:

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{1+G(s).D_{cl}} \cdot \frac{1}{s^{k+1}} \quad (2.9)$$

se reduz à:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{1+G(s).D_{cl}} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{1+G.D_{cl}(0)}$$

Esse sistema é definido como Tipo 0, e a constante $G.D_{cl}(0) \triangleq k_p$ será a constante de erro de posição. Tendo em consideração, que se a função de entrada for um polinômio de grau superior a 1, o erro resultante aumentará de magnitude sem limites. Um polinômio de grau 0 é o grau mais elevado que um sistema do Tipo 0 pode rastrear. Se $G.D_{cl}(s)$ tem um polo na origem, dando continuidade ao raciocínio utilizando entradas polinomiais de primeiro grau, é bastante simples analisar a equação $\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{1+G(s).D_{cl}} \cdot \frac{1}{s^{k+1}}$ para uma configuração geral. Para este caso, busca-se descrever o comportamento do controlador e da planta quando s se aproxima

de 0. Para isso, são analisados todos os termos, exceto o(s) polo(s) na origem da função $G.D_{clo}(s)$ que é finita em $s = 0$ para que seja definida a constante $G.D_{clo}(0) = k_n$ e expressa a função de transferência como a função 2.12:

$$G.D_{cl}(s) = \frac{GD_{clo}(s)}{s^n} \quad (2.10)$$

Por exemplo, se $G.D_{cl}(s)$ não tem integrador, então $n = 0$. Porém, se o sistema tem um integrador, então $n = 1$ e assim por diante. Substituindo $G.D_{cl}(s)$,

$$\begin{aligned} e_{ss} &= \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + \frac{G(s).D_{cl}}{s^n}} \cdot \frac{1}{s^{k+1}} \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^n}{s^{n+K_n}} \cdot \frac{1}{s^k} \end{aligned} \quad (2.11)$$

A partir da equação 2.13, é possível analisar que, se $n > k$, então $e = 0$, e se $n < k$, então $e \rightarrow \infty$. Se $n = k = 0$, então $e_{ss} = \frac{1}{1+k_0}$, e se $n = k \neq 0$, então $e_{ss} = \frac{1}{k_n}$. Como observado, se $n = k = 0$, a função entrada é um polinômio de grau zero, como um degrau ou posição, a constante K_0 é chamada de constante de posição definida por K_p , e o sistema é classificado como Tipo 0. Se $n = k = 1$, a função entrada é um polinômio de primeiro grau, como uma rampa ou entrada de velocidade, e a constante K_1 é chamada de constante de velocidade definida como K_v . Sendo esse sistema classificado como Tipo 1. Sendo assim, sistemas do Tipo 2 e de tipos superiores podem ser definidos da mesma forma.

Os resultados podem ser resumidos pelas equações:

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G.D_{cl}(s), \quad n = 0$$

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s.G.D_{cl}(s), \quad n = 1$$

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2.G.D_{cl}(s), \quad n = 2$$

Associando a Função de entrada, o Tipo do Sistema e a Resposta em Regime Estacionário obtém-se a seguinte tabela:

Tabela 1: Erro em função do tipo do sistema.

Tipo de entrada	Degrau (posição)	Rampa (velocidade)	Parábola (aceleração)
Tipo 0	$\frac{1}{1 + K_p}$	∞	∞
Tipo 1	0	$\frac{1}{K_v}$	∞
Tipo 2	0	0	$\frac{1}{K_a}$

Fonte: Sistemas de Controle para Engenharia, 2013.

2.2.10 Controladores Analógicos

Com o desenvolvimento da teoria de controle, a partir de experimentações chegou-se ao método de controle chamado de PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Tal modelo foi o pioneiro em permitir o controle automatizado de navios. Destaca-se sua acentuada relevância histórica,

Foi apenas no início do século XX que a condução automática de navios foi alcançada. Em 1922, a Sperry Gyroscope Company instalou um sistema automático de direção, que utilizava elementos de compensação e controle adaptativo para melhorar o desempenho. Entretanto, boa parte da teoria geral utilizada atualmente para melhorar o desempenho dos sistemas de controle automático é atribuída a Nicholas Minorsky, um russo nascido em 1885. Foi seu desenvolvimento teórico aplicado à condução automática de navios que levou ao que hoje chamamos de controladores proporcional, integral e derivado (PID), ou controladores de três modos (Nise, 2012, p.50).

Os controladores PID atuam de forma a reduzir o erro em regime estacionário, garantir uma resposta consideravelmente rápida e com um sobressinal previsível. Dessa maneira, Franklin Powell (2013) descreve as ações do controlador Proporcional, Derivativo e Integral, separadamente conforme cada um influencia na resposta do Sistema. A partir do controle proporcional realimentado, foi utilizada pelos primeiros engenheiros a ação de controle integral como forma de eliminar o erro em regime permanente. Contudo, encontravam, na maioria dos

casos, uma resposta dinâmica insatisfatória; assim, um termo de “antecipação” com base na derivada foi incluído.

Ainda de acordo com o autor, as ações características dos controladores podem ser descritas como:

Controlador Proporcional (P): No caso em que o sinal de controle realimentado é linearmente proporcional ao erro do sistema, essa característica é chamada de realimentação proporcional. Sendo a função de transferência do controlador proporcional, representada na função 2.14:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_P \quad (2.12)$$

Controlador Proporcional Integral (PI): Acrescentando um termo integral ao controlador, observa-se a equação de controle proporcional-integral como a equação 2.15:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_P + \frac{k_I}{s} \quad (2.13)$$

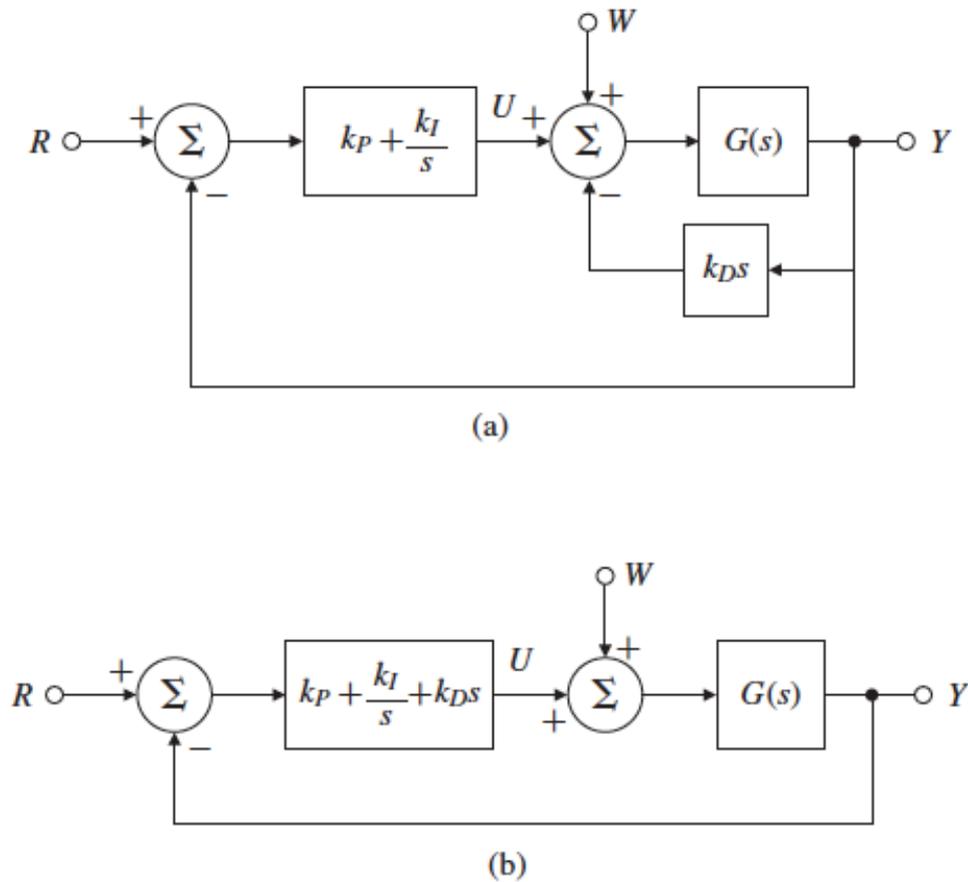
A adição do termo integral aumenta o tipo do sistema e, sendo assim, rejeitará perturbações constantes.

Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID): Um efeito relevante do termo derivativo é suavizar a resposta devido a sinais instantâneos. O termo derivativo é responsável pela previsão do sobressinal, melhorando a resposta transitória do Sistema. A Figura 10 representa um diagrama de blocos de um controlador PID.

A equação de controle adicionada do termo derivativo, agora está representada pela equação 2.16:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_P + \frac{k_I}{s} + k_D s \quad (2.14)$$

Figura 10: Diagrama de blocos do controlador PID: (a) Com o termo D na realimentação; e (b) Com o termo D na malha direta.

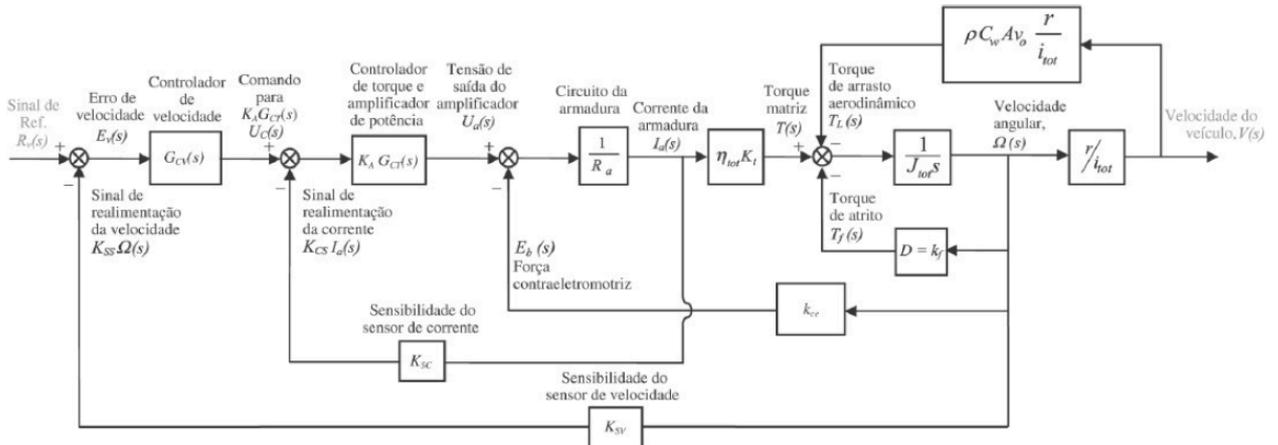


Fonte: Sistemas de Controle para Engenharia, 2013.

