

2012.2



Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Projeto de Graduação

Transferência de Pessoas em Operações Offshore

- Personnel Basket Modificada -

Por

Pedro Cariello Botelho

Projeto de Graduação – EEWX00

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

TRANSFERÊNCIA DE PESSOAS EM OPERAÇÕES OFFSHORE
- PERSONNEL BASKET MODIFICADA -

Autor: _____
Pedro Cariello Botelho

Orientador de Estágio: _____
Max Suell Dutra

Orientador Acadêmico: _____
Afonso Celso Del Nero Gomes

ECA
Outubro/2012

Resumo

A descoberta das reservas na camada do pré-sal ampliaram as expectativas e relevância do Brasil no setor de óleo e gás no mundo. Estas jazidas estão presentes em territórios offshore e para a sua exploração diferentes tecnologias foram desenvolvidas. Este projeto tem como foco o desenvolvimento de mecanismos de amortecimento para as transferências de tripulantes no embarque e desembarque e em operações de manutenção e instalação de plataformas *offshore*. Apresenta-se neste trabalho uma visão abrangente das técnicas e normas de movimentação de pessoas, e mecanismos alternativos a *personnel transfer basket* para estas operações.

Palavras-Chave:

Operações offshore, transferência de pessoas, controlador PID, lagrangeano, *personnel basket*, mecanismo de amortecimento, peso morto.

Conteúdo

Resumo	iii
Palavras-Chave:.....	iii
1. Introdução.....	8
2. Transferência de Pessoal	10
2.1. Tipos de Transferência de Pessoas	10
2.1.1. Pequenos barcos ou lanchas.....	10
2.1.2. Barcos tripulação (<i>Crew Boats</i>).....	11
2.1.3. Cestas de transferência de pessoas (<i>Personnel Basket</i>)	11
2.2. Personnel Basket.....	14
2.2.1. Composição e especificações.....	14
2.3. Especificações de Segurança.....	16
2.3.1. Instituições Reguladoras	18
3. Revisão Teórica	21
3.1. Modelagem de Sistemas Dinâmicos	21
3.2. Modelagem de Sistemas – Método de Lagrange	21
3.2.1. Energias.....	21
3.2.2. Energia Potencial.....	22
3.2.3. Equações de Movimento de Lagrange.....	23
3.3. Controlador PID.....	23
3.3.1. Realimentação Negativa	23
3.3.2. Equações Controlador PID	25
3.3.1. Sintonia de Controladores PID	25
3.3.1. MatLab - Aplicações	26
4. Sistemas de Amortecimentos Propostos	28
4.1.1. Modelagem	29
4.2. Plataforma de Simulações	31
4.3. Modelo 1 - Peso Morto Acoplado	34
4.3.1. Modelagem	36
4.4. Modelo 2 – Amortecimento Ativo – Complexo de Turbinas Acoplado a Base.....	53

4.4.1.	Modelagem	54
4.4.2.	Sintonia do Controlador PID	60
4.4.3.	PID Ajustado.....	64
4.5.	Modelo 3 – Amortecimento Ativo – Complexo de Turbinas Acoplado ao Guindaste.....	66
4.5.1.	Modelagem:.....	68
4.5.2.	PID Ajustado.....	74
4.5.3.	Robustez do Controlador – Variação de Peso.....	77
5.	Considerações Finais.....	80
5.1.	Estudos Futuros	81
6.	Referências.....	84
7.	Anexos.....	86
7.1.	GUI_Animação.m	86
7.2.	pbm1_init.m.....	94
7.3.	pbm1.m.....	95
7.4.	pmb1_simul.m	96
7.5.	pmb1_graficos.m	97

Figuras

Figura 2.1: Exemplo de transferência da tripulação realizada através de uma lancha.	11
Figura 2.2: Exemplo de transferência realizada através de um Barco Tripulação	11
Figura 2.3: Personnel Basket Billy Pugh, deslocando duas pessoas.	12
Figura 2.4: Personnel Basket Esvagt, deslocando duas pessoas.	13
Figura 2.5: Exemplo de uma Personnel Transfer Capsule em utilização.	13
Figura 2.6 - Diagrama de composição de uma personnel basket.....	14
Figura 2.7: Diagrama de procedimentos para uma operação de içamento.	18
Figura 3.1 Diagrama de blocos de uma sistema com realimentação negativa	24
Figura 3.2: Diagrama de blocos de um sistema realimentado negativamente com a presença de distúrbios e ruídos.	25
Figura 4.1: Representação de uma cesta de transferência de pessoal.	28
Figura 4.2: Diagrama simplificado da PB original.....	29
Figura 4.3 Plataforma de Simulações - Tela Inicial	32
Figura 4.4 Plataforma de Simulações - Operação.....	33
Figura 4.5 - Personnel Basket Modificada - Peso morto acoplado	35
Figura 4.6: Modelo Proposto - Peso Morto Acoplado - Diagrama Simplificado.....	36
Figura 4.7: Representação de posição de energia do sistema nula.....	42
Figura 4.8: Simulação 1 - Verificação do comportamento físico do sistema.....	44
Figura 4.9: Simulação 2 - Verificação qualitativa do amortecimento ocasionado pelo modelo proposto.	46
Figura 4.10: Ciclo de Simulação : Hsa = 1m	48
Figura 4.11: Ciclo de Simulação : Hsa = 3m	48
Figura 4.12: Ciclo de Simulação : Hsa = 5m	49
Figura 4.13: Ciclo de Simulação : Hsa = 7m	49
Figura 4.14: Mecanismo de encapsulamento do peso morto.	50
Figura 4.15: Simulação: Hsa = 0,9m – restrições físicas.....	51
Figura 4.16: Modelo 1 - Peso Morto Acoplado - Configuração Final.....	52
Figura 4.17 : Modelo 2 - Sistema de turbina acoplado a base da cesta	53
Figura 4.18: Modelo 2 - Diagrama Simplificado.....	54
Figura 4.19: Representação do Simulink do Modelo 2	57
Figura 4.20: JetCat - P200 - SX	58
Figura 4.21: Representação de diagrama simplificado do complexo de turbinas.....	59
Figura 4.22: Gráfico representativo do modelo 2 quando $K=K_u=500$	60
Figura 4.23: Modelo 2 - Resultado comparativo de performance PID.	62
Figura 4.24: Modelo2 - Comportamento da energia.....	62
Figura 4.25:Modelo 2: Resposta do controlador PID.....	63
Figura 4.26: Modelo 2 - Resultado comparativo de performance PID ajustado	64
Figura 4.27: Modelo2 - Comportamento da energia. Comparativo PID x PID ajustado	65
Figura 4.28: Modelo 2: Resposta do controlador PID ajustado	65

Figura 4.29: Sistema de Amortecimento avulso - Modelo 3	67
Figura 4.30: Modelo 3 - Diagrama de massas	68
Figura 4.31: Diagrama de blocos do modelo 3 - Simulink	71
Figura 4.32: Gráfico representativo do modelo 3 quando $K=K_u=500$	72
Figura 4.33 Modelo 3 - Resultado comparativo de performance PID.	73
Figura 4.34: Modelo 3 - Comportamento da energia.	74
Figura 4.35: Modelo 3: Resposta do controlador PID.....	74
Figura 4.36: Modelo 3 - Resultado comparativo de performance PID ajustado	75
Figura 4.37: Modelo 3 - Comportamento da energia. Comparativo PID x PID ajustado	75
Figura 4.38: Modelo 3: Resposta do controlador PID ajustado	76
Figura 4.39 : Modelo 3 - Resposta a variação do peso da cesta.	78
Figura 4.40: Modelo 3 - Resposta do controlador PID - $m_b = 4.000\text{Kg}$	79
Figura 5.1: Plataforma completa: parâmetros para simulação	82
Figura 5.2: Plataforma completa: parâmetros para simulação (2)	82

1. Introdução

O setor energético representa um segmento de mercado de fundamental importância na economia mundial e o Brasil apresenta uma crescente relevância nesse setor. Atualmente a maior empresa de valor de mercado no país, a Petrobrás, está entre as dez maiores empresas do mundo e considerando o setor de energia ocupa a terceira posição, com um valor de mercado superior a 155 bilhões de dólares.

O setor energético brasileiro apresenta uma crescente expectativa econômica principalmente após 2007 com o anúncio da descoberta das reservas de pré-sal. Localizadas do litoral do Espírito Santo até o de Santa Catarina, estas reservas estão localizadas a centenas de quilômetros da costa e a mais de sete mil metros de profundidade (3.000 de água e 4.000 de rochas).

Nos últimos cinco anos muitos avanços em tecnologias de extração e infraestrutura já foram alcançados e a viabilidade técnica e econômica já estão comprovadas. Atualmente, existe extração de 180.000 barris de petróleo por dia, provenientes destas novas reservas.

O pré-sal representou um marco no setor energético mundial e de acordo com Daniel Yergin, economista americano considerado uma das maiores autoridades mundiais em energia em entrevista a revista EXAME em junho de 2012, esta descoberta abre um novo horizonte para o país e aproxima o Brasil das principais potências energéticas do mundo.

As reservas de pré-sal descobertas até o momento prometem dobrar a quantidade atual do país e chegar próxima a 31 bilhões de barris. Outro dado que demonstra a importância destas novas reservas é o fato de que mais de 30% de todos os barris de petróleo descobertos nos últimos cinco anos estão em território nacional. Com estes novos potenciais poços de petróleo o Brasil passa a ser o sexto maior detentor de reservas de petróleo sendo inferior somente à Arábia Saudita, Emirados Árabes, Irã, Iraque e Kuwait.

O Brasil é o décimo sétimo produtor de petróleo, mas até 2020 quando o projeto de extração pré-sal estiver em operação integral deve saltar para oitavo. Assim o setor de óleo e gás que já representou em 2011 aproximadamente 10% do produto interno bruto do país deve dobrar sua relevância na economia nacional.

Observando todos estes dados, muitos especialistas afirmam que o desenvolvimento econômico da próxima década no Brasil terá como pilar central o setor de energia, pois estima-se uma geração de 2 milhões de empregos na cadeia do petróleo e o investimento geral deve chegar a 270 bilhões de dólares até 2020.

Todo este potencial de desenvolvimento está concentrado principalmente no litoral da região Sudeste, mais especificamente o estado do Rio de Janeiro. Além disso, todas essas novas reservas estão

em território offshore e se torna necessário o desenvolvimento de tecnologias para o transporte e deslocamento de equipamentos e principalmente pessoal, uma vez que quando mais afastado da costa maior a hostilidade do território.

Considerando todos estes aspectos e potenciais, este trabalho aborda especificamente o transporte e deslocamento de pessoas para estes ambientes. Uma vez que é notável em alguns acontecimentos e relatos o risco de acidentes nestes tipos de operações.

2. Transferência de Pessoal

As operações *offshore* apresentam a necessidade constante de transferência de pessoal em diferentes situações. Nas etapas de instalação e início de operações estes deslocamentos são mais frequentes e abrangentes, sendo necessário o deslocamento para diferentes pontos da plataforma. Com o estabelecimento das operações estes transportes passam a ser característicos para embarques e desembarques em trocas de turnos e em manutenções periódicas.

Estas operações possuem a necessidade constante de deslocamento de pessoal entre navios e outras determinadas estruturas *offshore* como as plataformas. Essas atividades de transferência possuem um risco direto de acidentes com vítimas e, com o objetivo de evitá-los, existem diversas orientações e normas para realizá-los. Essas transferências podem ser realizadas por diferentes métodos e com auxílio de variados equipamentos. Alguns dos métodos mais comuns são:

- Pequenos barcos ou lanchas;
- Barcos tripulação ou de suporte;
- Cestas de transferência de pessoas (Personnel Basket);
- Pontes e escadas de acomodação;
- Helicópteros.

Este projeto descreve a seguir sucintamente alguns dos métodos mencionados acima, mas tem como foco as “Cestas de Transferência de Pessoas” (*Personnel Basket - PB*) e apresenta uma proposta de equipamento alternativo e as simulações referentes a ele.

2.1. Tipos de Transferência de Pessoas

2.1.1. Pequenos barcos ou lanchas

A transferência de pessoas realizada por pequenos barcos ou lanchas é a menos recomendada entre os tipos de transferências utilizadas e segundo a IMCA SEL 025, esse tipo de método deve ser usado somente quando os métodos alternativos não estão disponíveis ou são menos seguros. Essa precaução se deve às dificuldades intrínsecas a esse método. Além disso, a mesma norma recomenda evitar esse tipo de operação em horários com pouca luminosidade.



Figura 2.1: Exemplo de transferência da tripulação realizada através de uma lancha.
(Imagem retirada da Guarda Costeira dos Estados Unidos)

2.1.2. Barcos tripulação (*Crew Boats*)

O método de transferência de pessoal através de um barco tripulação é considerado mais seguro do que o anterior uma vez que essas embarcações são projetadas para esse tipo de tarefa. Assim sendo as dificuldades do método anterior são amenizadas, mas a priorização da utilização de outros métodos como os apresentados posteriormente ainda é recomendada devido ao maior nível de segurança.



Figura 2.2: Exemplo de transferência realizada através de um Barco Tripulação
(Imagem retirada de ngboat.com)

2.1.3. Cestas de transferência de pessoas (*Personnel Basket*)

As cestas de transferência de pessoas têm uma grande aceitação no mercado devido a sua flexibilidade e por possuírem uma utilização muito concentrada nas operações que envolvem plataformas de petróleo. Este método de transferência é considerado a maneira alternativa ao

helicóptero para deslocamento de navios para as plataformas, que em operações de manutenção e reparo de áreas de difícil acesso é o método mais utilizado.

Todo o processo deste método depende de um guindaste contido na plataforma e o seu desempenho está ligado diretamente à habilidade e cautela do operador. Além disso, o clima é um limitador deste tipo de operação, pois um vento de incidência elevada pode levar a um comportamento pendular acentuado e isso pode comprometer a segurança das pessoas que se encontram na cesta.

Existem diferentes modelos no mercado de *personnel basket* (PB), os principais tipos destes equipamentos são apresentados a seguir:

Billy Pugh:

A Billy Pugh é a *personnel basket* mais tradicional, mas ainda a de maior utilização, onde as pessoas se mantêm seguras na parte de fora da estrutura. Esta estrutura é composta basicamente de uma placa circular flutuante com uma amarração que permite o apoio dos tripulantes.



Figura 2.3: Personnel Basket Billy Pugh, deslocando duas pessoas.
(Imagem retirada de itrademarket.com)

Esvagt:

A Esvagt é uma alternativa mais segura a Billy Pugh, onde as pessoas são colocadas na parte interna de uma estrutura rígida. É basicamente uma Billy Pugh com uma estrutura metálica para encapsulamento dos tripulantes de maneira a evitar a queda e outros acidentes.



Figura 2.4: Personnel Basket Esvagt, deslocando duas pessoas.
(Imagem retirada de esvagt.dk.)

Personnel Transfer Capsule:

As cápsulas de transferência são as estruturas mais modernas e seguras para esse tipo de transferência onde o tripulante fica sentado e com o sinto de segurança afivelado. Apesar de representar o tipo mais seguro para esse método de transferência, não está muito disseminado no mercado por possuir um custo muito elevado em relação aos anteriores e menor flexibilidade para as operações de manutenção.



Figura 2.5: Exemplo de uma Personnel Transfer Capsule em utilização.
(Imagem retirada de offshore-news.eu)

2.2. Personnel Basket

Este projeto apresenta diferentes mecanismos e métodos para a transferência de pessoas em operações offshore e tem como objetivo propor um mecanismo alternativo baseado no modelo de uma *personnel basket*. Dessa forma, é apresentado um estudo mais detalhado deste mecanismo e suas especificações.

2.2.1. Composição e especificações

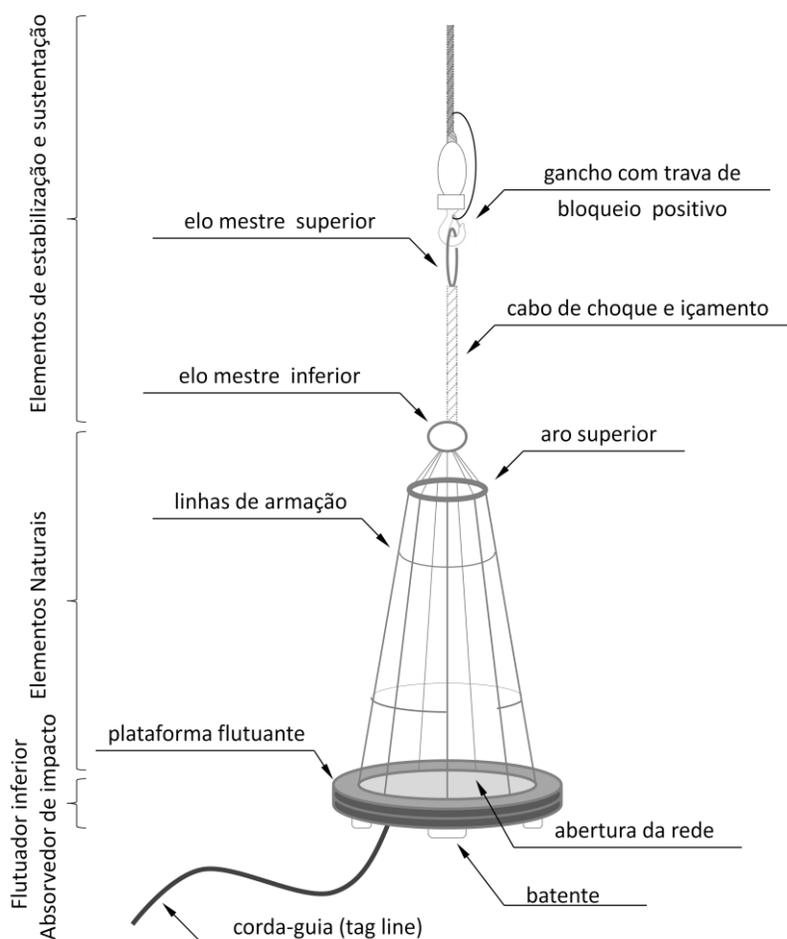


Figura 2.6 - Diagrama de composição de uma personnel basket

- **Gancho com trava de bloqueio positivo:** A Billy Pugh Co. recomenda que o guindaste responsável por essa operação utilize um gancho com trava de bloqueio positivo para que dessa

forma possíveis movimentações turbulentas do equipamento não resultem em um desacoplamento da personnel basket ao cabo de apoio do guindaste.