2.2.11 Controle em Cascata

O controle em cascata é uma forma de melhorar a resposta transitória e a resposta em regime permanente independentemente. Pode ser formado por dois ou mais controladores, cada um com a sua própria entrada em série. Sua estrutura baseia-se em um controlador primário e um controlador secundário, onde a saída do controlador primário pode ser utilizada com o intuito de manipular a referência do controlador secundário, assim sendo possível corrigir a resposta transitória e estacionária independentemente (Nise, 2012). Na Figura 11 observa-se um diagrama de blocos do controle em cascata, com a característica de ter a saída do controlador primário como entrada do controlador secundário.

Figura 11: Diagrama de blocos do controle em cascata para um HEV



Fonte: Engenharia de Sistemas de Controle, 2012.

2.3 Sistema de Controle do Governo do Navio:

Proporcionar o controle positivo da direção do leme é necessário para permitir ao navio manobrar ou prosseguir em um rumo desejado. O Sistema de Governo é concebido para mover o leme do navio em resposta a um sinal de entrada eletro-hidráulico proveniente do sistema de controle.

Para que um Sistema tenha um bom controle, de acordo com Franklin Powell (2013), ele deve cumprir quatro requisitos básicos:

1. O sistema deve ser sempre estável;
2. A saída do sistema deverá acompanhar o sinal de comando na entrada;
3. A saída do sistema não deve responder a entradas de distúrbio;
4. Esses requisitos devem ser cumpridos, ainda que o modelo utilizado no projeto não seja o mais preciso, ou mesmo se a dinâmica do sistema físico mudar ao longo do tempo ou devido a mudanças ambientais.

Como o objeto desse estudo será um navio da Marinha do Brasil, espera-se que os objetivos sejam ampliados para que atenda alguns requisitos mais específicos, característicos de embarcações militares como: Maior robustez, redundância, desempenho em situações críticas e reduzido tempo de resposta. Tendo em vista a extensão dos objetivos, espera-se que o nível de complexidade e custo sejam também maiores que para um Sistema que atenda um Navio não militar (Marinha do Brasil, 2005).

É possível alcançar tais objetivos, partindo de técnicas de Controle já consolidadas. Sendo o controlador PID aquele que oferece uma solução mais simples (Canete; Martin-

Aguilar, 2020), apesar das definições desse controlador convencional serem susceptíveis de variar com as alterações das condições de funcionamento e quando estão presentes perturbações externas.

Com tal fim, através de modelos matemáticos que descrevem a dinâmica do Navio pode-se simular a atuação do Sistema de Controle e estudar o comportamento do mesmo, extraindo as performances do controlador e comparando com as especificações preestabelecidas. Essa solução reduz os custos de testes em escalas maiores, podendo ainda prever erros de dimensionamento do projeto.

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação da Pesquisa

Quanto à metodologia, o trabalho se classifica como uma pesquisa aplicada, na qual a abordagem escolhida foi a quantitativa, onde a partir do método indutivo, observou-se a dinâmica de um modelo de Navio, com vistas de seu Sistema de Controle utilizando o *software* MATLAB-Simscape/*Simulink* (Gil, 2002).

Quanto aos fins, esse é um trabalho associado a uma pesquisa descritiva, que procede modelos aprovados por testes em grande escala em tanques de prova (Blanke e Jensen, 1997), com objetivo de modelar um Sistema de Controle do Governo do Navio que possa ser utilizado pela MB, na plataforma MATLAB- Simscape/*Simulink* (Gil, 2002).

Quanto aos meios (Gil, 2002), assenta-se em procedimentos de:

- a) Pesquisa Bibliográfica: pautando-se por aqueles livros e artigos que precedem de modelos e experimentos;
- b) Estudo de Caso: buscando a partir de um modelo de Sistema de Controle do Governo do Navio, analisar a dinâmica do mesmo.

4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DO CASO

Para a concepção de um Sistema de Controle, o Navio é considerado como um sistema SISO (*single-input, single-output*), em que o rumo do navio é controlado por um sinal de atuação, o ângulo do leme desejado. Um modelo de função de transferência simples com capacidade de previsão qualitativa é preferível a um modelo complicado para a concepção de um Sistema de Controle uma vez que esse controlador de feedback avançado pode ter em conta as incertezas e os erros de modelagem que surgem no sistema sob a forma de perturbações (Das S; Tatole S, 2016).

Neste trabalho descreve-se a utilização do ambiente de simulação Simscape para o projeto baseado na modelagem física do Sistema de Controle do Governo do Navio, bem como dos seus diferentes componentes. A utilização do Simscape representa uma vantagem adicional, uma vez que está totalmente integrado no MATLAB-*Simulink* e pode explorar componentes de outras caixas de ferramentas padrão, especialmente as relacionadas com a modelagem de sistemas dinâmicos multi-domínio em geral (integração com qualquer biblioteca do MATLAB-*Simulink*), bem como as relacionadas com a tarefa de modelagem e controle do Governo do Navio em particular.

4.1 Modelagem e simulações no Simscape

O Simscape utiliza uma abordagem não causal, para modelar sistemas dinâmicos, utilizando componentes físicos (blocos) ligados entre si, nos quais são definidas equações, seguindo um diagrama de ligação específico. Essa metodologia não causal difere da metodologia causal utilizada no MATLAB-*Simulink*, em que a interligação dos blocos reflete o procedimento de cálculo e não a verdadeira estrutura do sistema modelado (Miller S., 2008).

No Simscape, cada bloco é constituído por elementos que interagem entre si por meio das suas portas, que são conexões interativas. Esses blocos podem ser ligados através de interfaces definidas, nas quais são especificadas as variáveis utilizadas para a ligação, de modo que apenas os conectores que pertencem às mesmas classes de conexão possam ser ligados. Por conseguinte, a energia pode fluir em ambas as direções, sendo que o fluxo de informação não tem de ser especificado quando os blocos Simscape são ligados (How Simscape Models Represent Physical Systems - MATLAB & Simulink, 2023).

Essa abordagem de rede física pode ser utilizada por dois tipos de variáveis, as variáveis de esforço, que são medidas com um sensor ligado em paralelo a um componente em relação a

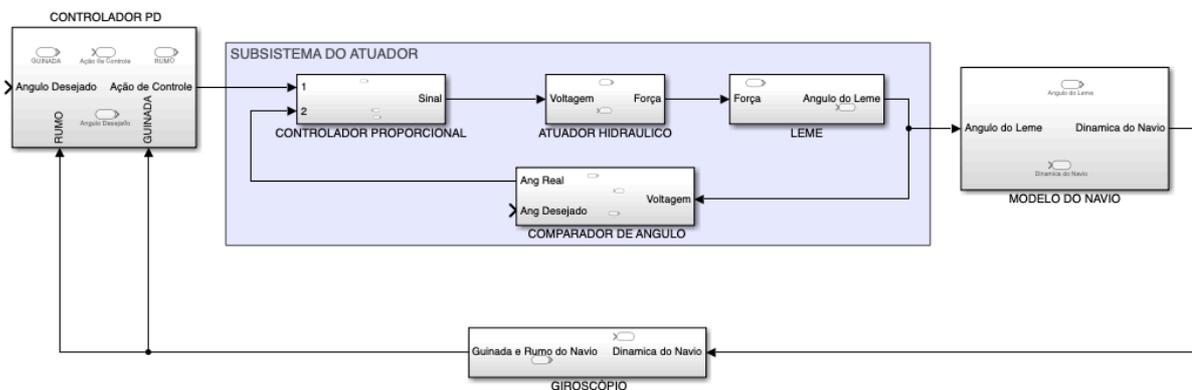
uma referência, e as variáveis de fluxo, que são medidas com um sensor ligado em série a um componente (How Simscape Simulation Works - MATLAB & Simulink, 2023).

As portas representam ligações físicas e relacionam variáveis físicas entre blocos físicos, e as linhas de ligação que unem estas portas são linhas bidirecionais que transportam variáveis de esforço e variáveis de fluxo ao invés de sinais, sendo essa uma característica particular do Simscape (Basic Principles of Modeling Physical Networks - MATLAB & Simulink, 2023).

Os blocos no Simscape são agrupados por categorias em diferentes bibliotecas de componentes (térmicos, mecânicos, hidráulicos, sinais físicos e elétricos). As equações dinâmicas do sistema são determinadas pelo diagrama de ligação do sistema, juntamente com as leis de conservação. Desta forma, a ligação dos blocos Simscape pode ser considerada como uma das principais características da modelagem por blocos físicos, permitindo ligar componentes físicos básicos a outros mais complicados, até se obter um modelo, podendo alcançar níveis de complexidade elevados (Das, 2020).

O Sistema de Controle do Governo do Navio a ser estudado será definido como uma estrutura hierárquica constituída por subsistemas físicos, a saber: o navio, o controlador de realimentação, o giroscópio e o sistema do atuador, composto por um sistema de controle com realimentação definido pelo leme, atuador hidráulico, comparador de ângulo e controlador do atuador, como mostrado na Figura 12, essa estrutura de componentes físicos foi implementada utilizando o Simscape.

Figura 12: Estrutura do sistema de controle do governo do navio, em subsistemas físicos.



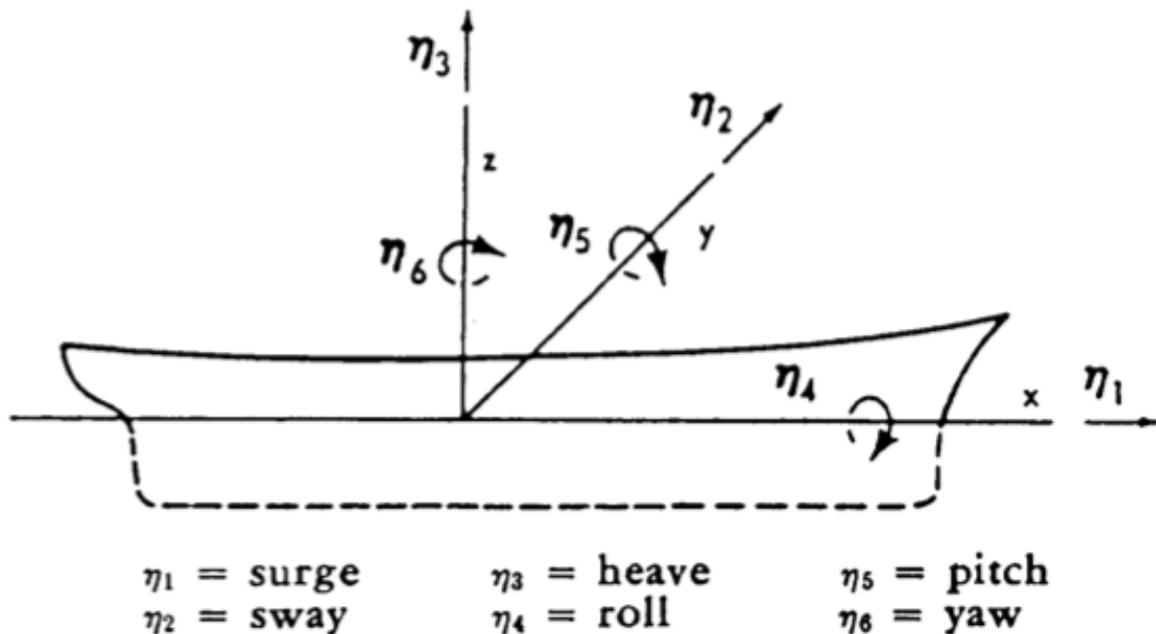
Fonte: Produzido pelo autor.