- **Elo mestre superior:** O anel de carga superior deve seguir a NBR ISO 16798;
- **Cabo de choque e içamento:** Este é o conjunto de cabos responsável pela sustentação e estabilização vertical da personnel basket. Ele é composto pelos seguintes elementos: cabo de sustentação, cabo de segurança e conjunto estabilizador. A descrição junto à regulamentação da ABNT é apresentada a seguir.
 - **Cabo de Sustentação:** Este componente deve ser de aço galvanizado, com diâmetro mínimo de 16 mm, extremidade com trançado flamengo e presilha de aço, montado com sapatilhas de aço galvanizado.
 - **Cabo de Segurança:** Este elemento possui as mesmas especificações do cabo de sustentação, mas possui o comprimento 100 mm maior.
 - **Conjunto Estabilizador:** Fixado com peças de aço-carbono com tratamento anticorrosivo e com paras de proteção este elemento deve ser composto de pelo menos cinco tirantes de material elástico resistente a fadiga.
- **Elo mestre inferior:** O anel de carga inferior deve seguir a NBR ISO 16798 e os cabos da rede cônica devem ser amarrados a este formando uma alça de sustentação.
- **Aro Superior:** Este elemento deve ser constituído de um tubo de alumínio, com diâmetro externo mínimo de 38 mm em seu interior e um material sintético, com diâmetro mínimo de 76 mm, resistente à abrasão e que tenha condições de garantir a fluibilidade de todo o conjunto, no seu perímetro exterior.
- **Linhas de Armação:** As linhas de armação devem ser organizadas de maneira cônica como apresentado na Figura 2.6. Deve ser confeccionada de cabos de polipropileno tipo multifilamento (com proteção contra deterioração através da luz solar – raios ultravioletas) ou cabos de poliéster e deve satisfazer as seguintes características:
 - Capacidade de suportar 40 kN de carga;
 - Constituído de pares de no mínimo três cabos contínuos, amarrados diametralmente ao aro inferior e possuir pelo menos cinco ligações horizontais.
- **Plataforma Flutuante:** A plataforma flutuante é composta pelos seguintes componentes: aro inferior, absorvedor de impacto, rede de fundo e flutuador inferior. A descrição junto à regulamentação da ABNT é apresentada a seguir.

- **Aro inferior:** Este componente deve ser composto por dois tubos de aço-carbono, com diâmetro mínimo de 40 mm e uma altura máxima de 200 mm.
 - **Absorvedor de Impacto:** Este elemento deve ser confeccionado de material sintético resistente a abrasão e impacto, com característica antiderrapante, não deve possuir um diâmetro menor que 152 mm e seu posicionamento deve ser realizado de modo que não seja deslocado sobre a estrutura do aro inferior.
 - **Rede de fundo:** Confeccionado de polipropileno tipo multifilamento com diâmetro mínimo de 10 mm e uma malha não superior a 250 mm x 250 mm.
 - **Flutuador Inferior:** Deve ser projeto com material sintético que permita a flutuabilidade de todo o conjunto da cesta.
- **Corda-guia (tag-line):** É o cabo fixado na plataforma de flutuação inferior da *personnel basket* que permite o controle do equipamento pelos tripulantes não embarcados na cesta para as situações de início e final do transporte. O diagrama apresenta apenas uma corda-guia, mas esse número pode variar de acordo com o modelo do equipamento.
 - **Batente:** Componente fixado na parte inferior do equipamento com o objeto de garantir estabilidade e aderência ao piso. A ABNT através da norma NBR 10876:2011 determina que o batente deva ser dimensionado de maneira a evitar o contato da plataforma flutuante com o piso.

2.3. Especificações de Segurança

A transferência de pessoas era utilizada somente em casos de emergência e geralmente realizada entre embarcações avariadas ou quando a presença de um especialista era essencial para contornar determinadas situações de emergência. Com o desenvolvimento da indústria de petróleo em territórios *offshore* e o aumento do trânsito de mercadorias entre os continentes a necessidade de maior dinâmica em suas operações aumentou-se a demanda por esses tipos de operações com pessoal.

Além desses fatores, as plataformas de petróleo *offshore* trabalham quase toda a sua tripulação embarcada, isso torna a necessidade de transferência de pessoal uma rotina constante. Apesar da redução das operações com utilização de guindastes devido ao aumento das transferências realizadas a partir de helicópteros, em algumas situações de reparo e condições meteorológicas é necessário a utilização de guindastes e cestas de transferências de pessoas (*personnel transfer basket*).

Existem notícias recorrentes de acidentes durante a transferência de pessoas. Segundo a “The Standard” em sua publicação “*Personnel Transfer using Ship’s Cranes*” esses acidentes podem possuir vítimas fatais e/ou ferimentos sério.

- Lesões nas costas quando o contato com o convés é brusco;
- Fatalidades com os rompimentos do cabo do guindaste;
- Fatalidades com a queda de pessoas no mar sem a utilização de salva-vidas e equipamentos de segurança;
- Lesões no joelho devido a escorregões causados por convés molhados;
- Lesões causadas quando a basket atinge uma grade de segurança da embarcação;
- Pessoas derrubadas da basket quando essa encontra obstáculos.

A IMCA (*International Marine Contractors Association*) apresenta algumas recomendações para a avaliação dos riscos de uma transferência de pessoal no guia IMCA SEL 025 -2010 . Segunda a IMCA a avaliação de risco deve considerar minimamente os seguintes itens:

- Necessidade da transferência e as alternativas disponíveis;
- Frequência de transferências e números de pessoas envolvidas;
- Iluminação em todas as áreas da operação;
- Perigos de deslizamentos;
- Navegabilidade das embarcações envolvidas;
- Condições de todos os equipamentos usadas para a transferência de pessoal, incluindo a certificação quando apropriado;
- Operabilidade e restrições do equipamento de içamento;
- Condições de disponibilidade de equipamentos de segurança;
- Comunicação entre os responsáveis;
- Treinamento e competência de todas as pessoas envolvidas no auxílio e operação da transferência;
- Durante a transferência de pessoal, sempre existe a possibilidade de homem ao mar. Considerações para a recuperação de pessoas da água devem ser tomadas.
- Situações climáticas:
 - Velocidade e direção do vento;
 - Estado do mar incluindo altura das ondas e direções;
 - Velocidade e direção da maré e do vento;
 - Visibilidade;
 - Chuva, neve e gelo.
- Movimento das embarcações (pitch , roll and heave)

A partir destas orientações a IMCA desenvolveu uma metodologia de verificação de riscos de operação de transferência que permite ao operador traçar um processo de procedimentos que permite avaliar os riscos destas operações de transferência.

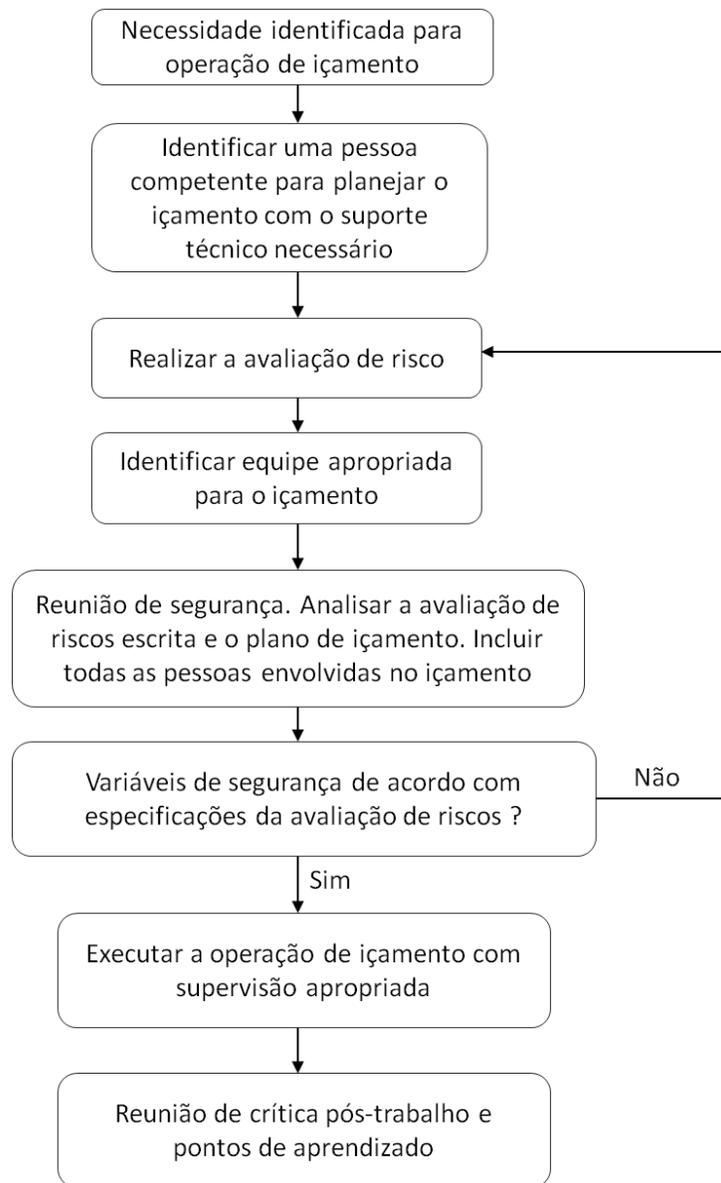


Figura 2.7: Diagrama de procedimentos para uma operação de içamento.

2.3.1. Instituições Reguladoras

A transferência de pessoal em território *offshore* é uma atividade de alto risco e apresenta algumas dificuldades técnicas não triviais, além de lidar com o risco de acidentes e fatalidades. Visando

minimizar os acidentes e padronizar procedimentos diversas instituições reguladoras determinam rotinas de trabalho e especificações de equipamentos que fortalecem o nível de segurança das operações desta natureza.

Outro fato que revela a crescente preocupação das instituições nesse segmento é a publicação recente de novas normas. Com o objetivo de transmitir maior verossimilhança às simulações e reprodução das mesmas, todos os procedimentos abordados futuramente neste trabalho levam em consideração o comprimento das especificações das normas e instituições apresentadas abaixo.

The Standard Club:

O *Standard Club* é uma associação mútua de seguro de propriedade dos membros donos de navios que é controlado por uma mesa diretora. Os principais motivos de cobertura de P&I (Proteção e Indenização) são:

- Danos físicos causados às docas, objetos fixos ou flutuantes;
- Danos por colisão causados a outros navios;
- Perda de carga ou danos;
- Poluição;
- Perda de vidas e danos à tripulação, passageiros e terceiros.

Visando minimizar estes tipos de acidentes a *Standard Club* realiza publicações periódicas com uma seleção das regulamentações e melhores práticas de mercado em terminada atividade náutica. A publicação da *Standard Club* relevante a este projeto é apresentada a seguir.

- Standard Safety Personnel Transfer – Julho 2010 – Personnel Transfer Using Ships's Cranes.

IMCA:

A IMCA - *International Marine Contractors Association* (Associação internacional de Contratadas Marítimas) – representa as empresas do setor de engenharia submarina, naval e *offshore*. Atuando conjuntamente com seus membros trabalha na melhoria e regulamentação das melhores práticas de mercado com intenção de elevar os padrões de qualidade, segurança e meio ambiente no setor.

Essa associação se divide em quatro setores: mergulho, marítima, sistemas remotos e veículos remotamente operados e içamento *offshore*. Essa última contém as orientações através de publicações mais relevantes ao trabalho corrente. Apesar de relativamente recente, fundada em 1995, pouco mais de 16 anos, já conta com mais de 800 empresas associadas entre elas as mais influentes no mercado *offshore* como Petrobras, Chevron, BP, BHP Billion, ExxonMobil e Shell.

Devido a essa relevância de mercado, além de conteúdo altamente atual, bem documentado e com excelente credibilidade das maiores empresas do setor este trabalho se baseia fortemente em suas publicações.

- IMCA SEL 019, IMCA M 187 – Outubro de 2007 – **Orientações para Operações de Içamento;**
- IMCA SEL 025, IMCA M 202 – Março de 2010 – **Guidance on the Transfer of Personnel to an From *Offshore* Vessels;**
- IMCA SEL 08/01 – Março de 2001 – **Guideline on Procedures for Transfer of Personnel by Basket on the UK Continental Shelf.**

ABNT:

A Associação Brasileira de Normas Técnicas foi fundada em 1940 e representação a instituição responsável pela normalização técnica do Brasil. A ABNT é representante oficial de diversas instituições normativas internacionais como a ISO (*International Organization for Standardization*), IEC (*International Electrotechnical Commission*), COPANT (Comissão Panamericana de Normas Técnicas) e a AMN (Associação Mercosul de Normalização).

A ABNT através de suas publicações determina normas de segurança, qualidade e medidas para diferentes campos das ciências no Brasil. A Norma ABNT NBR 10876:2011 publicada em 24 de outubro de 2011 e válida a partir de 24 de novembro de 2011 é focada na especificação das Cestas de Transferência de Pessoal e todas as simulações e teste levaram em conta as normas e especificações descritas nessas.

- ABNT NBR 10876:2011 – Outubro de 2011 – **Estruturas oceânicas – Cestas de transferência de pessoal – Especificação.**

3. Revisão Teórica

A proposta de estudo composta nesse trabalho apresenta conteúdos pertinentes a diversas disciplinas do curso de Engenharia de Controle e Automação e esta revisão teórica tem como objetivo introduzir os conceitos utilizados na formulação deste trabalho, além de incorporar uma didática mais fluída que permitirá aos estudantes intermediários do curso um acompanhamento e entendimento das etapas e procedimentos adotados neste projeto.

3.1. Modelagem de Sistemas Dinâmicos

A modelagem de sistemas dinâmicos é de fundamental importância para compreensão do comportamento de um determinado mecanismo uma vez que expressa a evolução dos graus de liberdade através de equações matemáticas. A partir destas equações é possível realizar simulações e manipulações de maneira a compreender de forma mais profunda as possíveis peculiaridades de cada sistema.

Em posse das equações provenientes da modelagem do sistema é possível realizar estudos de comportamento e manipulação de variáveis para que se possa encontrar um comportamento mais adequado à aplicação proposta. Além disso, se pode implementar técnicas diversas de controle com o objetivo de manipular o comportamento do sistema até se encontrar um mecanismo que supra todas as necessidades e restrições desejadas para a solução do problema proposto.

3.2. Modelagem de Sistemas – Método de Lagrange

Um sistema pode ser modelado por diversos métodos diferentes, deste a utilização das equações de movimento até a utilização de modelos que utilizam as energias do sistema para tal fim. Este projeto utilizará o método de Lagrange para a obtenção das equações de movimento do sistema.

O método de Lagrange se utiliza das energias do sistema (energia cinética e energia potencial) para a obtenção das equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico do mecanismo estudado.

3.2.1. Energias

Energia Cinética

A energia cinética é a forma de energia presente em elementos que estão em movimento e pode ser subdividida em dois grupos: Energia Cinética de Translação e Energia Cinética de Rotação.

A energia cinética de translação é representada em função da massa m do objeto e de sua velocidade v . Em alguns modelos a abordagem angular é mais intuitiva, dessa forma a velocidade fica sendo representada pela velocidade angular $\dot{\theta}$ e pelo raio r .

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m (r \dot{\theta})^2 \quad (3.1)$$

Uma grande quantidade de mecanismos pode ter a representação de seu modelo dinâmico estabelecida somente pela Energia Cinética de Translação uma vez que as massas presentes em sua composição podem ser aproximadas, com uma precisão razoável, para os elementos cujos momentos de inércia são representados por um corpo concentrado de massa, ou seja seu momento de inércia é igual a zero.

Por outro lado existem casos cuja dinâmica dos momentos de inércia causam uma interferência significativa no comportamento geral do sistema. Nesses casos para um modelo mais próximo da realidade é necessário a utilização dos momentos de inércia dos elementos através da utilização da Energia Cinética de Rotação. Esta energia é representada pelo momento de inércia, I , do elemento e pela velocidade rotacional w .

$$E_c = \frac{1}{2} I w^2 \quad (3.2)$$

O Momento de Inércia I é calculado através da resolução da integral representada a seguir, onde r representa a distância ao eixo de rotação.

$$I = \int r^2 dm \quad (3.3)$$

A simples alteração do eixo de referência de rotação altera a configuração de momento de inércia e este deve ser recalculado. Uma maneira para facilitar o cálculo dessa nova configuração é através do **Teorema dos Eixos Paralelos**: Se I_{cm} é o momento de inercial em referência ao eixo do centro de massa, então um eixo paralelo a uma distância h do eixo do centro de massa é representado pela equação a seguir, onde M representa a massa total do sistema.

$$I = I_{cm} + M h^2 \quad (3.4)$$

3.2.2. Energia Potencial

A energia potencial é representada pela massa m a uma altura h , em relação a um ponto referencial onde a energia potencial é considerada nula, imerso em um campo gravitacional constante g .

$$E_p = mgh \quad (3.5)$$

3.2.3. Equações de Movimento de Lagrange

Após determinar as energias do sistema podemos determinar o lagrangeano, representado pela diferença entre energia cinética e potencial do sistema.

$$\mathcal{L}(t, q_1, q_2, \dots, q_{s-1}, q_s, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_{s-1}, \dot{q}_s) = T - U \quad (3.6)$$

Em posse do lagrangeano é possível obter as equações que descrevem o movimento de lagrange através da resolução da Equação (3.7).

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = F_{\text{não conservativas}} \quad i = (1, 2, \dots, s - 1, s) \quad (3.7)$$

\mathcal{L} : Lagrangiano

T: Energia cinética do sistema

U: Energia potencial do sistema

t : Tempo

q_j : Coordenadas generalizadas

3.3. Controlador PID

O controlador PID é utilizado por inúmeros tipos de aplicações de controle e é fortemente empregado na indústria, por representar um modelo de controle amplamente difundido e apresentar um excelente resultado, mesmo sendo considerado relativamente simples sobre a ótica de controladores mais complexos.

3.3.1. Realimentação Negativa

A realimentação negativa é um princípio básico para a realização de controles PID e tem o seu princípio básico apresentado pela Figura 3.1.

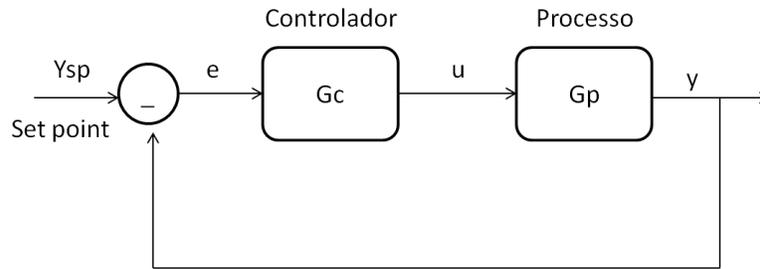


Figura 3.1 Diagrama de blocos de uma sistema com realimentação negativa

Através do sistema de blocos apresentados pode-se calcular a equação de saída do sistema, como representado pelas equações abaixo.

$$\begin{aligned}
 e &= y_{sp} - y \\
 u &= G_c \cdot e \\
 y &= u \cdot G_p
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

Por fim obtém-se:

$$y = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} y_{sp}
 \tag{3.9}$$

A Equação (3.9) representa a saída y do sistema. Considerando que o processo (G_p) é uma variável não manipulável uma vez que se trabalha em seu controle após a modelagem do sistema, ou seja a modelagem de G_p , tem-se que o controle do sistema será realizado por G_c , representação da equação de transferência do modelo do controlador. Dessa forma pode-se afirmar que quanto maior o ganho do controlador mais a saída do sistema se aproximará do *set point*, valor desejado.

Quando implantado, existem situações adicionais as apresentadas anteriormente que devem ser consideradas como a presença de distúrbios (d) e ruídos (n). A Figura 3.2 representa o diagrama de blocos de uma realimentação negativa que possui estas considerações

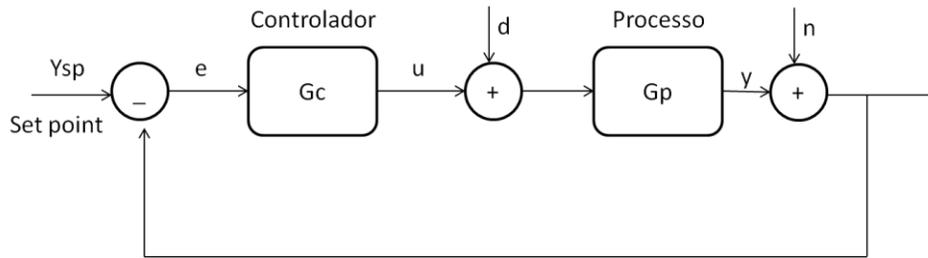


Figura 3.2: Diagrama de blocos de um sistema realimentado negativamente com a presença de distúrbios e ruídos.

3.3.2. Equações Controlador PID

O controlado PID pode ser representado numericamente pela Equação (3.10).

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de}{dt}) \quad (3.10)$$

Neste caso temos e , sendo o erro de controle ($e = y_{sp} - y$) e u representando efetivamente a variável de controle. Além disso, pode-se identificar as variáveis T_i que representa o tempo integral, T_d representado o tempo derivativo e finalmente K como sendo o ganho proporcional deste sistema.

Outra maneira comum de se encontrar a equação representativa da atuação do PID é em forma de função de transferência como apresentada na Equação (3.11).

$$G(s) = K(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d) \quad (3.11)$$

3.3.1. Sintonia de Controladores PID

As representações de PID apresentadas anteriormente são suficientes para que se possa modelar um sistema com uma realimentação negativa e acoplada a um controlador no modelo PID. Após essa modelagem deve-se definir qual estratégia de desempenho e sintonia serão utilizados para ajustar este controlador de maneira que apresente o desempenho necessário.

Existem diferentes maneiras de realizar a sintonia de um sistema controlado por PID, este trabalho utiliza os métodos clássicos de sintonia apresentados por Ziegler e Nichols, que a partir de inúmeras simulações e avaliação de diferentes cenários apresentou uma tabela que representa a relação de sintonia proposta. Ziegler e Nichols propuseram dois diferentes tipos de metodologia para

obtenção deste parâmetro: Método de resposta ao degrau e Método de resposta em frequência. Este projeto foca na última abordagem, por se mostrar mais pertinente aos modelos cujo controle será necessário realizar.

Método de Resposta em Frequência

Esta metodologia de sintonia se baseia no fato de que muitos sistemas podem ser levados para fora de sua zona de instabilidade através do aumento progressivo do ganho proporcional do controlador. Dessa forma, o primeiro passo para a aplicação deste método é encontrar o valor do ganho proporcional máximo ao qual o sistema ainda é considerado estável, neste caso, um ponto de oscilação. Nesta situação proposta este ponto é conhecido como ganho crítico.

Ao se realizar uma simulação utilizando o ganho crítico do sistema (K_u), encontra-se uma oscilação sustentada e a partir desta pode-se obter o período crítico do sistema (T_u). Em posse de ambos os parâmetros utiliza-se uma tabela proposta por Ziegler-Nichols para obtenção da sintonia de acordo com esta metodologia.

Tabela 3.1 Parâmetros dos Controladores - Método de resposta em frequência de Ziegler-Nichols.

Controlador	K	T_i	T_d
P	$K_u/2$	-	-
PI	$K_u/2,2$	$T_u/1,2$	-
PID	$K_u/1,7$	$T_u/2$	$T_u/8$

Assim basta escolher a abordagem de controle desejada, P, PI ou PID, de acordo com as necessidades de controle do sistema. O controlador P não é utilizado com muita frequência, pois possui como principal desvantagem o fato de não apresentar resultados aceitáveis com o acréscimo de distúrbios ao sistema, o que na prática é comum.

Dessa maneira, a indústria utiliza em sua maioria o controlador do tipo PI nos casos onde a dinâmica do sistema é considerada fortemente de primeira ordem ou quando as exigências de controle não são muito rígidas. Para situações onde é necessário um controle mais rápido e mais preciso utiliza-se o termo derivativo.

3.3.1. MatLab - Aplicações

Como o objetivo deste trabalho é realizar a simulação do comportamento de uma *personnel basket* em determinadas situações e realizar uma comparação do comportamento do modelo adaptado proposto, se faz necessário a modelagem das equações de movimento dos mecanismos mencionados acima e o futuro cálculo do comportamento através de uma programação e processamento de dados,

usa-se o MatLab como ferramenta para a resolução das equações diferenciais de movimento neste projeto.

4. Sistemas de Amortecimentos Propostos

Este projeto tem como objetivo analisar o comportamento dinâmico do sistema mecânico que representa uma cesta de transferência de pessoal tradicional e a partir desta análise propor mecanismos alternativos que apresentam como principal objetivo o aumento da segurança destas operações. A Figura 4.1 representa o modelo mais utilizado para estes tipos de operações.



Figura 4.1: Representação de uma cesta de transferência de pessoal.

Estas transferências de pessoas através destes equipamentos é frequente em plataformas de petróleo tanto para o tradicional embarque e desembarque assim como para operações cotidianas e de manutenção. No entanto em diversas situações é necessário a interrupção das operações por medidas de segurança, estes casos envolvem principalmente condições climáticas, de vento, chuva e/ou visibilidade.

O maior problema relacionado a segurança dos envolvidos na operação é a questão de oscilações e balanços do equipamento causados pela inabilidade do operador do guindaste e também pela ação de distúrbios, como a força do vento sobre o mecanismo. Dessa forma, este projeto tem como objetivo apresentar um incremento na segurança destas operações com a introdução de um mecanismo de amortecimento capaz de reduzir as oscilações causadas pelo operador de guindaste e ajudar na compensação do arraste do vento.

Este sistema apresenta um baixo grau de complexidade nos seus movimentos por se tratar de um mecanismo similar a um pêndulo simples. Assim, realizaremos a modelagem deste sistema para que tenhamos um fator de comparação entre os sistemas de amortecimento posteriormente apresentados.

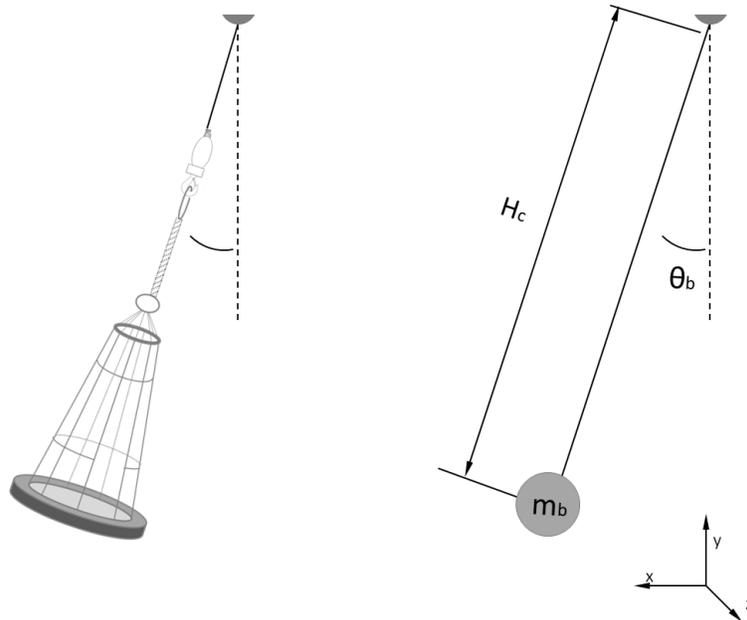


Figura 4.2: Diagrama simplificado da PB original

θ_b : Ângulo da personnel basket (PB) em relação ao eixo perpendicular ao solo/oceano .

H_c : Comprimento do cabo de apoio a personnel basket.

m_b : Massa da personnel basket (PB) somada ao peso das pessoas sobre a mesma.

A Figura 4.2 representa o diagrama simplificado da cesta de transferência de pessoas, como mencionado anteriormente, este modelo representa um pêndulo simples. Os seus principais parâmetros de importância na modelagem do sistema são o peso total de cesta e o comprimento do cabo que o conecta ao guindaste.

4.1.1. Modelagem

O sistema de pêndulo simples é um sistema trivial e usado em diversos artigos e referências para desenvolvimento didático de metodologias de modelagem e exemplos de comportamento do sistema. Dessa forma, este trabalho realizará a modelagem do pêndulo simples pela utilização da resolução das equações de Lagrange, uma vez que os modelos com sistema de amortecimento propostos posteriormente no trabalho apresentam um maior grau de complexidade na modelagem.

O primeiro caso para a modelagem do sistema é a obtenção do Lagrangeano, cuja fórmula é apresentada pela Equação (4.1) .

$$L = T - U \quad (4.1)$$

Dessa forma, faz-se necessário encontrar as energias do sistema e realizar as operações descritas pela equação apresentada acima. As Equações (4.2) e (4.3) representam as fórmulas para obtenção das energia cinética e potencial do sistema.

$$T_b = \frac{1}{2} m_b H_c^2 \dot{\theta}_b^2 \quad (4.2)$$

$$U_b = - m_b g H_c \cos \theta_b \quad (4.3)$$

Assim obtemos:

$$L = \frac{1}{2} m_b H_c^2 \dot{\theta}_b^2 + m_b g H_c \cos \theta_b \quad (4.4)$$

As equações de movimento podem ser obtidas através das equações de Lagrange, representado pela equação (4.5):

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = F_{\text{não conservativas}} \quad i = (b) \quad (4.5)$$

Para θ_b :

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_b} = m_b H_c^2 \dot{\theta}_b \quad (4.6)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_b} \right) = m_b H_c^2 \ddot{\theta}_b \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_b} = -H_c g m_b \sin(\theta_b) \quad (4.8)$$

Por fim obtemos:

$$m_b H_c^2 \ddot{\theta}_b + H_c g m_b \sin(\theta_b) = 0 \quad (4.9)$$

Isolando o termo $\ddot{\theta}_b$ para obter-se a equação final que representa a dinâmica do sistema.

$$\ddot{\theta}_b = -\frac{H_c g m_b \sin(\theta_b)}{m_b H_c^2} = -\frac{H_c g \sin(\theta_b)}{H_c} \quad (4.10)$$

Em posse das equações de movimento do sistema é possível utilizar ferramentas matemáticas e softwares para realizar a simulação deste sistema. O MatLab será a ferramenta utilizada para a resolução destas equações diferenciais através da utilização do *simulink* e de programas desenvolvidos pelo código fonte para a resolução das equações, formulação de gráficos e análises diversas.

4.2. Plataforma de Simulações

Este projeto apresenta diferentes propostas de mecanismos que permitem a redução das oscilações de uma cesta de transferência de pessoas causadas tanto pela manipulação do guindaste como por ações climáticas.

Com o objetivo de iniciar a abordagem desta problemática e permitir uma simulação se desenvolveu uma interface de interação com o usuário de forma que as mudanças de parâmetros e observação de gráficos e simulações fosse realizado de maneira mais interativa e dinâmica eliminando a necessidade de alteração de códigos “.m” e digitação manual de parâmetros no *prompt* do compilador.

Além disso, esta plataforma permite que a implementação de novos modelos, com dinâmicas de controle diferentes seja realizada de forma rápida e permitindo a análise de gráficos e comportamentos.

A plataforma de teste ao ter seu arquivo “.m” compilado é aberta ao usuário como apresentado na Figura 4.3. Esta plataforma de interação com o usuário é composta basicamente pelos seguintes componentes: parâmetros, gráficos, animações e botões de interação. Toda sua estrutura foi desenvolvida pelo GUIDE, ferramenta de desenvolvimento de interface com o usuário do MatLab e assim gerado um arquivo “.fig” e outro arquivo “.m”. Este último nomeado como GUI_Animacao.m apresenta o desenvolvimento dos códigos que são responsáveis pelo funcionamento geral da plataforma, apresentado no Anexo 1.

Na região superior da janela é possível verificar diferentes campos para a atribuição de valores que serão posteriormente utilizados para a simulação. Através de arquivos “.m” é realizada a atribuição das variáveis iniciais do sistema que poderão vir a ser alteradas pelo usuário através destes campos de definição de parâmetros. Além disso, é possível alterar a extensão do tempo de simulação de acordo com o desejado.

Estes parâmetros são divididos entre os parâmetros utilizados para a simulação da *personnel basket* original e os parâmetros do sistema proposto para amortecimento, para o qual pode vir a ser necessário a atribuição de diferentes variáveis.

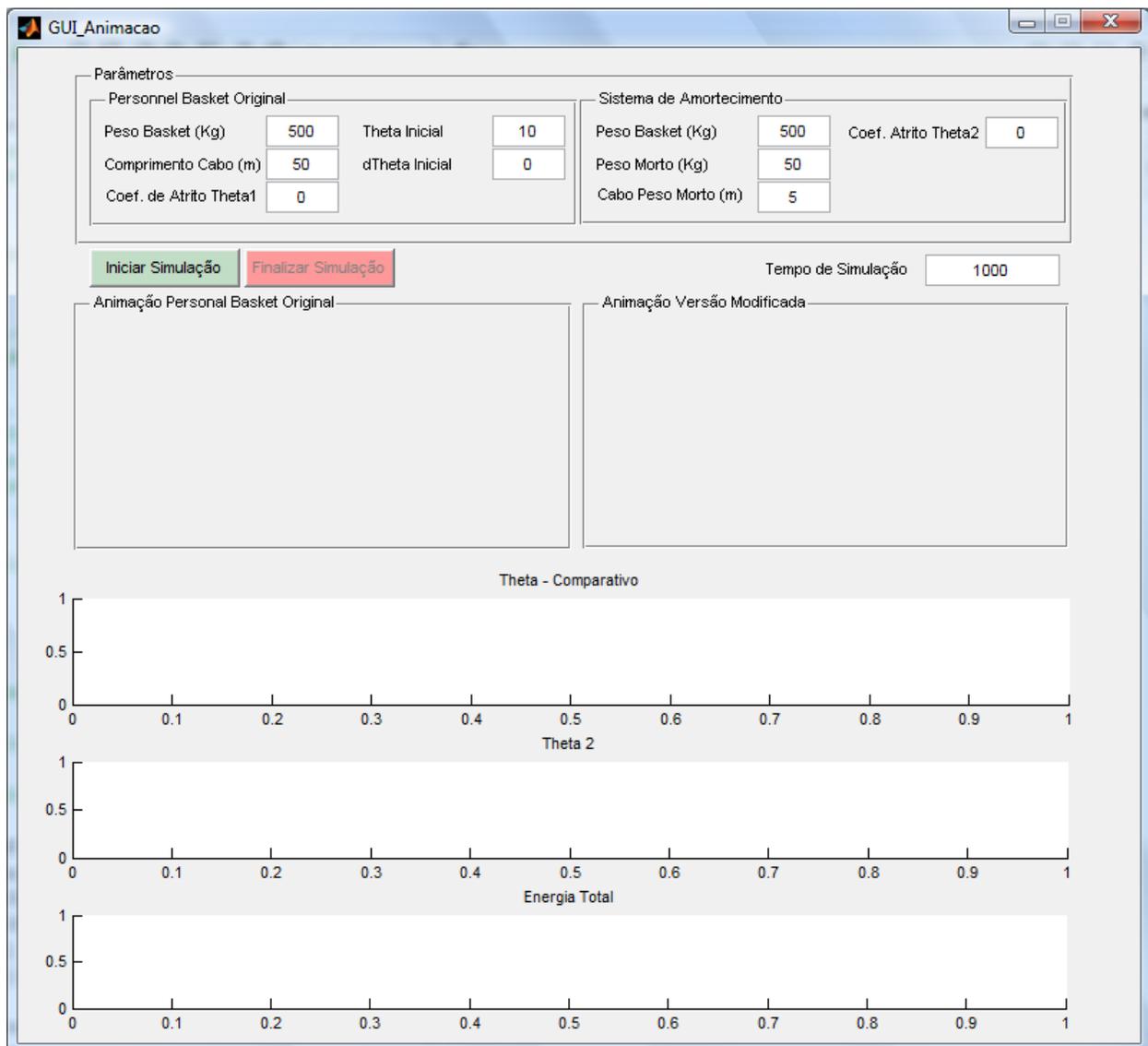


Figura 4.3 Plataforma de Simulações - Tela Inicial

Após o usuário selecionar o valor de cada um das variáveis necessárias para o sistema inicia-se a simulação através do botão “Iniciar Simulação”. Esta ação gera uma série de processamentos e cálculos no sistema que culminam no desenhar dos diferentes gráficos de análise e inicialização das animações. A Figura 4.4 apresenta uma plataforma de simulação em operação.