4.2 Modelagem do Navio

4.2.1 Modelagem matemática da dinâmica do navio

O movimento dinâmico de um navio pode ser considerado como um movimento de corpo rígido de seis graus de liberdade (Figura 13): correspondendo a movimentos rotacionais de balanço (η_4), guinada (η_6) e cabeceio (η_5), associados a movimentos translacionais de deriva lateral (η_2), arfagem (η_3) e caturro (η_1), (Lewis, 1988). Devido à complexidade da análise do movimento tridimensional de um sólido num fluido, a orientação do movimento será considerada como sendo afetada apenas por forças paralelas à superfície do mar com movimento de plano horizontal, assim somente os movimentos de caturro, deriva lateral e guinada são considerados.

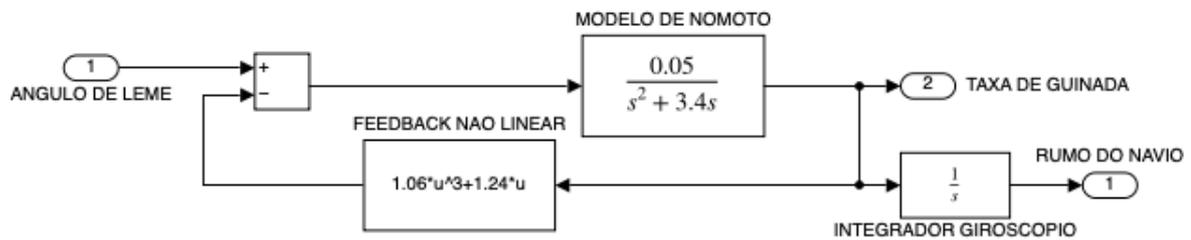
Figura 13: Dinâmica de movimentos rotacionais e translacionais do navio.



Fonte: Principles of Naval Architecture, 1988.

Obteve-se o modelo matemático de um Navio no *simulink* conforme a Figura 14, apoiando-se nas análises de Van Amerongen (1984) para a solução de equações de segunda ordem do modelo de Nomoto, que consideram as variáveis de taxa de guinada dadas as variações de ângulo de leme. Assim como, em suas análises do modelo de Bech oriundo da função de transferência relacionando a variável de saída como sendo o Rumo do Navio (a derivada deste, sendo a taxa de guinada), com a variável de entrada sendo o Ângulo do Leme, tomando o empuxo como constante.

Figura 14: Modelo matemático de um navio no *simulink*.



Fonte: Produzido pelo autor com base nos dados de Canete; Martin-Aguilar, 2020.

4.3 Modelagem física do controle do atuador

O papel do atuador é o de entregar a força necessária ao leme, de modo a movimentá-lo em um ângulo igual ao ângulo de leme desejado. Para tal, exige-se um circuito fechado de controle.

O sistema de controle do atuador é composto por três módulos integrados ao leme (figura 11, parte com fundo azul), a saber: o circuito de controle Proporcional (P), o atuador hidráulico e um comparador de ângulo.

O controlador do sistema hidráulico é um circuito eletrônico cuja função é implementar um controlador P. Enquanto, o sistema hidráulico é composto por um pistão de dupla ação, com uma válvula de admissão de três posições e quatro vias (4/3 vias), cuja posição é determinada por uma válvula de acionamento. Por fim, o comparador de ângulo é capaz de converter o ângulo em voltagem e assim fazer a comparação entre o ângulo desejado e o real.

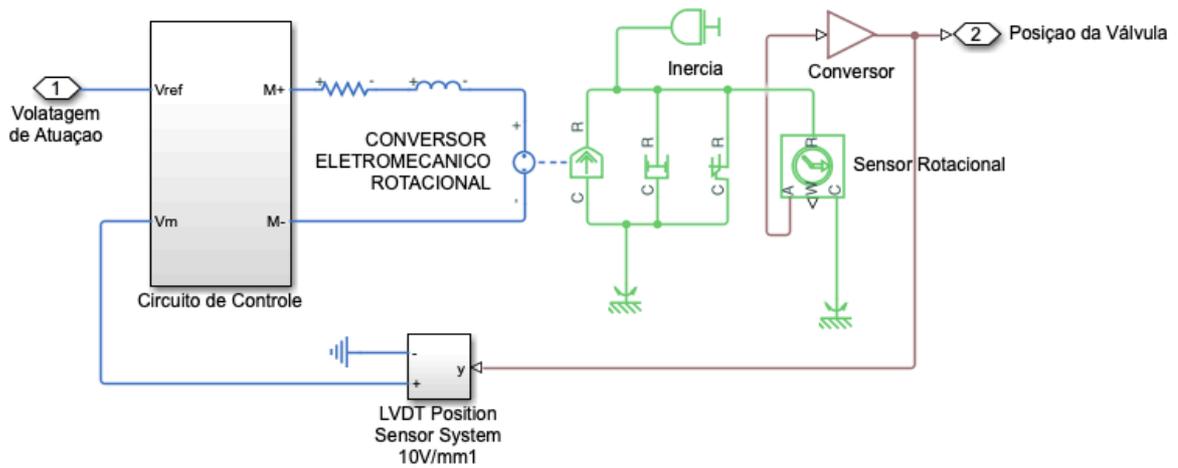
4.3.1 Modelagem física do atuador hidráulico

A descrição do sistema do atuador hidráulico começa com a válvula de acionamento, que dá o sinal de posição apropriado à válvula de admissão do cilindro (4/3 vias), de acordo com a posição desejada do pistão, que está relacionada à tensão de saída do controlador P.

Essa válvula de acionamento é uma válvula servo-eletromecânica, o modelo Simscape da Figura 15 é então representado como um dispositivo eletromecânico, convertendo a tensão do controlador P na posição desejada da válvula de admissão.

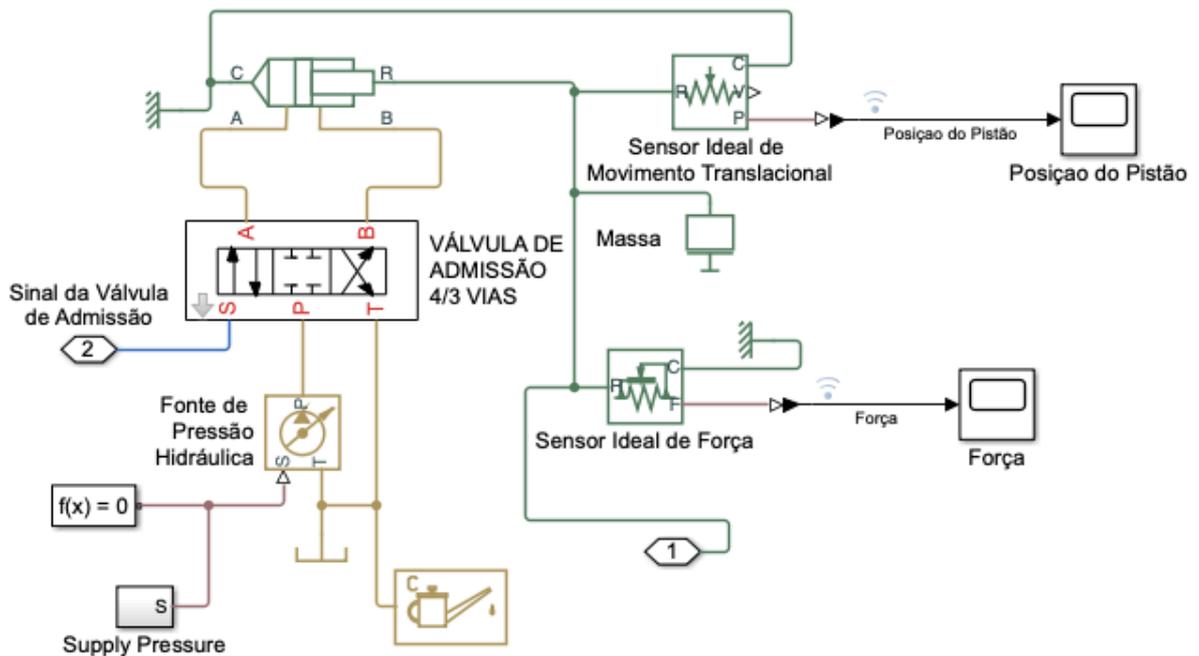
Já o sistema do atuador hidráulico é modelado por um cilindro hidráulico de dupla ação acoplado a uma válvula de admissão (4/3 vias), juntamente com um sistema de pressurização que mantém a pressão do fluido, de modo que seja gerada, como sinal de saída, uma força para o leme (Figura 16).

Figura 15: Modelo físico da válvula de acionamento



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 16: Modelo físico do Atuador Hidráulico.



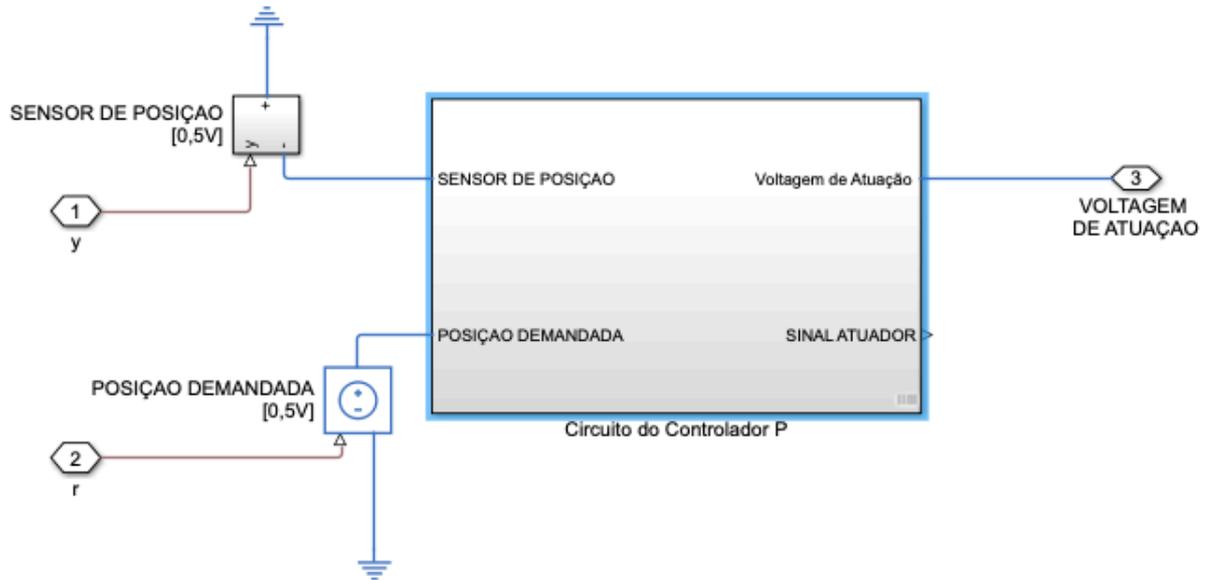
Fonte: Produzido pelo autor.