Nota-se a composição de três diferentes gráficos e dois diagramas em movimento que representam a animação do sistema. O diagrama no lado esquerdo representa o comportamento simulado de uma cesta de transferência pessoal tradicional nas situações de operação correspondentes aos parâmetros selecionados. Já a animação a direita apresenta o comportamento sistema de amortecimento proposto.

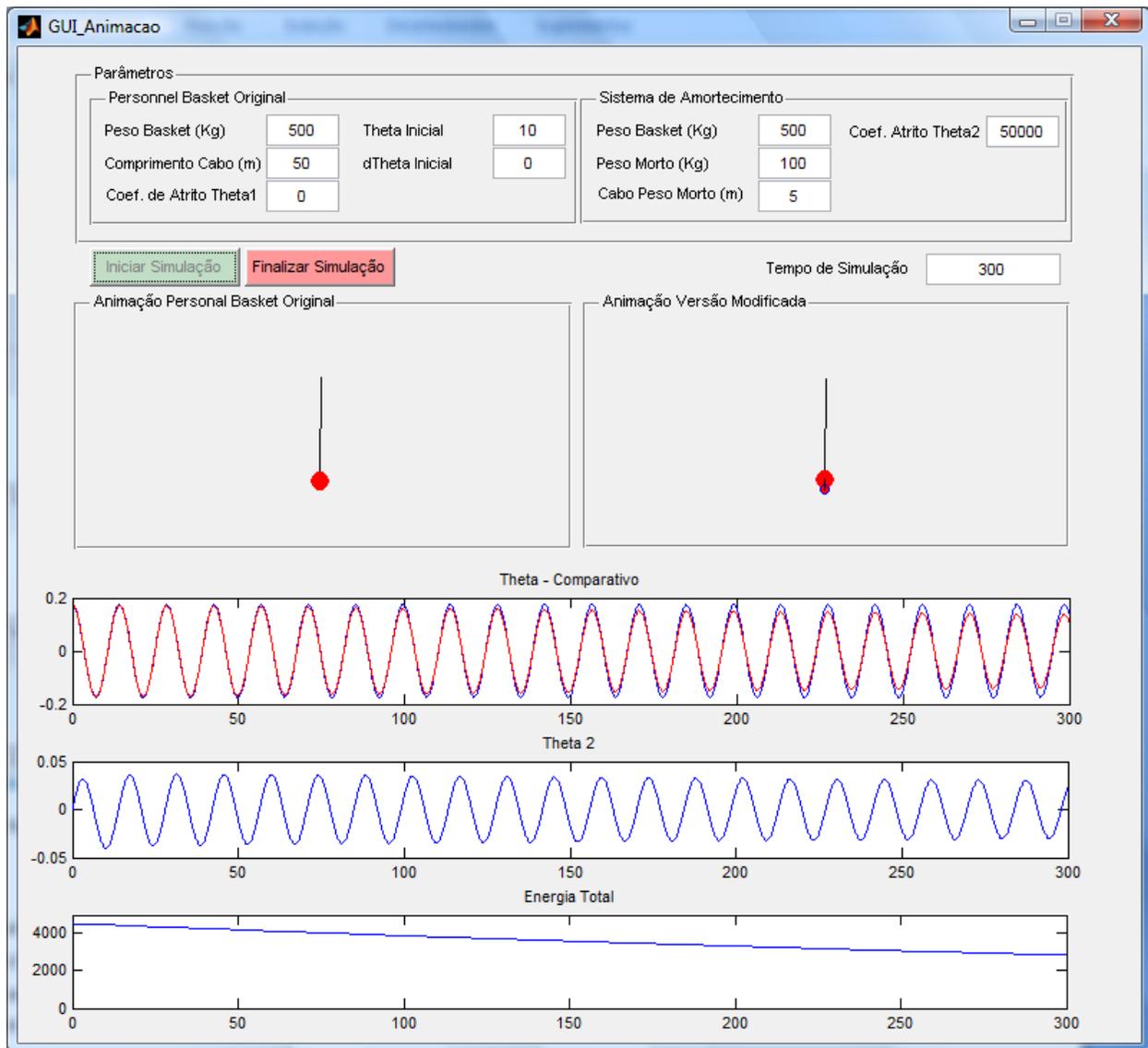


Figura 4.4 Plataforma de Simulações - Operação

Os gráficos foram designados de forma a apresentar uma análise completa sobre o mecanismo alternativo proposto. Assim o primeiro gráfico “Theta - Comparativo”, apresenta as duas variáveis de ângulo do sistema em relação a vertical, em radianos. A linha em azul representa o mecanismo original e a linha vermelha o mecanismo alternativo proposto.

O segundo gráfico é um gráfico adicional que pode ser alterado pelo usuário de maneira a apresentar uma análise de alguma variável específica do sistema de amortecimento proposto, no caso da Figura 4.4 o comportamento do ângulo do peso morto.

E finalmente o terceiro gráfico apresenta o parâmetro geral de análise e comparação de desempenho utilizado neste trabalho, a “Energia Total” do sistema sendo o referencial de energia zero a cesta em repouso na posição vertical.

Esta plataforma de interação com o usuário tem como objetivo estimular a análise de diferentes parâmetros e permitir uma imersão ao tema, estimulando assim o desenvolvimento de novos mecanismos com o objetivo de redução das oscilações deste sistema.

4.3. Modelo 1 - Peso Morto Acoplado

O primeiro modelo modificado de *personnel basket* para a obtenção dos objetivos propostos pelo projeto apresenta o acoplamento de um peso morto a base da cesta de transferência, como alternativa para a redução das oscilações causadas tanto pela movimentação translacional da cesta assim como por eventuais perturbações climáticas.

Este mecanismo de peso morto acoplado será um sistema passivo que terá como objetivo auxiliar na dissipação de energia de todo o mecanismo através de um atrito proporcional a θ_{sa} imposto em sua junta. A Figura 4.5 representa o diagrama do modelo de amortecimento proposto.

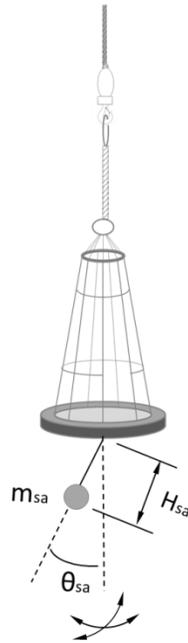


Figura 4.5 - Personnel Basket Modificada - Peso morto acoplado

θ_{sa} : Ângulo do sistema de amortecimento em relação ao eixo perpendicular ao solo/oceano.

H_{sa} : Comprimento do cabo do sistema de amortecimento da personnel basket.

m_{sa} : Massa do sistema de amortecimento acoplado a personnel basket.

A primeira iniciativa como forma de investigar o comportamento do sistema com o mecanismo de amortecimento acoplado é designar um modelo simplificado que mantenha as principais características do sistema estudado e portanto permita uma modelagem/simulação mais simplificada, mas que mantenha uma verossimilhança ao sistema e permita assim o estudo e conclusões sobre o modelo original proposto.

Considerando a *personnel basket* com o seu momento inercial igual a zero, ou seja, que toda a sua massa se encontre concentrada em um ponto único, no caso o seu centro de massa original. Desprezando o peso dos cabos de sustentação e considerando o sistema de amortecimento com um peso morto com massa concentrada. Obtém-se um modelo simplificado que é equivalente a um pêndulo duplo, representado na Figura 4.6. Pelo sistema proposto se tratar de um mecanismo de amortecimento passivo, não se faz necessário o acoplamento de um controlador ao sistema, mas o dimensionamento dos parâmetros deste mecanismo são os fatores diretamente correlacionados ao desempenho e eficiência do mesmo. Sendo assim, temos como objetivo investigar a correlação do dimensionamento dos parâmetros m_{sa} , H_{sa} e a_{sa} para a obtenção de uma configuração ótima, que

representa o dimensionamento de maior grau de amortecimento e ainda assim se encontra dentro das limitações físicas e operacionais.

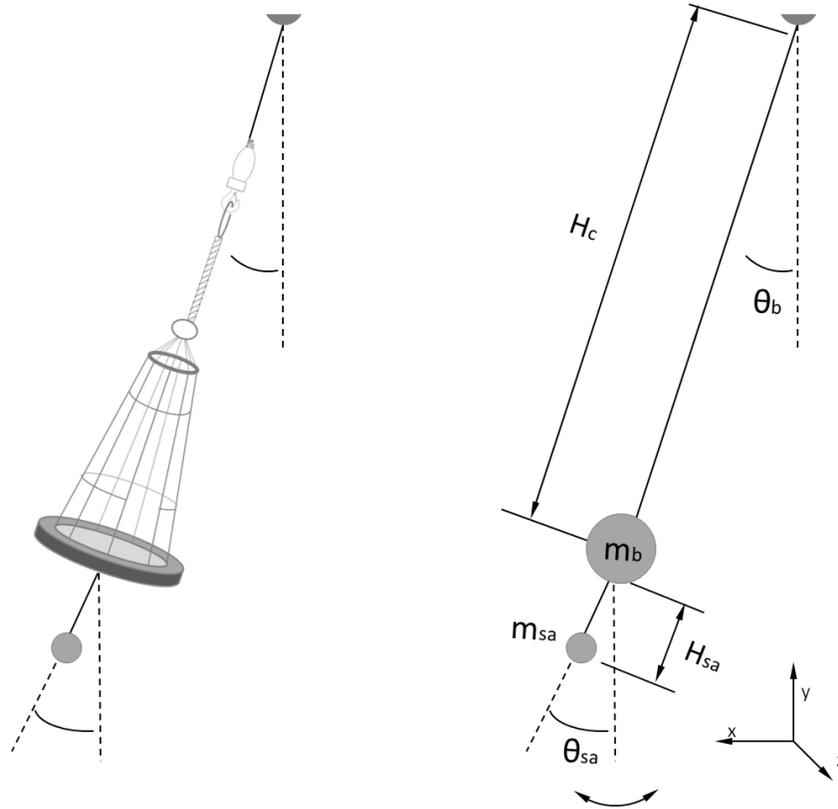


Figura 4.6: Modelo Proposto - Peso Morto Acoplado - Diagrama Simplificado.

θ_{sa} : Ângulo do sistema de amortecimento em relação ao eixo perpendicular ao solo/oceano.

θ_b : Ângulo da personnel basket em relação ao eixo perpendicular ao solo/oceano .

H_C : Comprimento do cabo de apoio a personnel basket.

H_{sa} : Comprimento do cabo do sistema de amortecimento da personnel basket.

m_b : Massa da personnel basket somada ao peso das pessoas sobre a mesma.

m_{sa} : Massa do sistema de amortecimento acoplado a personnel basket.

4.3.1. Modelagem

O sistema será modelado através das equações de Lagrange, sendo assim se faz necessário a obtenção do lagrangeano (L) e para isso o cálculo das energias do sistema. Assim como apresentado

anteriormente, a equação para obtenção do lagrangeano é dada pela subtração de toda energia cinética por toda energia potencial do sistema, apresentado novamente pela Equação (4.11) por conveniência.

$$L = T - U \quad (4.11)$$

Energia do Sistema:

O sistema consiste em duas massas penduradas uma pela outra, compondo basicamente um pêndulo duplo. Sendo assim a energia do sistema será calculada separadamente para cada uma das massas. Portanto temos o lagrangeano mais detalhado apresentado pela equação (4.12) :

$$L = (T_b + T_{sa}) - (U_b + U_{sa}) \quad (4.12)$$

Sendo:

T_b : Energia cinética do módulo central da cesta (basket).

T_{sa} : Energia cinética sistema de amortecimento proposto (sa).

U_b : Energia potencial do módulo central da cesta (basket).

U_{sa} : Energia potencial sistema de amortecimento proposto (sa).

As equações de energia para o módulo central da cesta, representada no diagrama por m_b , é representado pelas equações abaixo:

$$T_b = \frac{1}{2} m_b H_c^2 \dot{\theta}_b^2 \quad (4.13)$$

$$U_b = - m_b g H_c \cos \theta_b \quad (4.14)$$

O cálculo das energias do sistema de amortecimento são mais complexas do que a anterior, mas podem ser representados através das coordenadas cartesianas de m_{sa} , dessa maneira o cálculo das energias é simples e concreto.

$$x_{sa} = H_c \sin \theta_b + H_{sa} \sin \theta_{sa} \quad (4.15)$$

$$y_{sa} = H_c(1 - \cos \theta_b) + H_{sa}(1 - \cos \theta_{sa}) \quad (4.16)$$

A coordenada y_{sa} pode ser representada de diversas maneiras dependendo do referencial zero de energia adotado. No caso do projeto proposto a ideia é que quando a cesta se encontra em repouso e sem angulação ela seja considerada em $y_{sa} = 0$, devido a esse fator se usa o termo $(1 - \cos \theta_{sa})$ e $(1 - \cos \theta_b)$ e não somente $\cos \theta_b$ e $\cos \theta_{sa}$, como apresentado em algumas referências.

Obtemos assim:

$$T_{sa} = \frac{m_{sa}}{2} (\dot{x}_{sa}^2 + \dot{y}_{sa}^2) \quad (4.17)$$

$$T_{sa} = \frac{m_{sa}}{2} [H_c^2 \dot{\theta}_b^2 + H_{sa}^2 \dot{\theta}_{sa}^2 + 2H_c H_{sa} \cos(\theta_b - \theta_{sa}) \dot{\theta}_b \dot{\theta}_{sa}]$$

$$U_{sa} = m_{sa} g y_{sa} \quad (4.18)$$

$$U_{sa} = m_{sa} g [H_c(1 - \cos \theta_b) + H_{sa}(1 - \cos \theta_{sa})]$$

Em posse das energias do sistema obtemos o lagrangeano (L):

$$\begin{aligned} L = T - U = & \frac{m_b + m_{sa}}{2} H_c^2 \dot{\theta}_b^2 + \frac{m_{sa}}{2} H_{sa}^2 \dot{\theta}_{sa}^2 \\ & + m_{sa} H_c H_{sa} \dot{\theta}_b \dot{\theta}_{sa} \cos(\theta_b - \theta_{sa}) + (m_b \\ & + m_{sa}) g H_c \cos(\theta_b) + m_{sa} g H_{sa} \cos \theta_{sa} \end{aligned} \quad (4.19)$$

As equações de movimento podem ser obtidas através das equações de Lagrange, representado pela equação (4.20):

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = F_{\text{n\~{a}o conservativas}} \quad \mathbf{i} = (\mathbf{b}, \mathbf{sa}) \quad (4.20)$$

Para θ_b obtemos:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_b} = (m_b + m_{sa})H_c^2 \dot{\theta}_b + m_{sa}H_c H_{sa} \dot{\theta}_{sa} \cos(\theta_b - \theta_{sa}) \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_b}\right)}{dt} &= (m_b + m_{sa})H_c^2 \ddot{\theta}_b \\ &+ m_{sa}H_c H_{sa} \ddot{\theta}_{sa} \cos(\theta_b - \theta_{sa}) \\ &- m_{sa}l_b l_{sa} \dot{\theta}_{sa} \sin(\theta_b - \theta_{sa})(\dot{\theta}_b - \dot{\theta}_{sa}) \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_b} = -H_c g(m_b + m_{sa}) \sin(\theta_b) - m_{sa}H_c H_{sa} \dot{\theta}_b \dot{\theta}_{sa} \sin(\theta_b - \theta_{sa}) \quad (4.23)$$

Por fim obtemos:

$$\begin{aligned} (m_b + m_{sa})H_c^2 \ddot{\theta}_b \\ + m_{sa}H_c H_{sa} \ddot{\theta}_{sa} \cos(\theta_b - \theta_{sa}) \\ + m_{sa}H_c H_{sa} \dot{\theta}_{sa}^2 \sin(\theta_b - \theta_{sa}) + H_c g(m_b + m_{sa}) \sin(\theta_b) = -a_b \dot{\theta}_b \end{aligned} \quad (4.24)$$

O atrito em θ_b é representado pelo termo a_b e representa uma força não conservativa proporcional a $\dot{\theta}_b$. O termo a_b pode ser dimensionado como uma constante representando o atrito com o ar causado pela movimentação da personnel basket, assim como um termo dependente de uma variável proporcional a v , caso tenha-se o objetivo de se considerar a influência do vento e outras perturbações climáticas a modelagem.