4.3.2 Modelagem física do Controle do Atuador Hidráulico

O controlador P pode ser obtido a partir de um circuito elétrico formado por resistências e amplificadores operacionais, cujas entradas são o sinal de comando de referência da ação de controle do rumo do navio e a tensão de realimentação do sensor do ângulo do leme, respetivamente. A Figura 17 introduz o subsistema que contém o Circuito do Controlador P,

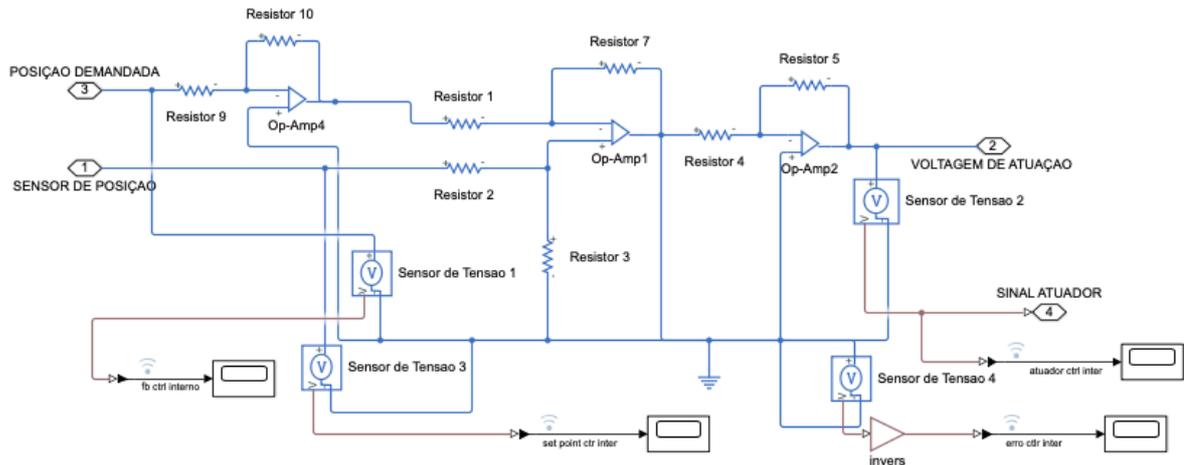
enquanto a é Figura 18 a implementação do circuito composto por resistores e amplificadores operacionais do Controlador P.

Figura 17: Modelo físico do controle do atuador.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 18: Modelo físico do circuito de controle do atuador hidráulico (controlador P).



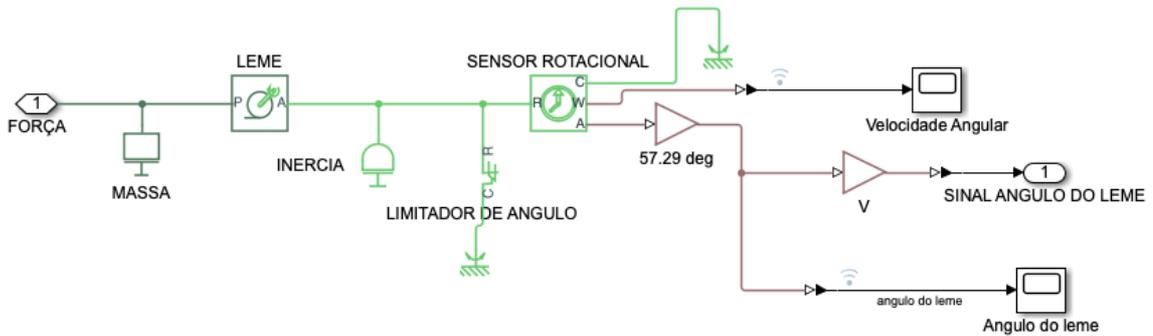
Fonte: Produzido pelo autor.

4.3.3 Modelagem física do leme

O sistema do leme recebe a força entregue pelo atuador hidráulico através do pistão, provocando um movimento angular. Assim, a Figura 19 visualiza-se o diagrama Simscape do modelo do leme constituído por: massa, inércia, resistência à rotação e o batente rígido como

componentes principais. No que diz respeito ao limite de ângulo do leme, foi configurado para uma limitação de 30°, de modo a não causar efeitos indesejáveis ao sistema do leme e do atuador.

Figura 19: Modelo físico do leme no Simscape.

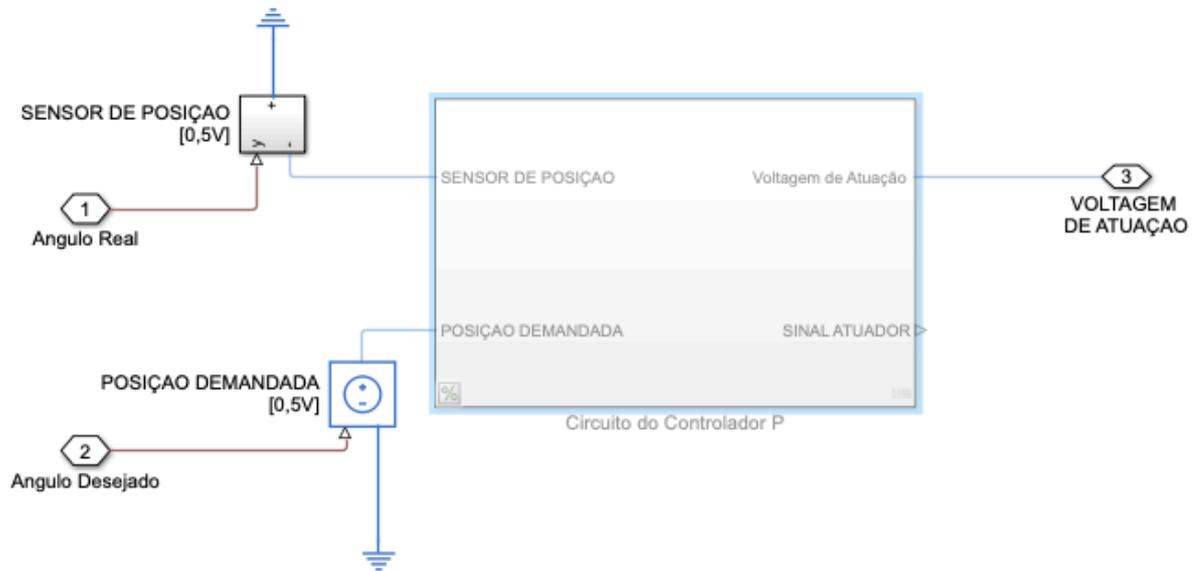


Fonte: Produzido pelo autor com base nos dados de Canete; Martin-Aguilar, 2020.

4.3.4 Modelagem física do comparador de ângulo

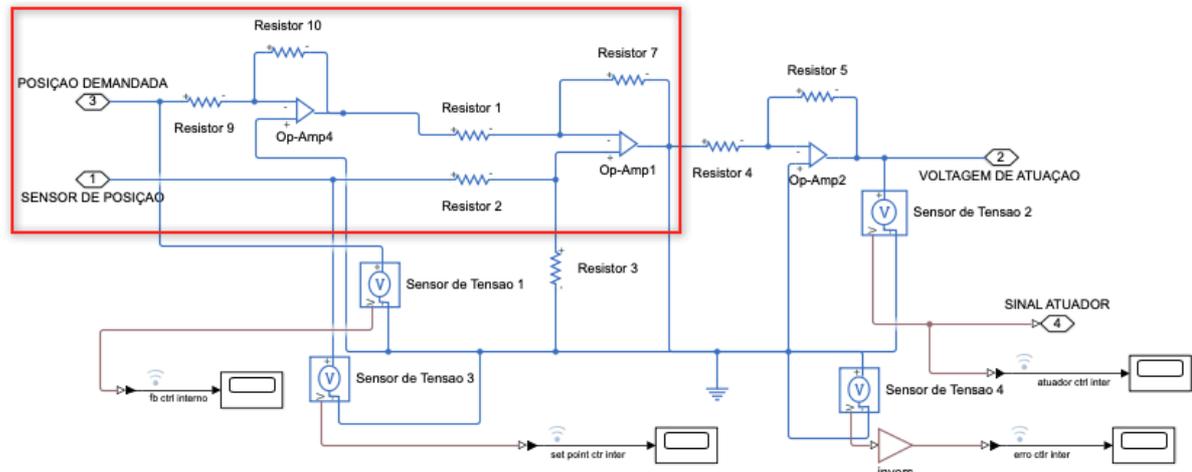
O sistema de controle do atuador ainda inclui um conversor ângulo-tensão. O dispositivo necessita de um sinal já configurado quando o ângulo do leme é medido, convertendo a posição angular, negativa ou positiva, numa tensão de retorno adequada. Dessa forma, compara o ângulo real ao desejado. A Figura 20 introduz o conversor de ângulo-tensão, já o destaque em vermelho na Figura 21, representa a modelagem do circuito comparador.

Figura 20: Conversor ângulo-tensão



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 21: Comparador de ângulo.



Fonte: Produzido pelo autor.

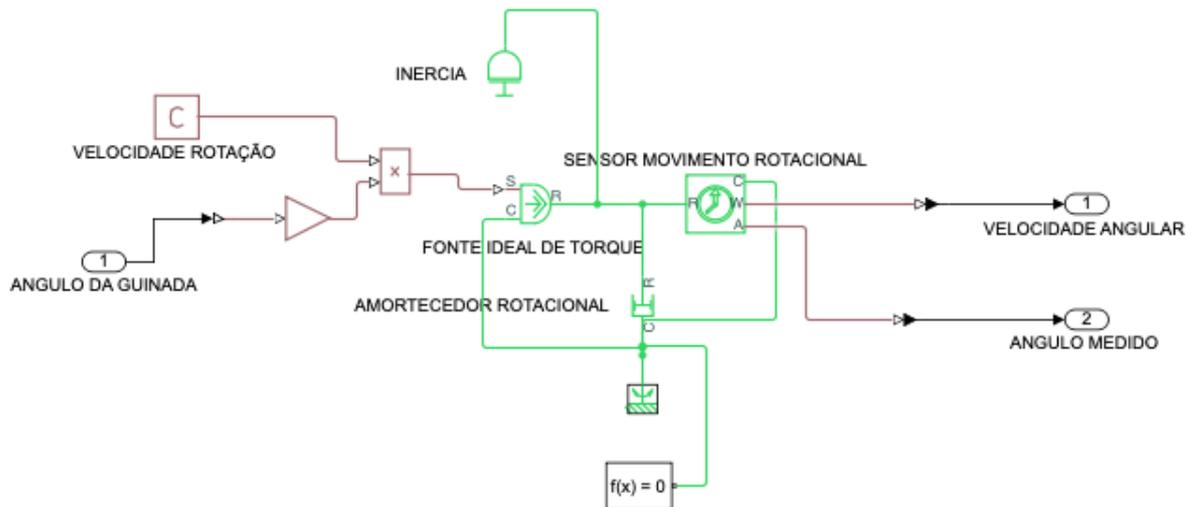
4.4 Modelagem do Giroscópio

É possível conhecer o rumo do navio, a partir de alguns métodos: navegação visual, navegação radar, pelo Sistema de Posicionamento Global (GPS), ou ainda por um dispositivo giroscópio. Neste trabalho, a solução do giroscópio foi selecionada, pois permite amplificar o ângulo de direção da agulha giroscópica medido, e em paralelo evita problemas de deriva ou imprecisão, contidos nos demais métodos.

4.4.1 Modelagem física do Giroscópio

A Figura 22 apresenta o diagrama em Simscape do modelo do Giroscópio, onde estão presentes os blocos Inercia, Amortecimento da Rotação e Fonte de Torque, que simula a geração do Torque do Navio.

Figura 22: Modelo em Simscape de um giroscópio.



Fonte: Produzido pelo autor com base nos dados de Canete; Martin-Aguilar, 2020.

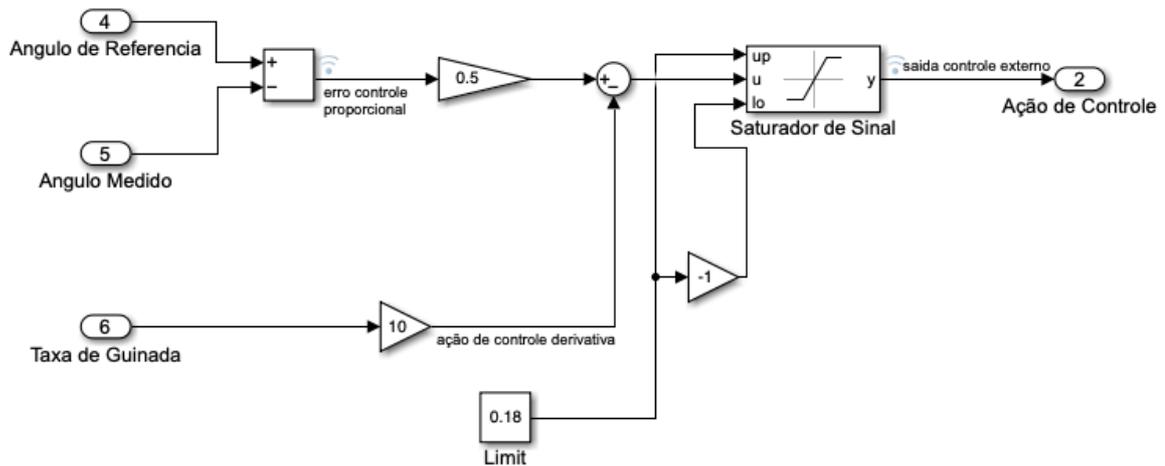
4.5 Modelagem física do Controlador PD

Responsável pelo controle do rumo, um controlador de *feedback* é fundamental para que a embarcação possa seguir uma trajetória de referência com precisão. Com esse fim, foi utilizado um controlador PD como controlador de realimentação, sendo as suas entradas o sinal do ângulo desejado, o ângulo medido e a tensão de realimentação do giroscópio que representa a taxa de guinada, respectivamente.

Para implementar o ganho proporcional K_p , a diferença entre os sinais de tensão do rumo medido do giroscópico e o ângulo desejado deve ser determinado. Toda via, para implementar a ação derivativa dada pelo ganho K_d , a taxa de guinada medida é a variável a ser manipulada.

Com o intuito de controlar os valores máximos de ângulo de leme a ser empregado, foi adicionado um saturador de sinal. A Figura 23, representa o modelo físico em Simscape do controlador PD e seu saturador de sinal.

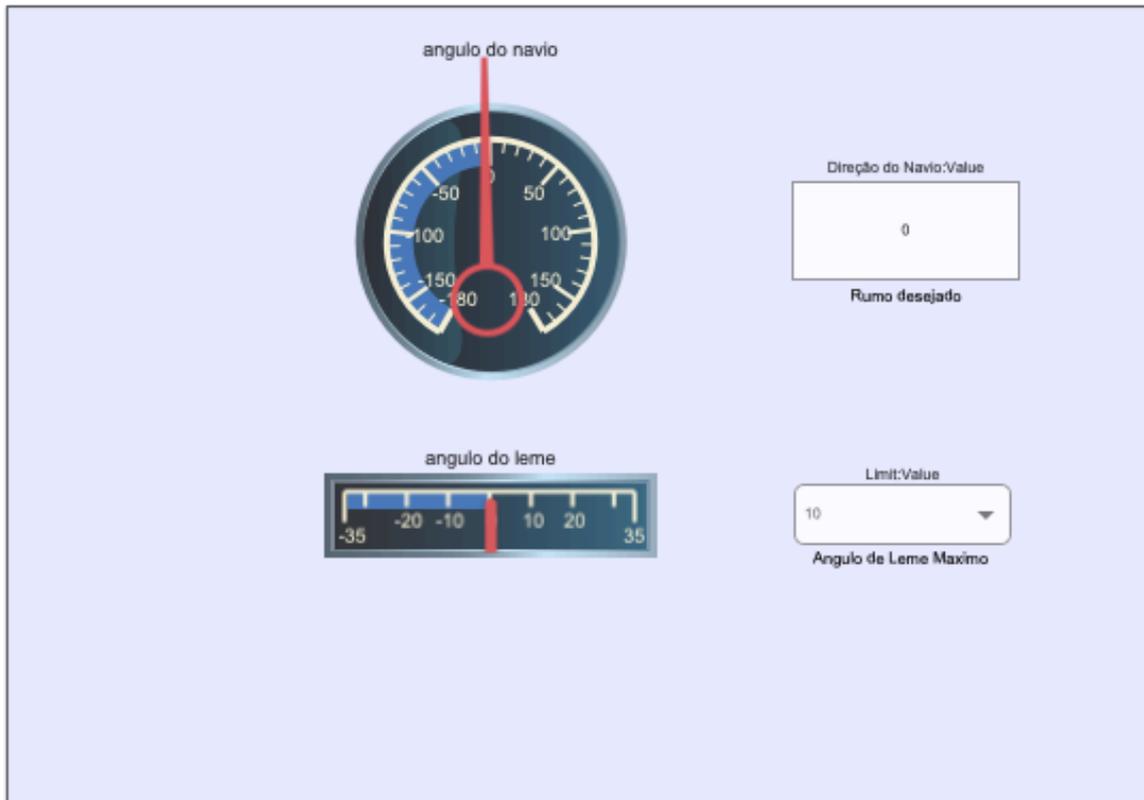
Figura 23: Modelo em Simscape do controlador PD.



Fonte: Produzido pelo autor.

4.6 Modelagem da interface do operador

A comunicação entre o sistema e o operador deve garantir que o mesmo possa ser capaz de não só inserir os parâmetros desejados, mas também de acompanhar se o rumo do navio e o ângulo de leme real estejam sendo atendidos corretamente, e com uma taxa de variação aceitável. Ciente disso, a Figura 24 retrata o modelo físico em Simscape da interface do operador no modo de governo automático, onde é possível inserir os valores de ângulo de leme máximo a ser utilizado na guinada e também o rumo desejado. O modo de governo principal/manual, não foi aqui representado por se tratar de uma caso particular do modo de governo automático, onde o Controlado PD seria suplantado pela ação do timoneiro.

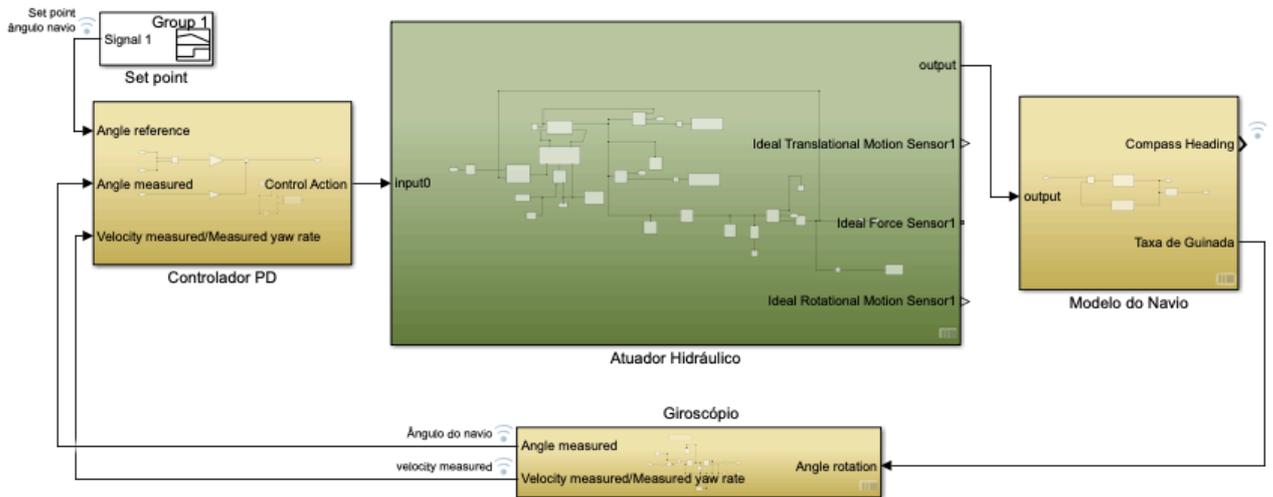
Figura 24: Interface do modo de governo automático

Fonte: Produzido pelo Autor.

4.7 Implementando o Sistema de Controle do Governo do Navio

A estrutura física modelada no Simscape da Figura 25, representa a implementação do Sistema a partir da integração dos módulos mencionados nas demais seções. A interação entre os blocos de estrutura física diferentes, é uma das principais vantagens do uso do Simscape. No modelo interagem elementos elétricos, eletrônicos e hidráulicos de acordo com o fluxo hierárquico definido.

Figura 25: Implementação do sistema de controle do governo do navio no Simscape.



Fonte: Produzido pelo Autor.