Para θ_{sa} obtemos:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{sa}} = m_{sa}H_c^2 \dot{\theta}_{sa} + m_{sa}H_c H_{sa} \dot{\theta}_b \cos(\theta_b - \theta_{sa}) \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{sa}}\right)}{dt} &= m_{sa}H_c^2 \ddot{\theta}_{sa} \\ &+ m_{sa}H_c H_{sa} \ddot{\theta}_b \cos(\theta_b - \theta_{sa}) \\ &- m_{sa}H_c H_{sa} \dot{\theta}_b \sin(\theta_b - \theta_{sa})(\dot{\theta}_b - \dot{\theta}_{sa}) \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_{sa}} = m_{sa} H_c H_{sa} \dot{\theta}_b \dot{\theta}_{sa} \sin(\theta_b - \theta_{sa}) - H_{sa} m_{sa} g \sin \theta_{sa} \quad (4.27)$$

Por fim obtém-se:

$$m_{sa} H_{sa}^2 \ddot{\theta}_{sa} + m_{sa} H_c H_{sa} \ddot{\theta}_b \cos(\theta_b - \theta_{sa}) - m_{sa} H_c H_{sa} \dot{\theta}_b^2 \sin(\theta_b - \theta_{sa}) + m_{sa} H_{sa} g \sin \theta_{sa} = -a_{sa} \dot{\theta}_{sa} \quad (4.28)$$

O atrito em θ_b é representado pelo termo a_{sa} e representa as forças não conservativas deste grau de liberdade do sistema e consiste no nosso principal termo de amortecimento do sistema.

A obtenção das equações explícitas de $\ddot{\theta}_b$ e $\ddot{\theta}_{sa}$ pode ser realizada através de conceitos básicos de álgebra linear como apresentado nas Equações (4.29), (4.30), (4.31), (4.32) e (4.33).

$$A \cdot \mathbf{b} = \mathbf{C} \quad (4.29)$$

$$A = \begin{bmatrix} (m_b + m_{sa}) H_c^2 & m_b H_c H_{sa} \cos(\theta_b - \theta_{sa}) \\ m_{sa} H_c H_{sa} \cos(\theta_b - \theta_{sa}) & m_{sa} H_{sa}^2 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_b \\ \ddot{\theta}_{sa} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -a_b \dot{\theta}_b - m_b H_c H_{sa} \dot{\theta}_{sa}^2 \sin(\theta_b - \theta_{sa}) - H_c g (m_b + m_{sa}) \sin(\theta_b) \\ -a_{sa} \dot{\theta}_{sa} + m_{sa} H_c H_{sa} \dot{\theta}_b^2 \sin(\theta_b - \theta_{sa}) - m_{sa} H_{sa} g \sin \theta_{sa} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Por fim obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_b \\ \ddot{\theta}_{sa} \end{bmatrix} = A^{-1} \mathbf{C} \quad (4.33)$$

A resolução desta equação matricial nos permite a obtenção de $\ddot{\theta}_b$ e $\ddot{\theta}_{sa}$ isoladamente e assim a simulação do sistema no Matlab através do módulo de resolução de equações diferenciais ode45. O código de MatLab para a resolução desta equação e consequente simulação é apresentado no Anexo 7.1

Premissas e parâmetros para simulação:

A Billy Pugh Co. é uma empresa que produz e comercializa equipamentos no nicho de ambientes offshore. O modelo X-870 e X871-10, são modelos de “Offshore Personnel Transfer Net” e suas especificações técnicas são apresentadas a seguir:

- X-870:
 - a. Capacidade: 4 pessoas
 - b. Peso Líquido: 256 lbs (115 N)
 - c. Dimensões: 72'' x 72'' x 16'' (183 cm x 183 cm x 41 cm)

- X-871 -10 :
 - a. Capacidade: 10 pessoas
 - b. Peso Líquido: 500 lbs (225 N)
 - c. Dimensões: 94'' x 94'' x 22'' (239 cm x 239 cm x 56 cm)

Os testes iniciais de comprovação de eficácia do modelo de amortecimento proposto utilizam como referência o equipamento X-870 e após se encontrar o melhor sistema de amortecimento e suas configurações de controle o equipamento de maior capacidade X-871 será simulado para verificar os resultados.

Os parâmetros utilizados para o teste de Modelo 1 – Peso Morto Acoplado são os apresentados a seguir:

- $g : 9,80665 \text{ m/s}^2$;
- $H_C : 50 \text{ m}$;
- $m_b : 500 \text{ Kg}$;
- $\theta_{b-inicial} : 10^\circ$;
- $a_b : 0 \text{ s}^{-1}$;
- a_{sa} : Variável de amortecimento para encontrar melhor desempenho;
- H_{sa} : Variável de comprimento do cabo para encontrar melhor desempenho;
- m_{sa} : Variável de peso para encontrar melhor desempenho.

Em posse dos parâmetros da personnel basket condizentes com as especificações pode-se iniciar estudos e simulações qualitativas que nos permitem afirmar se a estrutura do mecanismo proposto realmente pode absorver das oscilações do sistema e atender com o objetivo desejado. Assim

utiliza-se a “Plataforma GUI de Simulações” desenvolvida neste trabalho como maneira de agilizar a troca de parâmetros e permitindo assim, a visualização da movimentação do sistema.

O objetivo do mecanismo, como mencionado anteriormente, é dissipar a energia do sistema de modo que as oscilações se reduzam para diminuir os riscos de acidente destes tipos de operações. Sendo assim os critérios de análise serão a evolução da amplitude de movimento de θ_b e o percentual de energia restante do sistema em relação a inicial. O primeiro critério de análise será usado de maneira mais qualitativa, uma vez que a abordagem por meio da energia resume o principal ponto a ser analisado.

O Modelo 1 – Peso Morto Acoplado insere um mecanismo passivo no sistema com o objetivo de dissipar energia através do atrito em θ_{sa} . Apesar do sistema real apresentar uma perda de energia devido ao atrito em θ_b , que é a representação do atrito com o ar proporcional a velocidade da cesta, esta variável, a_b , será configurada como nula nas próximas simulação uma vez que o objetivo é medir a diferença de potencial de amortecimento que o novo modelo pode fornecer ao sistema.

A metodologia de análise da eficácia do sistema será através da análise da dissipação da energia total do sistema, tendo como objetivo ótimo a energia nula do sistema. Considera-se o referencial de energia nula no sistema como sendo a *personnel basket* sem movimentos de oscilação e os ângulos θ_{sa} e θ_b em zero. A Figura 4.7 representa a posição para a qual a energia total do sistema é considerada zerada.



Figura 4.7: Representação de posição de energia do sistema nula.

Levando-se, em consideração as premissas esclarecidas anteriormente, podemos definir a equação que representa o índice de energia que servirá de referencia para as análises de desempenho do modelo estudado. A obtenção deste índice pode ser realizada de maneira segmentada, encontrando-

se os valores de energia do sistema da basket e, separadamente, a do peso morto como indicado na Equação (4.34).

$$E_{total} = E_b + E_{sa}$$

$$E_{total} = (U_b + T_b) + (U_{sa} + T_{sa}) \quad (4.34)$$

Estas energias foram calculadas anteriormente para a obtenção do Lagrangeano e conseqüentemente para o modelo do sistema. Dessa forma encontramos a Equação (4.35) que representa a energia total do sistema de acordo com as referencias e premissas apresentadas anteriormente.

$$E_{total} = \left[(m_b \cdot g \cdot H_c \cdot (1 - \cos \theta_b)) + \left(\frac{1}{2} m_b H_c^2 \dot{\theta}_b^2 \right) \right]$$

$$+ \left[\left(\frac{m_{sa}}{2} [H_c^2 \dot{\theta}_b^2 + H_{sa}^2 \dot{\theta}_{sa}^2 + 2H_c H_{sa} \cos(\theta_b - \theta_{sa}) \dot{\theta}_b \dot{\theta}_{sa}] \right) \right] \quad (4.35)$$

$$+ (m_{sa} g [H_c (1 - \cos \theta_b) + H_{sa} (1 - \cos \theta_{sa})])$$

Simulação 1:

Esta primeira simulação tem como objetivo principal uma verificação do comportamento físico do sistema para que se verifique a existência de movimentos discrepantes, que podem representar possíveis erros na modelagem. Assim utiliza-se a constante responsável pela dissipação de energia, a_{sa} , em zero, para verificar se a energia do sistema permanecerá constante e também possíveis diferenças do comportamento de basket original para modificada.

Parâmetros Utilizados:

- $g : 9,80665 \text{ m/s}^2$;
- $H_C : 50 \text{ m}$;
- $m_b : 500 \text{ Kg}$;
- $\theta_{b-inicial} : 10^\circ$;
- $a_b : 0 \text{ s}^{-1}$;
- $a_{sa} : 0 \text{ s}^{-1}$;
- $H_{sa} : 5 \text{ m}$;
- $m_{sa} : 50 \text{ Kg}$;
- *Tempo de simulação: 300 s*

Os valores dos parâmetros g , H_C , m_b , $\theta_{b-inicial}$ e a_b serão os mesmos para as próximas simulações para que dessa maneira possamos investigar e comparar o comportamento na mudança dos parâmetros que teremos realmente controle numa situação real, a_{sa} , H_{sa} e m_{sa} .

Abaixo apresenta-se, na Figura 4.8, o resultado da simulação proposta. Pode-se observar que, assim como esperado, a energia do sistema permanece constante para todo o período da simulação. Outros pontos que valem ser ressaltados é o comportamento caótico do peso morto representado pelo segundo gráfico e um pequeno atraso de fase do sistema modificado em relação ao original, representado pelo primeiro gráfico.

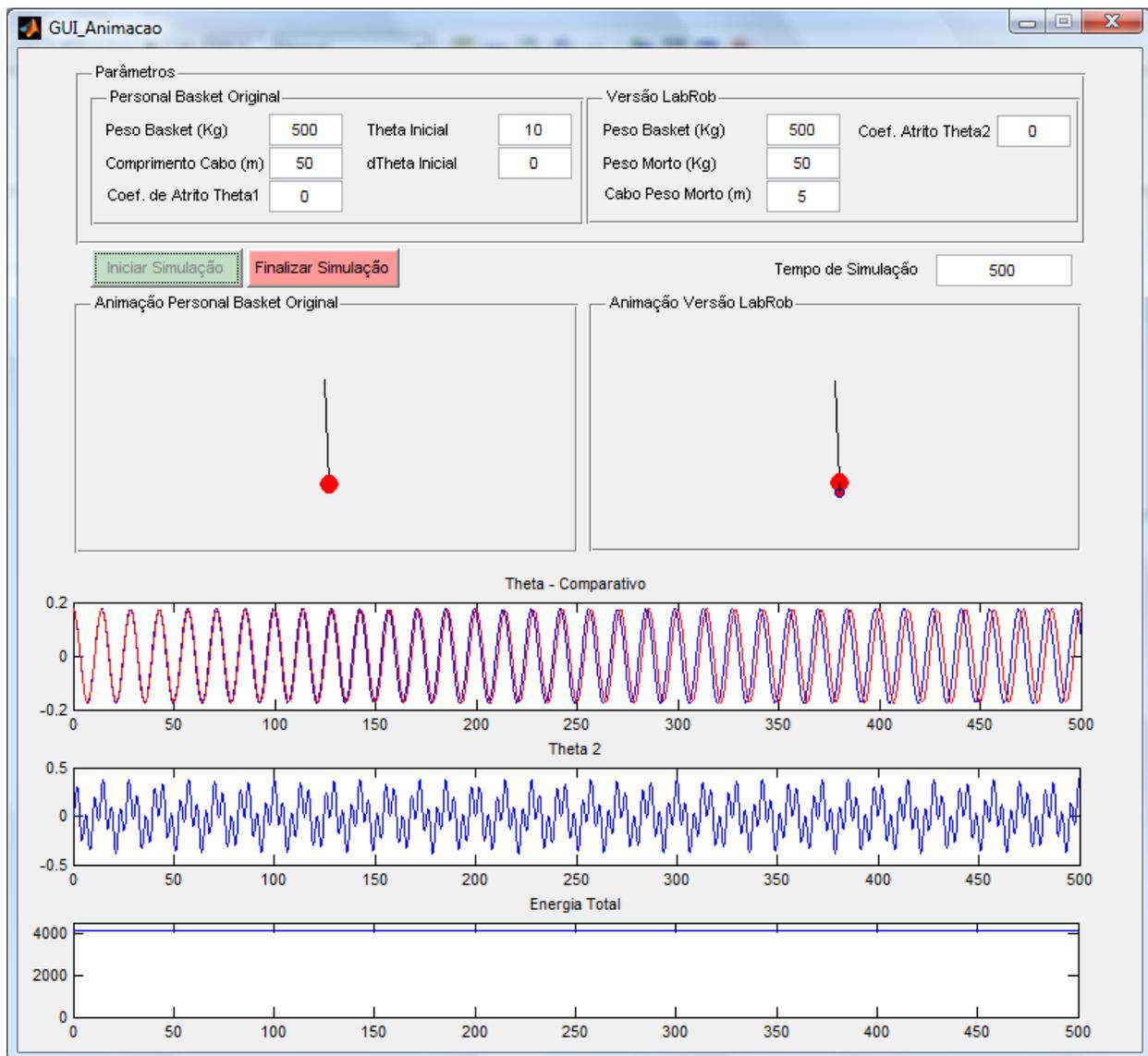


Figura 4.8: Simulação 1 - Verificação do comportamento físico do sistema.

Simulação 2:

A Simulação 2 tem como objetivo principal a verificação do comportamento físico do sistema com o parâmetro a_{sa} configurado em um valor diferente de zero. Dessa forma, pode-se verificar se a modificação proposta ao sistema realmente permite uma dissipação de energia.

Parâmetros Utilizados:

- a_{sa} : 4000 s^{-1} ;
- H_{sa} : 5 m;
- m_{sa} : 50 Kg;
- *Tempo de simulação*: 500 s

O resultado da simulação é apresentado na Figura 4.9. O fato do peso morto estar em uma junta com coeficiente de amortecimento reduziu o comportamento caótico apresentado na simulação anterior e o sistema continua por apresentar um atraso de fase em relação o sistema de pêndulo simples anterior. No entanto nestas configurações pode-se notar uma redução significativa na amplitude de θ_b o que reflete diretamente na energia do sistema. Assim percebe-se uma redução superior a 50% de sua energia inicial nos 300 segundos da simulação.

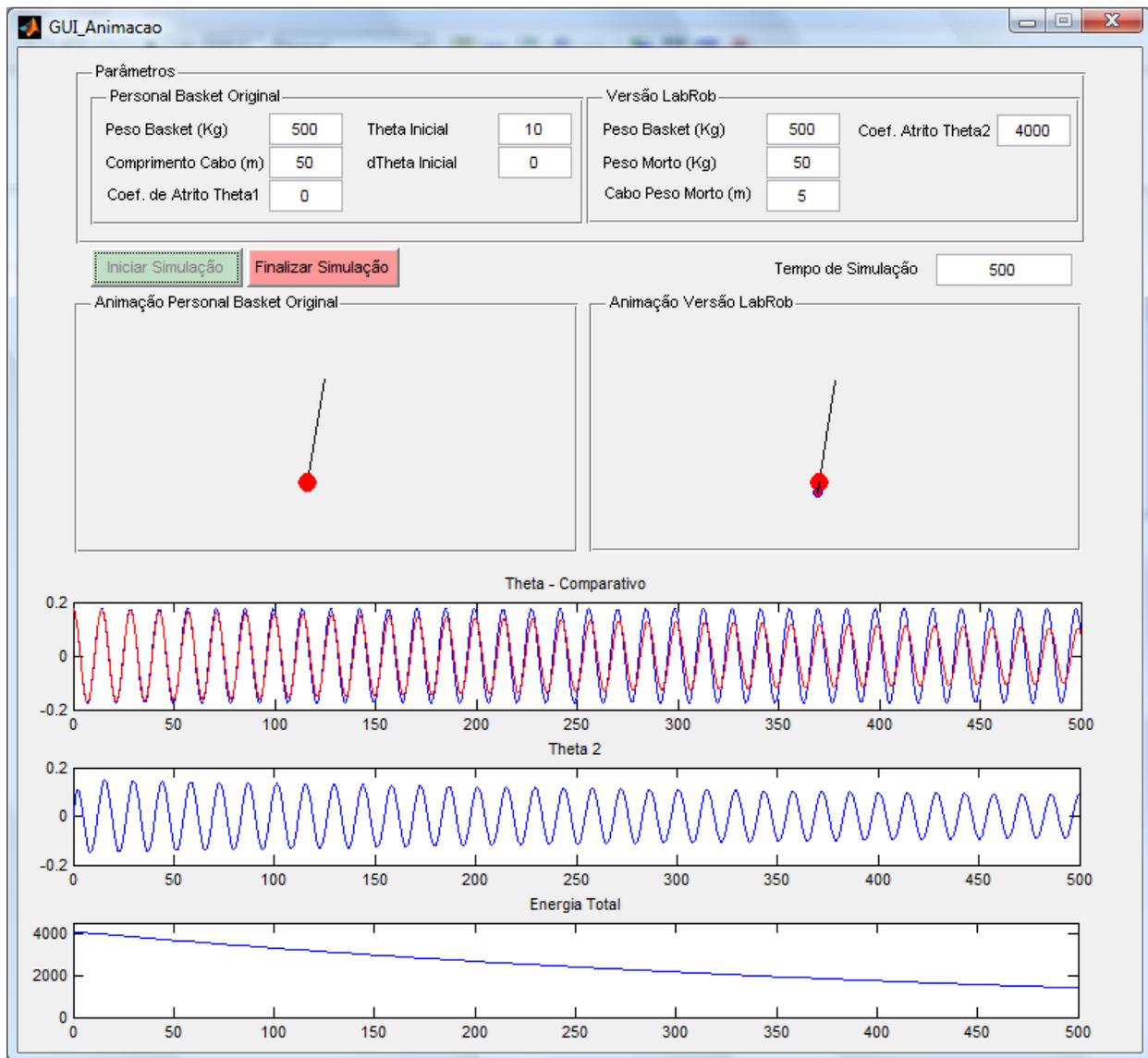


Figura 4.9: Simulação 2 - Verificação qualitativa do amortecimento ocasionado pelo modelo proposto.