4.8 Análise das simulações

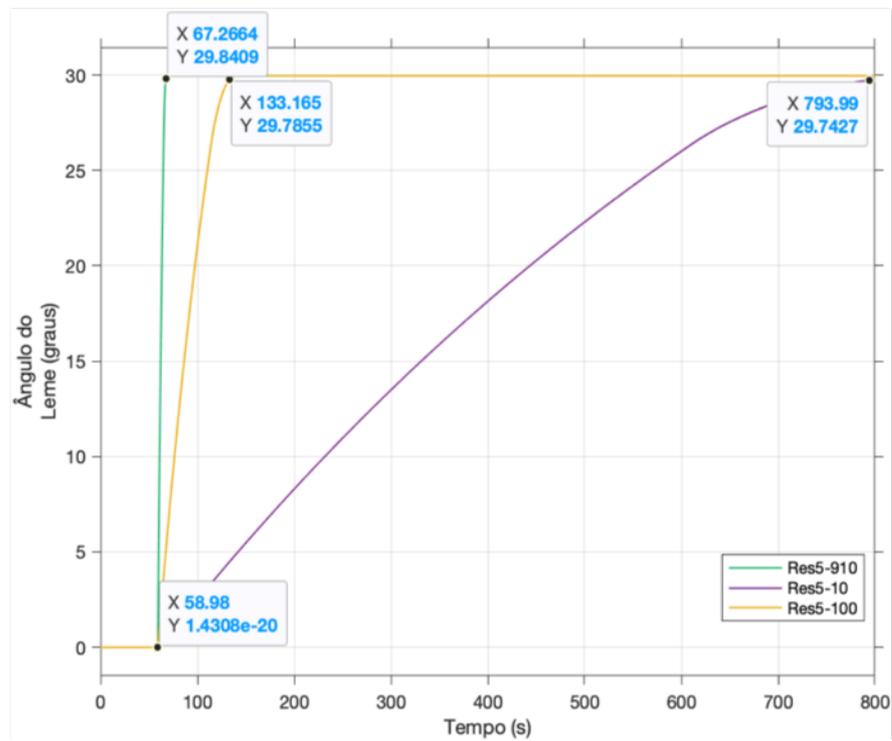
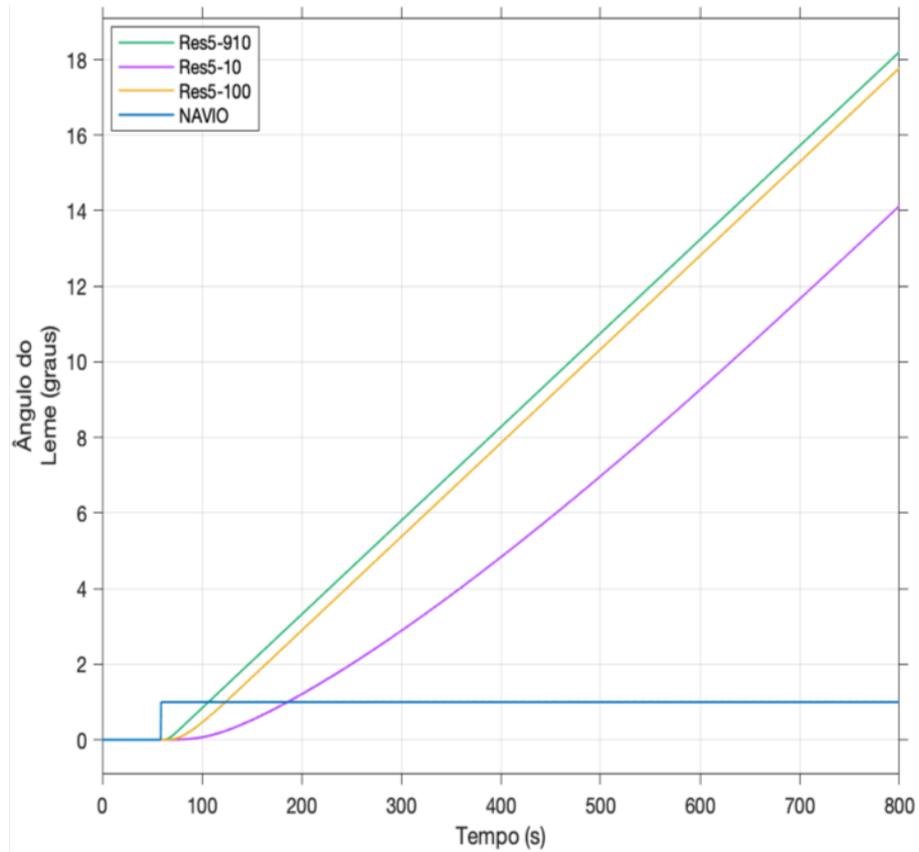
Todo os valores utilizados para as simulações das estruturas físicas encontram-se na tabela do Anexo A, e ainda foi considerada a velocidade do navio constante e o sistema livre de interferências.

4.8.1 Análise do Controlador P do Atuador Hidráulico

Para sintonização do controlador P do atuador hidráulico foi utilizada uma estratégia adaptativa, onde a resistência $Res5$ foi manipulada para conceber o ganho necessário ao controlador proporcional, realizando variações na ordem de dez vezes. No Gráfico 4 é possível observar diferentes comportamentos do sistema em malha aberta à medida que altera-se $Res5$. Conforme há acréscimo ao valor de $Res5$ a resposta do sistema se torna mais rápida.

Tendo sido escolhido $Res5 = 910$ ohms, pois esse valor é capaz de tornar a resposta do sistema aceitável dentro dos parâmetros operacionais do sistema de referência (Marinha do Brasil, 2005).

Gráfico 4: Sintonização controlador P, sistema em Malha Aberta.



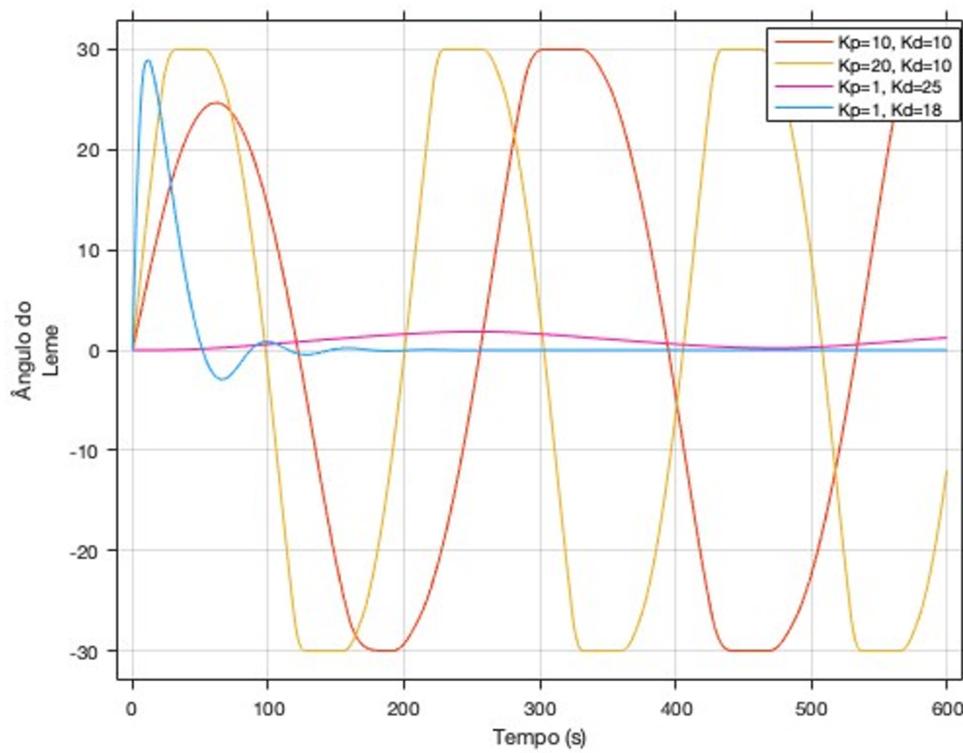
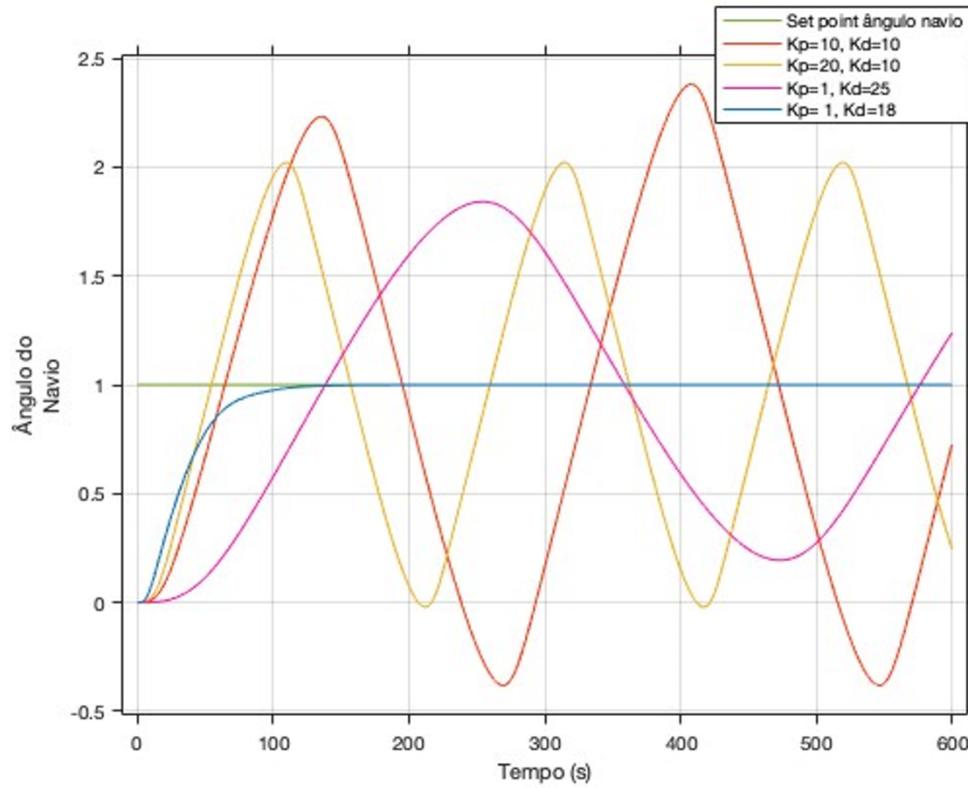
Fonte: Produzido pelo Autor.

4.8.2 Análise do Controlador PD

A aplicabilidade da proposta de modelagem do controle do governo do navio no ambiente de simulação do Simscape foi testada a partir de uma estratégia de controle PD adaptativa. O Gráfico 5 mostra diferentes respostas do sistema com realimentação para valores variáveis de PD, quando é definido um rumo de referência em grau, no caso uma entrada degrau.