As conclusões da segunda simulação indicam que o sistema proposto apresenta um grau de amortecimento como previsto e justificam uma análise mais quantitativa desta dissipação de energia para que possa se concluir se o grau de amortecimento no sistema modificado é suficiente para representar um aumento na segurança desse transporte.

Com base no apresentado acima, faz-se necessário um ciclo mais intenso de simulações com a manipulação dos parâmetros a_{sa} , H_{sa} e m_{sa} de forma que tenhamos informações mais ricas do comportamento do sistema e concluir se este modelo com o sistema de peso morto passivo gera dissipação de energia suficiente para que represente um aumento na segurança considerável, reduzindo a oscilação da cesta, para que justifique o investimento em tal equipamento.

A metodologia utilizada para as simulações será a iteração dos parâmetros manipuláveis do sistema de maneira a gerar gráficos representativos que nos permita chegar a conclusões. O tempo de simulação será fixo ($T = 300 \text{ s} - 5 \text{ min}$) e a análise da eficácia será realizada através da razão entre Energia Final do sistema e Energia Inicial, assim teremos um indicador percentual de proporção energia restante no sistema, quanto menor este indicador mais eficaz é o sistema no amortecimento e dissipação de energia.

Intervalos de Parâmetros Utilizados:

- **a_{sa}** :
 - Inicial: 0 s^{-1}
 - Final: 50000 s^{-1}
 - Intervalo : 1000 s^{-1}

- **m_{sa}** :
 - Inicial: 50 Kg
 - Final: 200 Kg
 - Intervalo : 50 Kg

- **H_{sa}** :
 - Inicial: 1 m
 - Final: 7 m
 - Intervalo : 2 m

Este ciclo de simulações geram quatro gráficos, uma para cada iteração de H_{sa} , no eixo das abscissas tem-se o parâmetro de maior iteração, a_{sa} e finalmente existem diferentes curvas para comparação das variações da m_{sa} . O eixo das ordenadas é representado pelo indicador de energia mencionado anteriormente, composto basicamente da razão entre a energia inicial e energia final do sistema.

Dessa forma podemos visualizar com mais objetividade a correlação entre as modificações dos parâmetros manipuláveis e o nosso indicador objetivo, razão de energia. Todo este procedimento de iteração, cálculo das equações de movimento e formação dos gráficos é realizado por um código desenvolvido em Matlab, apresentado no Anexo 7.5.

Ao se observar o gráfico apresentado na Figura 4.10 nota-se que existe um ponto ótimo para a variável a_{sa} , que varia de acordo com a configuração dos demais parâmetros. Este comportamento pode ser explicado pelo fato do aumento de a_{sa} causar um acoplamento do peso morto a cesta, de

forma que as variações em θ_{sa} fiquem limitadas devido ao atrito excessivo evitando assim a dissipação de energia, uma vez que este é o único termo do sistema que gera esta perda.

Além desse comportamento, pode-se observar um aumento da dissipação de energia com o incremento do parâmetro m_{sa} , uma vez que essa massa se torna mais significativa relativamente a massa de todo o sistema. Essa mesma correlação de dissipação proporcional é encontrada com o parâmetro H_{sa} .

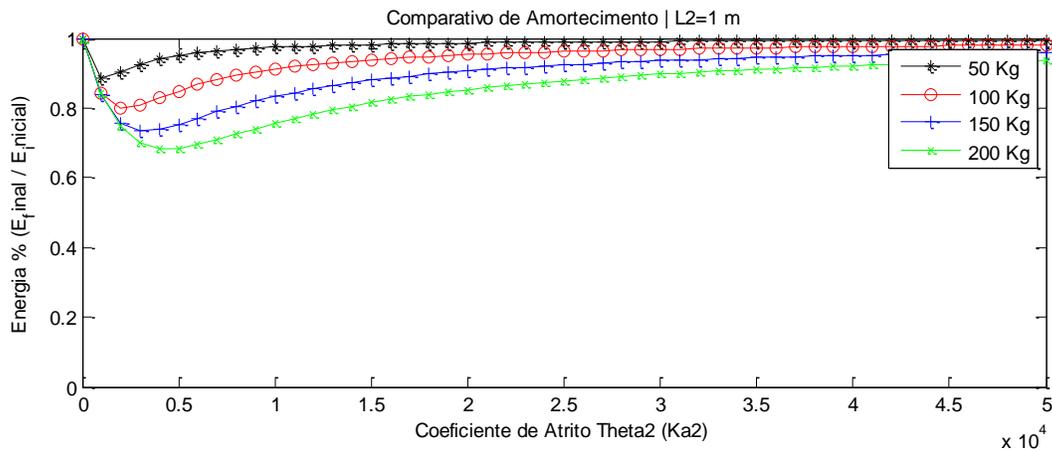


Figura 4.10: Ciclo de Simulação : Hsa = 1m

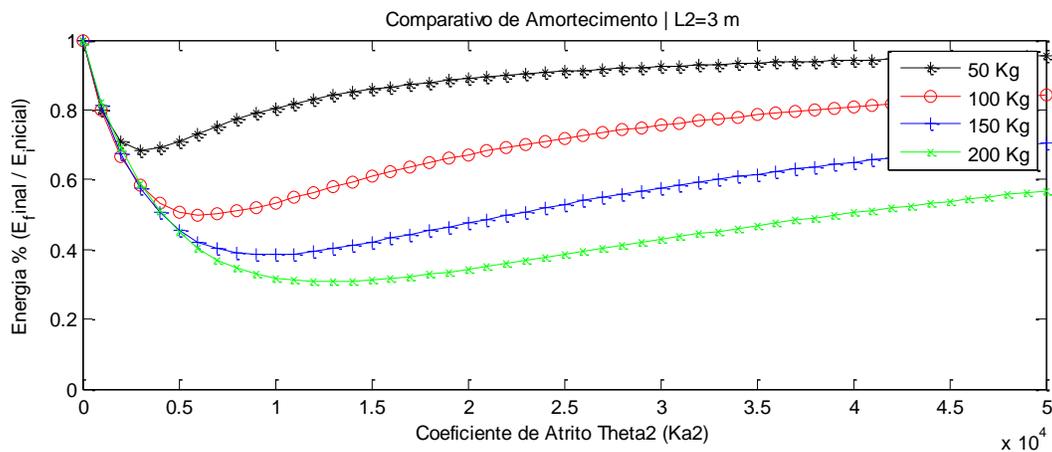


Figura 4.11: Ciclo de Simulação : Hsa = 3m

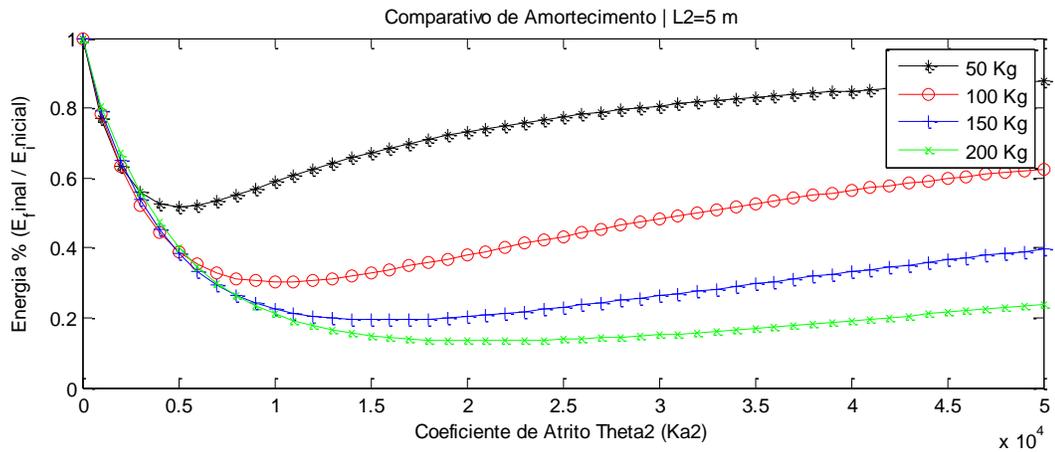


Figura 4.12: Ciclo de Simulação : H_{sa} = 5 m

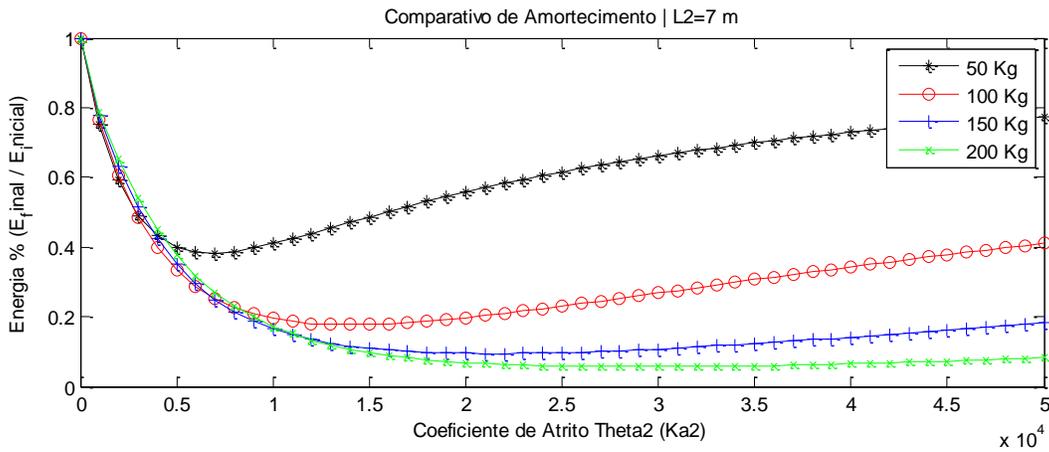


Figura 4.13: Ciclo de Simulação : H_{sa} = 7 m

Nos gráficos apresentados pelas Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13 conclui-se que a melhor configuração de parâmetros é aquela que apresenta o maior valor em m_{sa} e H_{sa} possível e para o caso encontra-se o valor de a_{sa} que maximiza a perda de energia pelo sistema. O melhor caso simulado é encontrado na Figura 4.13 com a seguinte configuração:

- $a_{sa} = 30000 \text{ s}^{-1}$
- $m_{sa} = 200 \text{ Kg}$
- $H_{sa} = 7 \text{ m}$

Esta configuração apresenta uma redução superior a 95% da energia do sistema nos 300 segundos relativo a simulação. Apesar disso, podemos concluir que simulações com parâmetros superiores de m_{sa} e H_{sa} nos trariam resultados superiores, no entanto restrições físicas e operacionais

começam a entrar em cena e portanto precisamos limitar esses parâmetros a dimensões que não inviabilizem a sua aplicabilidade.

A restrição física de m_{sa} é referente a capacidade de sustentação da cesta e influência sobre o comportamento do sistema total de forma que não cause comportamentos turbulentos que comprometam a segurança das pessoas transportadas. Sendo assim escolhe-se o valor de 150 Kg como para a dimensão de m_{sa} .

O parâmetro H_{sa} possui restrições de dimensões uma vez que um tamanho de cabo excessivo poderia causar danos aos equipamentos e embarcações, causar dificuldade de embarque a estrutura e ainda comprometer a segurança devido ao comportamento caótico do pêndulo duplo causar voltas completas e assim desestruturar o equilíbrio da basket.

Com o objetivo de minimizar as situações apresentadas anteriormente, é proposto um encapsulamento do elemento passivo inferior do sistema de modo que este não danifique estruturas e facilite no embarque para a personnel basket, diagrama representativo da Figura 4.14.



Figura 4.14: Mecanismo de encapsulamento do peso morto.

A restrição física do parâmetro H_{sa} , que leva em consideração todas as situações citadas anteriormente é a metade do diâmetro da base de cesta. No caso do modelo utilizado como base para nossas simulações, X-870, tem-se 72" de diâmetro, ou seja, 1,83 metros. Teríamos então a restrição de 90 cm para o termo H_{sa} . Com o objetivo de se encontrar o parâmetro a_{sa} para o qual se obtém a máxima dissipação de energia é gerado o gráfico no mesmo modelo dos apresentados anteriormente, mas neste caso considerando-se as restrições físicas comentadas anteriormente. O gráfico é representado na Figura 4.15.

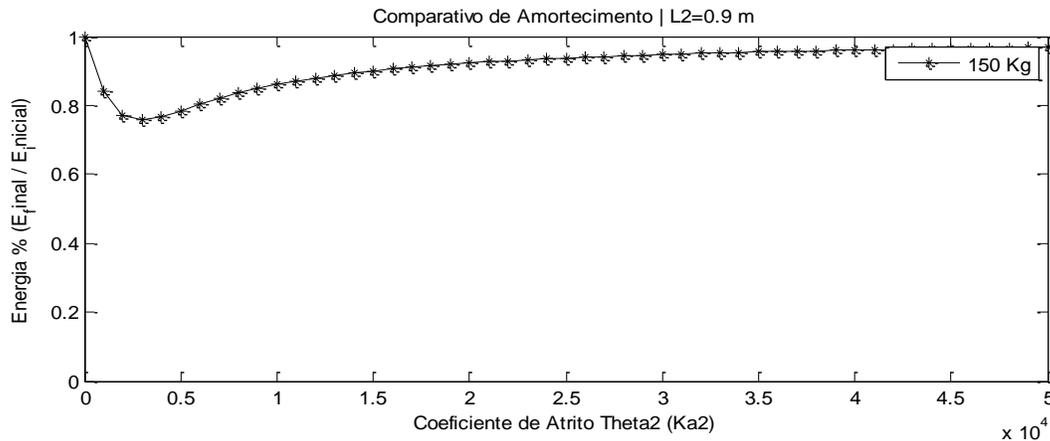


Figura 4.15: Simulação: $H_{sa} = 0,9m$ – restrições físicas.

A análise deste gráfico nos permite concluir que o melhor grau de amortecimento acontece quando a parâmetro a_{sa} representa um atrito de 4000 s^{-1} , sendo neste caso uma dissipação de 25% da energia inicial do sistema nos 300 segundos de simulação. Portanto a configuração de melhor absorção de oscilações e que se encontra dentro dos limites de operação do sistema é a apresentada abaixo:

- $a_{sa} = 4000\text{ s}^{-1}$
- $m_{sa} = 150\text{ Kg}$
- $H_{sa} = 0,90\text{ m}$

Em posse da configuração das variáveis manipuláveis do sistema, pode-se utilizar a plataforma de teste desenvolvida anteriormente neste trabalho para se analisar outros aspectos comportamentais do sistema e para um intervalo de tempo superior aos testes anteriores. A Figura 4.16 representa o resultado da simulação para a configuração final do sistema, para o tempo de 300 segundos.

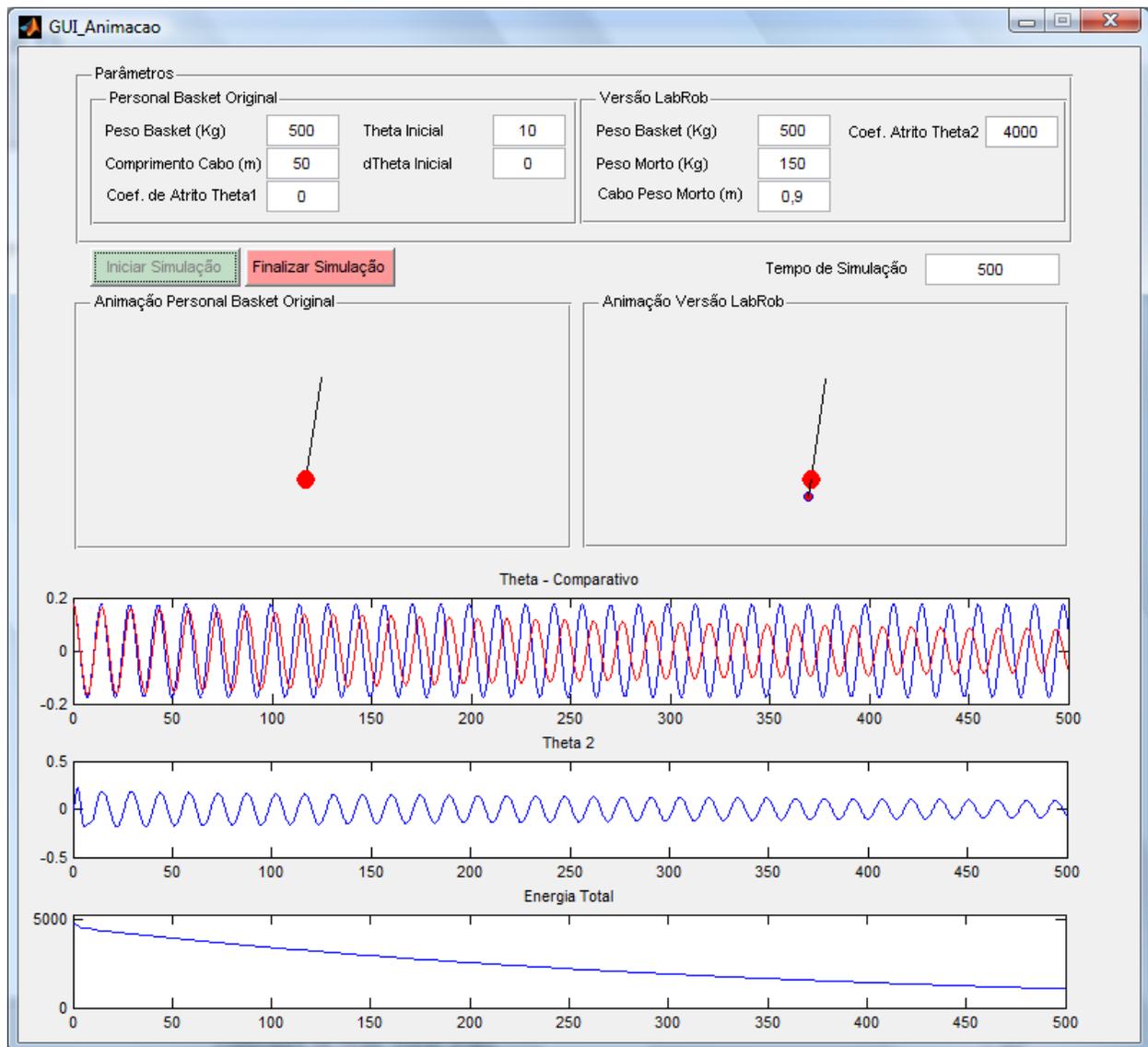


Figura 4.16: Modelo 1 - Peso Morto Acoplado - Configuração Final

Observando o resultado gerado pela configuração de dissipação ótima encontrada, pode-se notar uma real redução da amplitude de oscilação de θ_b , o que traz mais segurança as operações de transferência de pessoas entre navio e plataforma. Além disso, o possível comportamento caótico do peso morto acoplado não aparece para esta configuração do sistema, principalmente devido ao termo de atrito instalado a_{sa} .