É possível verificar que valores crescentes de ganho proporcional K_p e valores baixos de ganho derivativo K_d produzem um grande sobressinal e uma resposta transitória rápida, enquanto que o oposto reduz o sobressinal e torna o padrão de resposta transitória mais lento. Podendo ser verificada a ação de predição do controlador Derivativo no sistema.

Gráfico 5: Sintonização controlador PD, com referências de ângulo em graus.

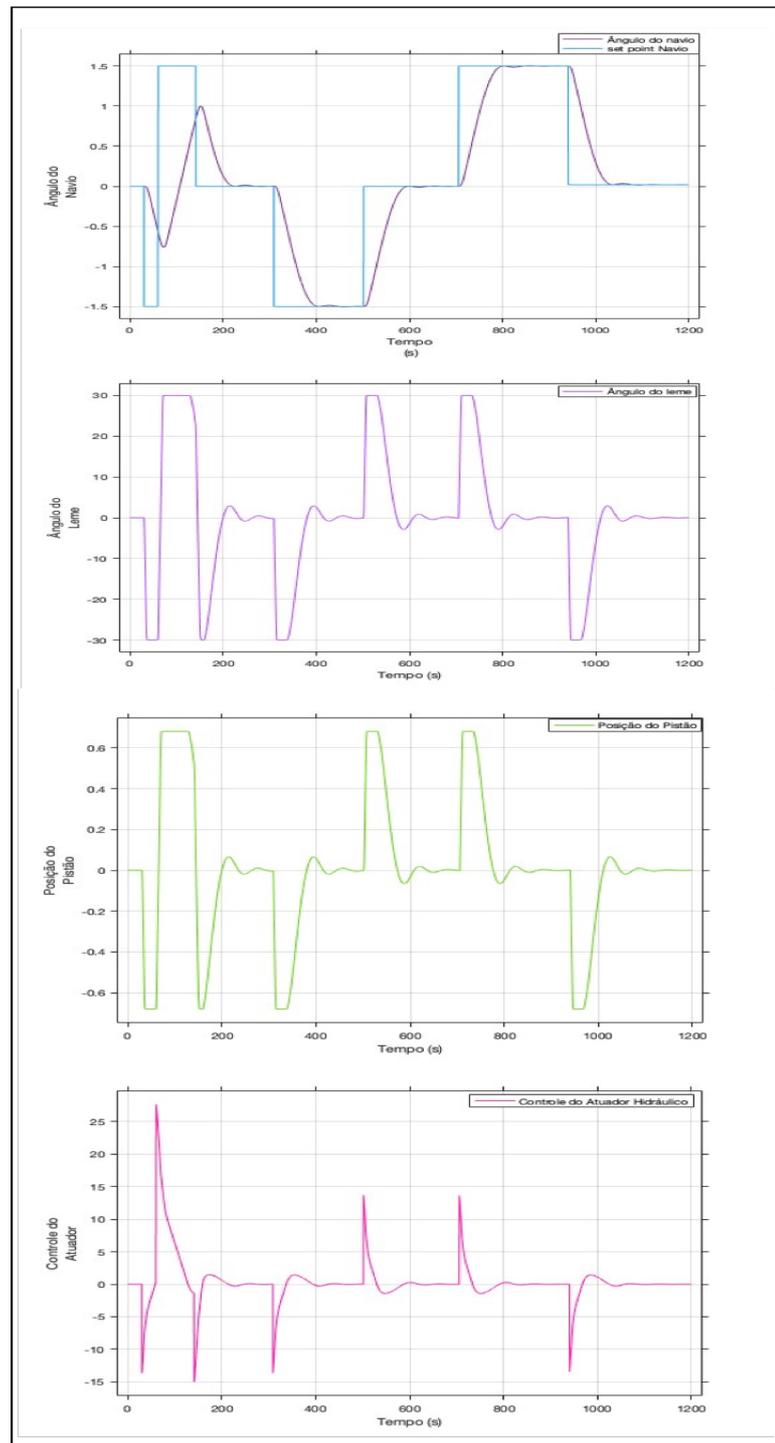


Fonte: Produzido pelo Autor.

4.8.3 Análise da implementação do sistema de controle do governo do navio

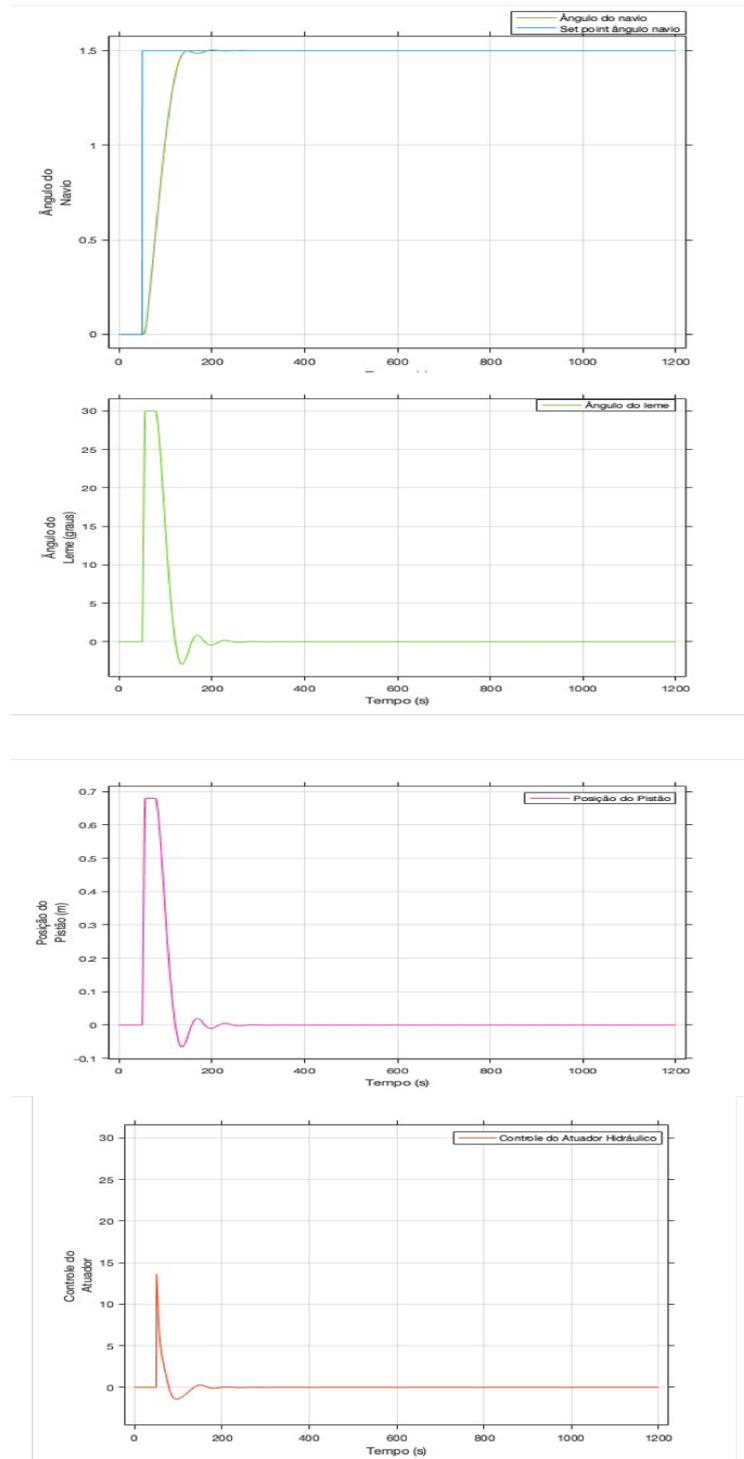
A partir das análises das seções prévias, conclui-se que o comportamento do controle do governo do navio é afetado pelos ganhos do controlador PD (K_p e K_d), foram então definidos aqueles valores que tornaram o sistema mais eficiente, sendo eles $K_p=1$ e $K_d=18$. As simulações do Gráfico 6 representam o comportamento do sistema de governo quando empregadas a função de entrada zigzag. Já no Gráfico 7 observa-se o comportamento para uma entrada degrau unitário e no Gráfico 8 o comportamento para uma entrada rampa. Sendo possível observar que independente do sinal de entrada, o sistema manteve-se eficiente.

Gráfico 6: Simulação do sistema considerando a entrada ZigZag, $K_p=1$ e $K_d=18$, referências de ângulo em graus.



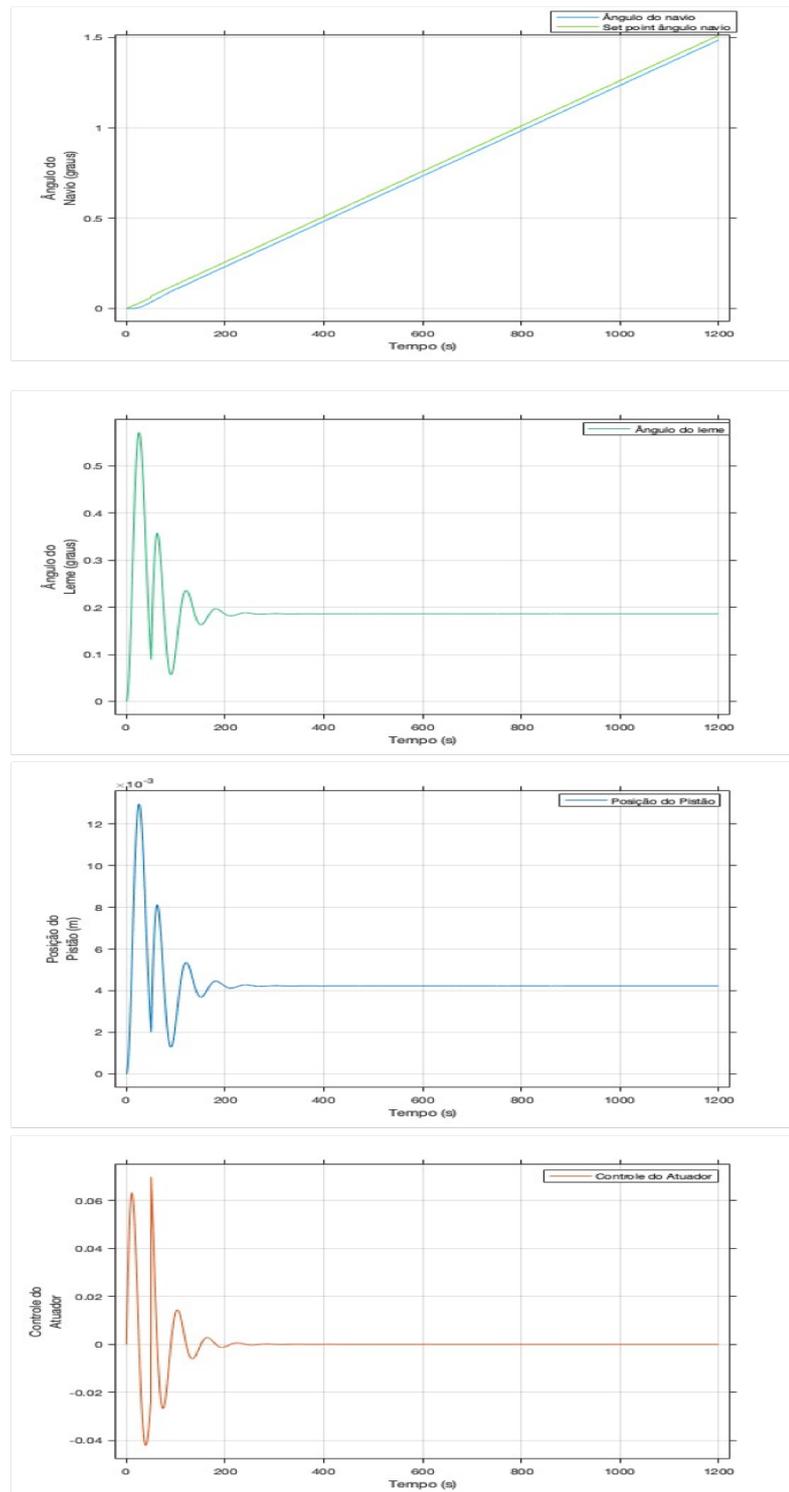
Fonte: Produzido pelo Autor.