Apesar do sistema modificado proposto cumprir o objetivo de dissipação de energia desejada as restrições físicas e operacionais comprometem a performance do sistema e limitam a uma dissipação de pouco maior de que 25% em 5 minutos de simulação. Dessa forma se faz necessário o desenvolvimento

de uma solução alternativa mais eficaz. Não é descartada a possibilidade de utilização deste mecanismo de amortecimento passivo como meio auxiliar de dissipação de energia, no entanto este não fornece todo o amortecimento de oscilações necessário.

4.4. Modelo 2 – Amortecimento Ativo – Complexo de Turbinas Acoplado a Base.

O sistema de amortecimento proposto pelo modelo 1, através do acoplamento de um mecanismo passivo, não obteve uma performance suficiente para a redução da oscilação da cesta de transferência de pessoas. Dessa forma apresenta-se uma alternativa de mecanismo de amortecimento que utiliza um mecanismo ativo na dissipação de energia do sistema e conseqüente amortecimento da *personnel basket*.

A alternativa proposta é uma *personnel basket* tradicional com um complexo de turbinas acoplado em sua base de modo que o empuxo gerado pelas mesmas propicie um torque restaurador e dissipador de energia, mais eficiente que o mecanismo de amortecimento apresentado anteriormente. O diagrama representativo do modelo 2 é apresentado na Figura 4.17.



Figura 4.17 : Modelo 2 - Sistema de turbina acoplado a base da cesta

Assim como apresentado no diagrama anterior, o modelo de amortecimento proposto é constituído de uma basket tradicional com um sistema de turbinas geradoras de empuxo em sua base. A Figura 4.18 apresenta o diagrama simplificado do modelo 2 e todos os parâmetros pertinentes a modelagem e simulação do sistema.

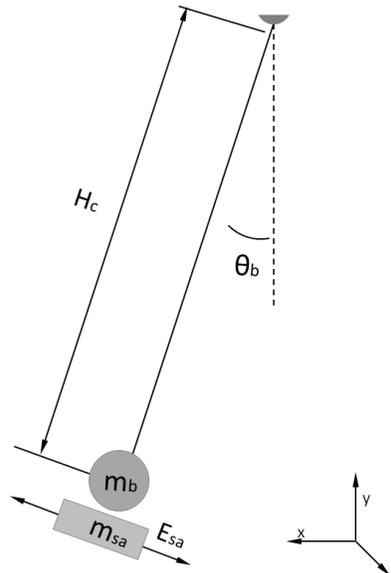


Figura 4.18: Modelo 2 - Diagrama Simplificado

θ_b : Ângulo da personnel basket em relação ao eixo perpendicular ao solo/oceano .

H_C : Comprimento do cabo de apoio a personnel basket.

m_b : Massa da personnel basket somada ao peso das pessoas sobre a mesma.

m_{sa} : Massa do sistema de amortecimento acoplado a personnel basket.

E_{sa} : Empuxo resultante da atuação das turbinas.

4.4.1. Modelagem

A obtenção das equações de movimento do mecanismo representado pela Figura 4.18 será realizado através das equações de Lagrange, assim como no modelo anterior. O passo a passo desta modelagem é apresentado abaixo para finalidades didáticas.

A formula para obtenção do lagrangeano é apresentado novamente por conveniência pela Equação (4.36).

$$L = T - U \quad (4.36)$$

As energias cinéticas e potenciais deste sistema podem ser detalhadas como sendo a soma das energias da cesta principal com as energias do sistema de amortecimento.

$$L = (T_b + T_{sa}) - (U_b + U_{sa}) \quad (4.37)$$

$$T_b = \frac{1}{2} m_b H_c^2 \dot{\theta}_b^2 \quad (4.38)$$

$$U_b = - m_b g H_c \cos \theta_b \quad (4.39)$$

A energia potencial e cinética do sistema de amortecimento é encontrada de maneira similar a da *personnel basket* uma vez que o sistema se encontra acoplado a cesta e não apresenta nenhum outro grau de liberdade como o modelo 1.

$$T_{sa} = \frac{1}{2} m_{sa} H_c^2 \dot{\theta}_b^2 \quad (4.40)$$

$$U_{sa} = - m_{sa} g H_c \cos \theta_b \quad (4.41)$$

Obtém-se assim o lagrangeano por:

$$L = T - U = \frac{1}{2} (m_b + m_{sa}) H_c^2 \dot{\theta}_b^2 + (m_b + m_{sa}) g H_c \cos \theta_b \quad (4.42)$$

Para obtenção das equações de movimento utiliza-se as equações de Lagrange, representada pela Equação (4.43). O empuxo resultante do complexo de turbinas do sistema de amortecimento é representado como uma força não conservativa.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = F_{\text{não conservativas}} \quad i = (b) \quad (4.43)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_b} = (m_b + m_{sa})H_c^2 \dot{\theta}_b \quad (4.44)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_b} \right) = (m_b + m_{sa})H_c^2 \ddot{\theta}_b \quad (4.45)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_b} = -H_c g (m_b + m_{sa}) \sin(\theta_b) \quad (4.46)$$

Após a resolução das equações diferenciais de Lagrange obtemos a fórmula que representa a dinâmica do sistema proposto.

$$(m_b + m_{sa})H_c^2 \ddot{\theta}_b + H_c g (m_b + m_{sa}) \sin(\theta_b) = -E_{sa} H_c \quad (4.47)$$

Como maneira de facilitar a visualização, isola-se a variável desejada, $\ddot{\theta}_b$, e realiza-se as simplificações e manipulações algébricas necessárias. O resultado final é apresentado pela Equação (4.48).

$$\ddot{\theta}_b = -\frac{g \sin(\theta_b)}{H_c} - \frac{1}{H_c(m_b + m_{sa})} \cdot E_{sa} \quad (4.48)$$

Em posse da equação que representa o movimento do sistema, o próximo passo é definir qual será a estratégia de controle utilizada para a geração da magnitude do empuxo, E_{sa} , gerado pelo sistema de amortecimento proposto. Opta-se para utilização de um controlador PID, pois, assim como apresentado anteriormente pela revisão teórica, permite uma sintonia simplificada e é um método de controle robusto o suficiente para lidar com as necessidades implícitas ao cenário e mecanismo apresentado.

Assim a utilização de uma grandeza integral ajuda na robustez quanto a possíveis distúrbios climáticos e o diferencial permite uma redução significativa da oscilação do sistema, aspecto primordial para uma maior segurança das pessoas e equipamentos a serem transportados. A equação representativa de um sistema PID, com os seus devidos parâmetros de sintonia é apresentado pela Equação (4.49).

$$E_{sa} = K(\theta_b + \frac{1}{T_i} \int \theta_b dt + T_d \dot{\theta}_b) \quad (4.49)$$

A partir de todas as informações apresentadas anteriormente o passo subsequente consiste na representação de sua dinâmica em uma plataforma capaz de resolver as equações de movimento do sistema e representar o seu comportamento no tempo de simulação desejado.

Assim como no modelo anterior proposto utilizaremos o Simulink para a modelagem do sistema. Essa ferramenta permite a representação das equações do sistema em diagramas de bloco de modo que evidencia a característica de um sistema com controle retroalimentado e permite a visualização e manipulação de parâmetros de maneira mais dinâmica que a codificação em arquivos “.m”.

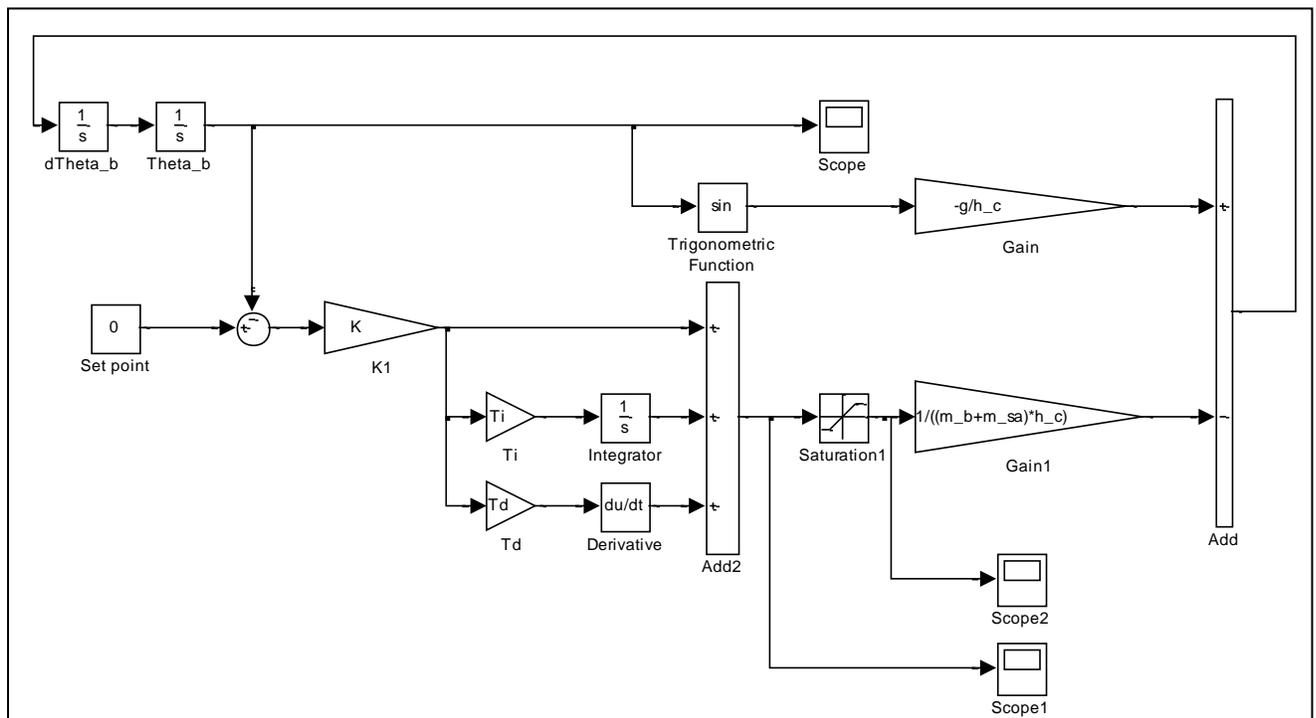


Figura 4.19: Representação do Simulink do Modelo 2

A Figura 4.19 apresenta a representação das equações do modelo 2 na ferramenta do MatLab simulink. Nota-se que existem blocos para visualização de variáveis e representações gráficas, “scope”. Além disso, utiliza-se um bloco limitador, “saturation”, este bloco representa a limitação de atuação do

mecanismo de turbina proposto para o controle do sistema. Dessa forma, obtém-se uma simulação mais real e pode-se estudar as implicações desta saturação no desempenho do sistema.

Os parâmetros estruturais encontrados nos ganhos deste diagrama de blocos, são carregados através de um arquivo “.m” e podem ser reconfigurados com facilidade. O arquivo “.m” de inicialização é apresentado no Anexo 7.2.

Existem diferentes configurações de turbinas que se encaixariam para este caso, mas algumas especificações são necessárias para que o desempenho do sistema não seja comprometido.

- O empuxo nominal da turbina deve ser suficiente para o amortecimento do sistema.
- Caso a turbina não apresente empuxo reverso, deve-se incluir uma turbina oposta a mesma.
- Faz-se necessário o acoplamento de um sistema de turbinas perpendicular ao outro para que seja possível controlar os diferentes graus de liberdade.

Algumas turbinas foram consideradas para o sistema, mas o modelo JetCat P200-SX, possui configurações compatíveis, suas especificações técnicas foram utilizadas como parâmetros para a modelagem e configurações gerais do sistema.

- Empuxo Máximo: 52 lbs (23,4 Kg)
- Peso : 5.53 lbs (2,5 Kg)
- Diâmetro: 5,07” (12,9 cm)
- Comprimento: 13,65” (34,7cm)



Figura 4.20: JetCat - P200 - SX

Dessa forma, para a simulação do modelo 2 proposto será utilizado a personnel basket Billy Pugh Co. X870, assim como no modelo proposto 1.

- X-870:

- a. Capacidade: 4 pessoas
- b. Peso Líquido: 256 lbs (115 Kg)
- c. Dimensões: 72'' x 72'' x 16'' (183 cm x 183 cm x 41 cm)

O complexo de turbinas será composto por 4 turbinas JetCat P200-SX um par configurado em perpendicular ao outro. Esta configuração permite um empuxo aproximadamente de 50 Kg para cada eixo considerado.



Figura 4.21: Representação de diagrama simplificado do complexo de turbinas.

Com estas premissas de configurações podemos apresentar quais foram os parâmetros utilizados para as simulações realizadas para este modelo. As configurações gerais de simulação do modelo 1, serão mantidas como maneira de apresentar uma comparação pertinente entre as soluções propostas.

Parâmetros Utilizados:

- $g : 9,80665 \text{ m/s}^2$;
- $H_C : 50 \text{ m}$;
- $m_b : 500 \text{ Kg}$;
- $\theta_{b\text{-inicial}} : 10^\circ$;
- $m_{sa} : 50 \text{ Kg}$;
- $E_{sa\text{máx}} : 50 \text{ Kg}$
- *Tempo de simulação: 300 s*

Para que se possa realizar uma comparação entre os dois sistemas é necessário estabelecer qual será o indicador de análise. As comparações realizadas entre as variantes do modelo 1 foram feitas através da energia total do sistema, sendo que quando o sistema se encontrava em repouso e com θ_b igual a zero esta era considerado o referencial de energia nula. Dessa forma o mesmo será realizado para este modelo de maneira que o desempenho deste diferentes sistemas seja comparável.

Levando em consideração as considerações apresentadas a Equação (4.50) representa a fórmula do indicador de energia do sistema.

$$E_{total} = [(m_b + m_{sa}) \cdot g \cdot H_c \cdot (1 - \cos \theta_b)] + \frac{1}{2} (m_b + m_{sa}) H_c^2 \dot{\theta}_b^2 \quad (4.50)$$

Em posse das equações do sistema, a estratégia de controle e indicadores de desempenho é necessário realizar a sintonia do controlador para verificar se o mesmo é capaz de amortecer o sistema aos níveis de desempenho suficientes.

4.4.2. Sintonia do Controlador PID

Para o modelo apresentado será utilizado o método por resposta em frequência que permite a obtenção dos parâmetros PID através de respostas e medidas obtidas pelo sistema a partir de simulações específicas.

O primeiro passo para a utilização do método de sintonia de PID por resposta em frequência é a obtenção de um parâmetro proporcional que causa a oscilação do sistema até o ponto crítico de instabilidade. Este valor é chamado de K_u . Para o modelo 2 estudado foi encontrado um K_u igual a 500. Após a obtenção deste valor deve-se encontrar o período crítico, representado por T_u , que é o período do sistema quando $K = K_u$. A Figura 4.22 apresenta o gráfico de θ_b em função do tempo para $K=K_u=500$, dessa forma pode-se obter T_u com a medição do período do sistema.

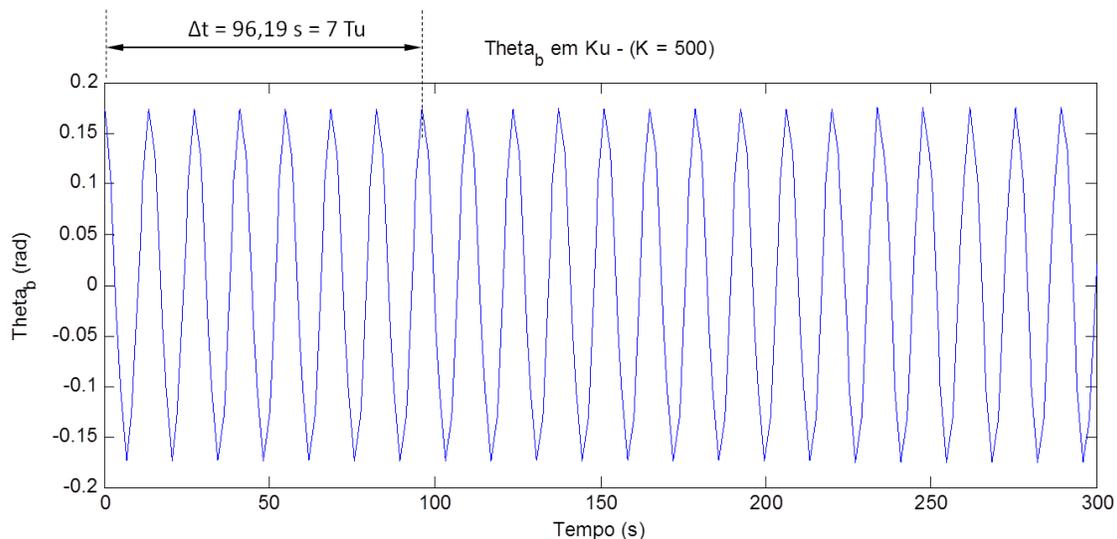


Figura 4.22: Gráfico representativo do modelo 2 quando $K=K_u=500$.