Gráfico 7: Simulação do sistema considerando a entrada degrau, $K_p=1$ e $K_d=18$, referências de ângulo em graus.



Fonte: Produzido pelo Autor.

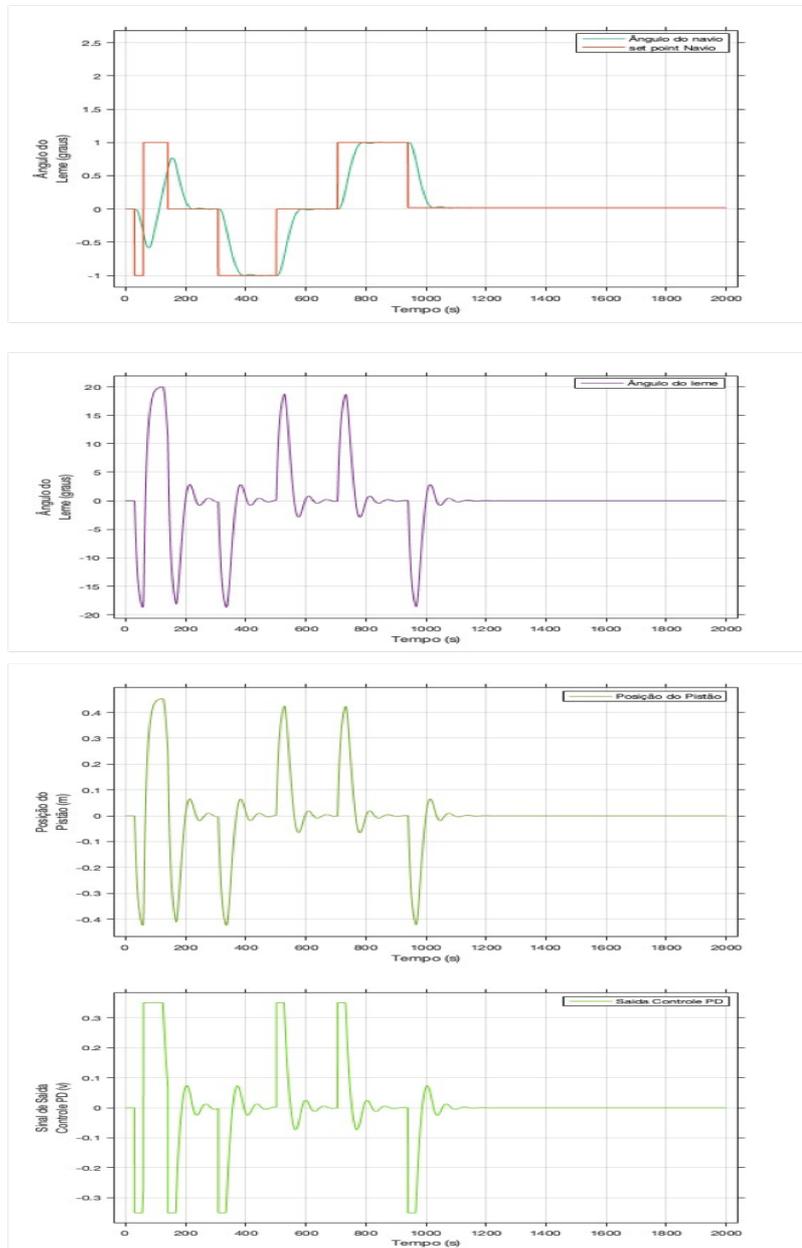
Gráfico 8: Simulação do sistema considerando a entrada rampa, $K_p=1$ e $K_d=18$.



Fonte: Produzido pelo Autor.

Ainda, o Gráfico 9 representa a simulação no modo de governo automático, sendo introduzido um ângulo máximo de 20 graus, e como rumo foi inserido um zigzag. Novamente, pôde ser comprovada a eficiência do sistema de controle.

Gráfico 9: Simulação do sistema no modo de governo automático, considerando a entrada zigzag, ângulo de leme limitado a 20°, $K_p=1$ e $K_d=18$.



Fonte: Produzido pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho ilustrou a utilização da programação Simscape para a modelagem física de um sistema de controle do governo do navio, a abordagem assemelha-se à realidade física e representa uma ferramenta adequada para modelar um sistema de controle do governo do navio sendo possível prever os efeitos de diferentes parâmetros alternativos no desempenho do rumo do navio. Os resultados obtidos através de uma sequência de manobras de mudança de rumo do navio, demonstram que é possível utilizar essa modelagem com o fim de garantir a operacionabilidade do sistema de controle do governo do navio. Mais ainda, foi demonstrado que o controlador garante uma resposta adequada para um modo de governo automático.

5.1 Considerações Finais

A proposta de modelo físico do sistema de governo do navio utilizando o programa Simscape, foi neste trabalho validada a partir dos resultados das simulações de alterações de rumo garantindo uma resposta adequada com base nos parâmetros de referência (Marinha do Brasil, 2005).

5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Futuros trabalhos propondo a análise do modelo físico do sistema de controle do governo do navio sob influência de interferências com padrões diferentes e aleatórios, utilizando o ambiente de simulação Simscape.

REFERÊNCIAS

Basic Principles of Modeling Physical Networks - MATLAB & Simulink. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/basic-principles-of-modeling-physical-networks.html>>. Acesso em: 12 ago. 2023.

CANETE, J.; MARTIN-AGUILAR, J. Ship-course modeling and control using the SIMSCAPE physical modeling environment. *Simulation*, p. 247–266, 15 dez. 2020.

DAS, S.; TALOLE, S. E. **Evolution of Ship’s Mathematical Model from Control Point of View.** International Conference and Technology Meet on Military and Marine Applications (IWCEM 2016). **Anais...** In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND TECHNOLOGY MEET ON MILITARY AND MARINE APPLICATIONS (IWCEM 2016). Lt Cdr Swarup Das, 11 nov. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/321012489_Evolution_of_Ship%27s_Mathematical_Model_from_Control_Point_of_View_Lt_Cdr_Swarup_Das>. Acesso em: 10 ago. 2023.

DAS, S. **Modeling and Simulation of Mechatronic Systems using Simscape.** Morgan & Claypool Publishers, 2020.

FONSECA, M. M.; BRAZIL. SERVIÇO DE DOCUMENTAÇÃO DA MARINHA. **Arte naval.** Rio de Janeiro: Serviço De Documentação Da Marinha, 2002.

FRANKLIN, G. F.; J. DAVID POWELL; ABBAS EMAMI-NAEINI. **Sistemas de Controle para Engenharia - 6ed.** Bookman Editora, 2013.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas S.A., 2002.

How Simscape Models Represent Physical Systems - MATLAB & Simulink. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/how-simscape-models-represent-physical-systems.html>>. Acesso em: 02 set. 2023.

How Simscape Simulation Works - MATLAB & Simulink. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/how-simscape-simulation-works.html>>. Acesso em: 12 out. 2023.

KATSUHIKO OGATA. **Engenharia de controle moderno.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

LEWIS, E. V. **Principles of Naval Architecture.** Society of Naval Architects & Marine Engineers, 1988.

MARINHA DO BRASIL. Centro de Instrução Almirante Alexandrino. **CIAA 118/041.** Máquinas Hidráulicas. Rio de Janeiro, RJ, Centro de Instrução Almirante Alexandrino, 2000.

_____. Diretoria de Engenharia Naval. **ENGENA-832/7-CV02-561-002.** Barroso Corvette - Steering Control And Monitoring System - Purchase Specification. Rio de Janeiro, RJ: Diretoria de Engenharia Naval, 2005.

MIGUENS, A. P.; DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO – MARINHA DO BRASIL. **Navegação: A ciência e a arte**. Rio de Janeiro: Serviço De Documentação Da Marinha, 1996.

MILLER, STEVE. Modeling Physical Systems as Physical Networks with the Simscape Language. **Mathworks**. 2010.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. São Paulo: Grupo Gen - LTC, 2012.

PEREZ, T.; BLANKE, M. Mathematical Ship Modeling for Control Applications. **DTU Orbit**. Denmark: DTU Library, 2002. Disponível em: <<https://orbit.dtu.dk/en/publications/mathematical-ship-modeling-for-control-applications>>. Acesso em: 20 set. 2023.

VAN AMERONGEN, J. Adaptive steering of ships: a model-reference approach. **Automatica**, v. 20, n. 1, p. 3–14, jan. 1984.

_____. **Ship Steering, theme: CONTROL SYSTEMS, ROBOTICS AND AUTOMATION – Volume XX**. [s.l.] EOLSS Publications, 2009.

APÊNDICE – A

LISTA DE PARÂMETROS DO NAVIO

Inercia do Leme	0,2
C	1
ro	1000
d	1,6 m
ek1	0,0375
Vship	1
Massa do Leme	50 Kg

LISTA DE PARÂMETROS DO GIROSCÓPIO

H	1
Fg	1
Js	1

LISTA DE PARÂMETROS DO ATUADOR E DO GIROSCÓPIO

Res1	1 Ohm
Res2	1 Ohm
Res3	1 Ohm
Res4	100 Ohm
Res5	910 Ohm
Res6	1 Ohm
Res7	1 Ohm
Pressão Hidráulica	10^5 Pa
Área máxima de passagem da Válvula	$4,05 \times 10^{-5}$ m ²
Massa do Pistão	4 Kg
Área do Pistão	4×10^{-3} m ²
Curso do Pistão	0,6 m
Ângulo-Voltagem conversor	30/24V
Kp	1