- $T_u = 96,19 / 7 = 13,74$

Com o objetivo de possuir uma maior precisão na medida do período crítico é realizada a coleta de dados nos topos das oscilações de diversos períodos. Assim como apresentado na Figura 4.22, $7 \times T_u$ é igual a 96,19 segundos, dessa forma obtemos T_u como sendo 13,74 s.

Após este procedimento utiliza-se a tabela de sintonia proposta por Ziegles e Nichols para a sintonia do sistema. A Tabela 4.1 é apresentada abaixo por conveniência.

Tabela 4.1 Parâmetros dos Controladores - Método de resposta em frequência de Ziegler-Nichols.

Controlador	K	T_i	T_d
P	$K_u/2$	-	-
PI	$K_u/2,2$	$T_u/1,2$	-
PID	$K_u/1,7$	$T_u/2$	$T_u/8$

Como apresentado anteriormente utilizaremos o controlador do tipo PID. Assim ao utilizar a tabela acima com os valores críticos obtidos pelo método de resposta em frequência obtemos a seguinte sintonia de controle.

- $K=294$
- $T_i=6,87$
- $T_d=1,72$

O próximo passo é a simulação e análise de resultados e performance do sistema proposto. A Figura 4.23 representa em azul o comportamento do sistema original sem a atuação de nenhum mecanismo de amortecimento e/ou controle a curva vermelha representa a alternativa proposta pelo modelo 2 para redução da oscilação do sistema.

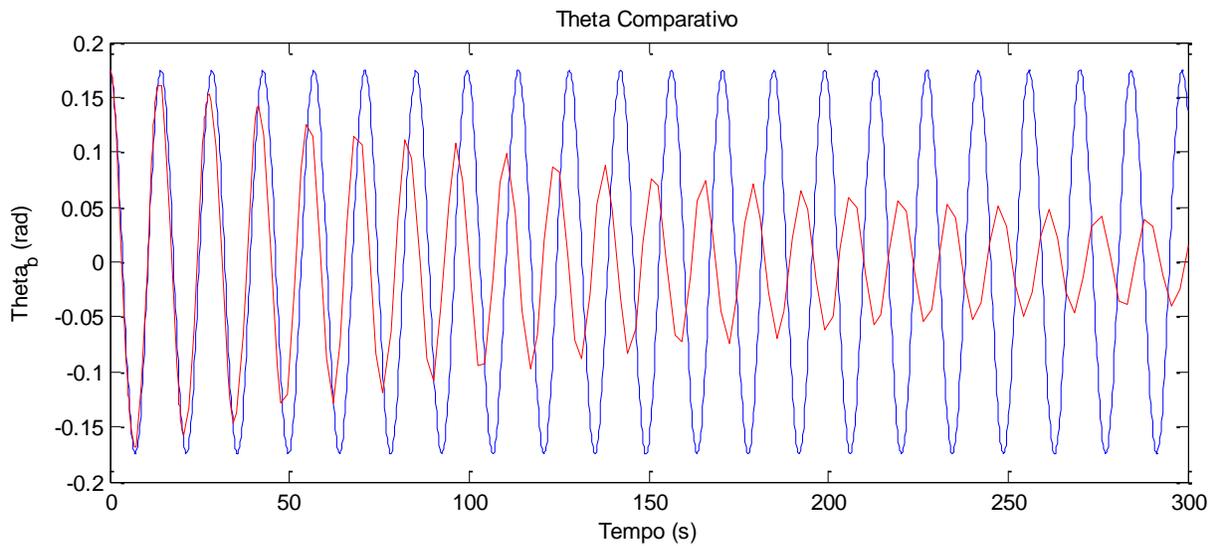


Figura 4.23: Modelo 2 - Resultado comparativo de performance PID.

Ao analisar o desempenho desta configuração proposta podemos observar que existe uma considerável redução da amplitude da oscilação do sistema e isto por sua vez demonstra a eficácia da alternativa de acoplar um sistema de turbinas como mecanismo de dissipação de energia. A Figura 4.24 representa o comportamento da energia do sistema em relação a energia inicial durante os 300 segundos de simulação. Nota-se uma rápida redução da energia do sistema chegando ao 5,54% de sua energia inicial após os 300 segundos de simulação.

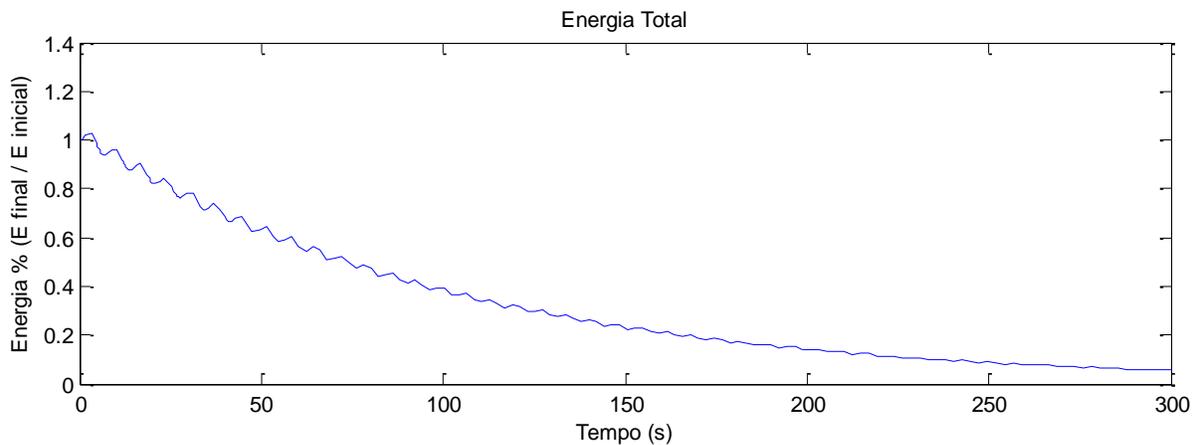


Figura 4.24: Modelo2 - Comportamento da energia.

Além das análises de energia e comportamento da angulação da personnel basket é necessário a visualização da atuação das forças resultantes do sistema de controle do sistema. A Figura 4.25

representa o empuxo gerado pelo sistema de amortecimento proposto. É possível notar a atuação da saturação, 50 Kg de empuxo, nos instantes iniciais do sistema, mas após alguns ciclos o valor gerado pelo controlado é inferior aos limites operacionais do mecanismo. Dessa forma, podemos afirmar que o dimensionamento de empuxo máximo de 50 Kg foi suficiente para atender as necessidades impostas pelo sistema.

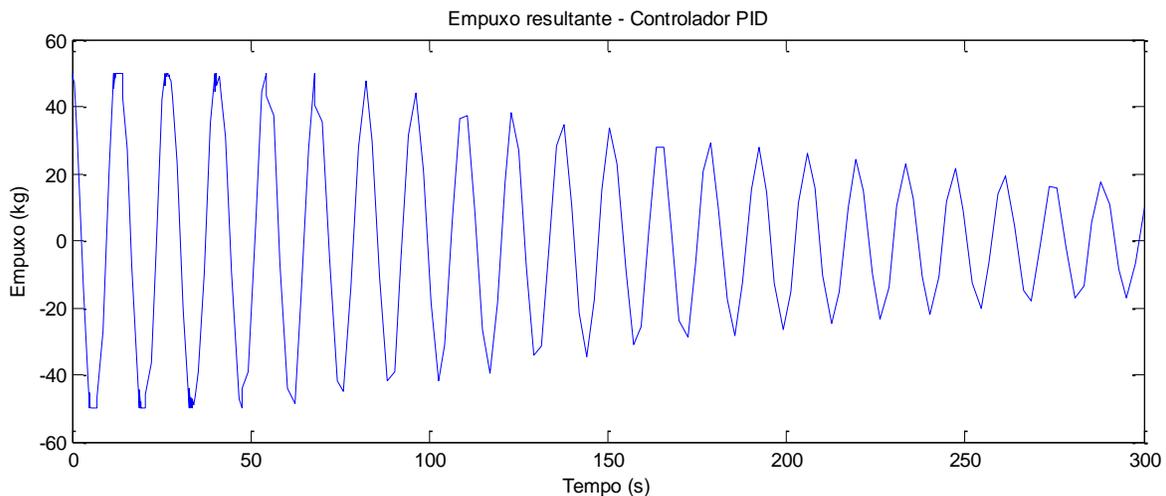


Figura 4.25: Modelo 2: Resposta do controlador PID

Esta configuração de mecanismo aliado a estratégia de controle se mostrou eficaz no atendimento dos objetivos almejados, no entanto uma análise mais profundo da Figura 4.24 demonstra que existem momentos que o controlador adiciona energia ao sistema, principalmente devido ao seu parâmetro proporcional. A configuração PID é de extrema valia, pois além de representar um sistema de controle amplamente utilizado na indústria e possuir diversos instrumentos compatíveis com sua aplicação prática, permite maior robustez nos casos de distúrbios, para uma possível situação de distúrbios climáticos.

Levando em consideração os aspectos apresentados, podemos concluir que a configuração de controle PID é adequada ao sistema proposto, no entanto acredita-se que um ajuste na sintonia PID possa torná-lo ainda mais eficaz que a sintonia de Ziegler-Nichols. Isso pode ser reforçado pela peculiaridade deste sistema, que possui como principal objetivo a segurança, representada fortemente pela redução da oscilação do sistema e como segundo plano a estabilização da cesta no ponto desejado, no caso em torno do eixo vertical.

Dessa forma é recomendado um controlador PID ajustado que possui maior relevância no parâmetro diferencial, com o objetivo de reduzir as oscilações do sistema e assim melhorar a eficácia do modelo anterior.

4.4.3. PID Ajustado

O ajuste proposto consiste na ampliação em cinco vezes da relevância do parâmetro diferencial do sistema. Temos então a nova sintonia do controlador:

- $K=294$
- $T_i=6.87$
- $T_d=1.72 \times 5 = 8,59$

Após os ajustes de parâmetros e simulações com esta nova sintonia de controle, podemos realizar uma comparação entre as demais e assim verificar se o incremento da relevância do parâmetro diferencial representou uma melhor performance do controle sobre o sistema. A Figura 4.28 representa um comparativo entre o comportamento de θ_b em ambos os controles. Como pode-se observar a nova sintonia de controle ajustada, curva vermelha, representou uma dissipação de energia mais intensa no sistema conseguindo anular as oscilação em pouco mais do que 150 segundos.

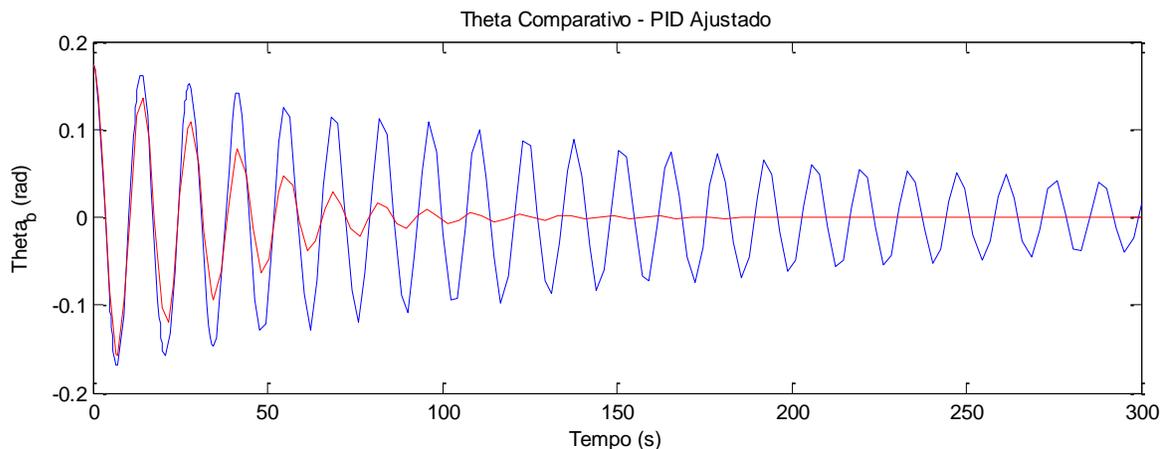


Figura 4.26: Modelo 2 - Resultado comparativo de performance PID ajustado

A Figura 4.27 representa o comportamento da energia do sistema comparativo entre as duas estratégias de sintonia de controle. Nota-se uma grande diferença na performance do sistema com essa configuração ajustada. Ao passo que a sintonia por Ziegler-Nichols apresentava 5,54% da energia inicial do sistema após 300 segundos de atuação do controle a nova sintonia ajusta anula esta energia nesse mesmo período de oscilação e em apenas 62 segundos apresenta o mesmo percentual de dissipação de energia.

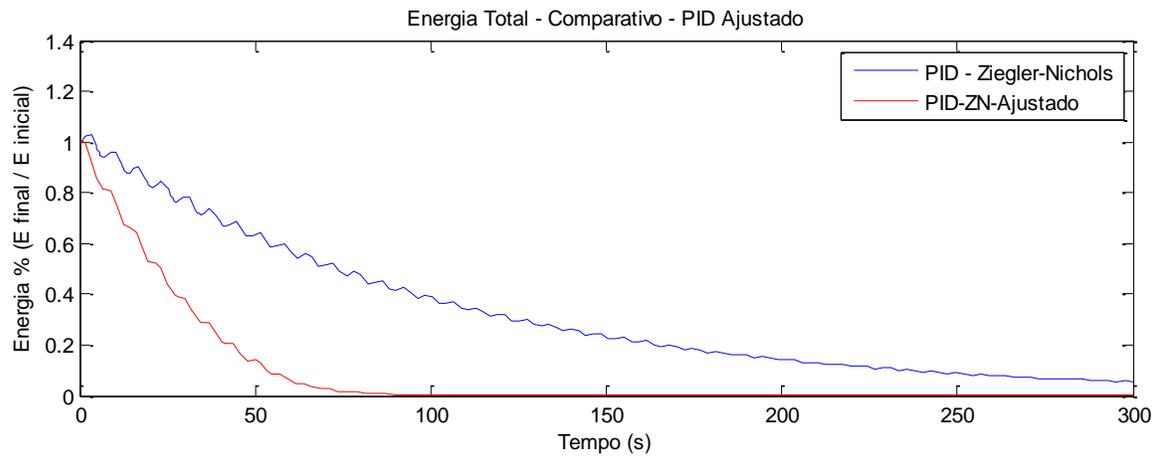


Figura 4.27: Modelo2 - Comportamento da energia. Comparativo PID x PID ajustado

Finalmente se analisa o comportamento do mecanismo atuador de controle, representado na Figura 4.28. Pode-se verificar uma saturação do controlador no primeiro minuto de atuação, fazendo com que atue praticamente como um mecanismo *on/off*. Este comportamento demonstra que a sintonia de controle está utilizando a potência máxima do mecanismo de controle como forma de dissipação de energia. Em consequência disto, temos uma melhor performance na redução de oscilações do sistema, como apresentado anteriormente.

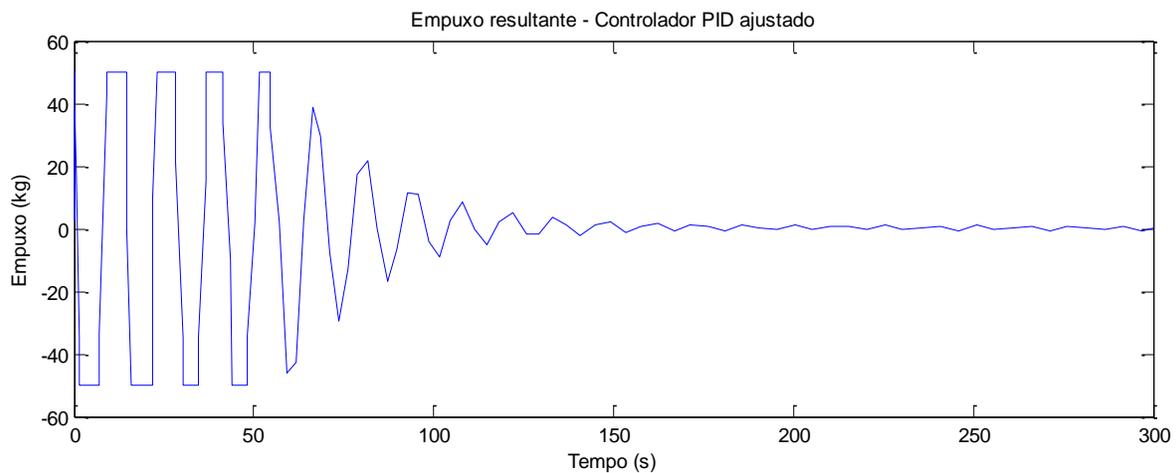


Figura 4.28: Modelo 2: Resposta do controlador PID ajustado

A partir das análises apresentadas a pouco, pode-se verificar que o sistema de amortecimento, com o acoplamento de turbinas geradores de empuxo, representa uma alternativa viável. Assim após o ajuste de sintonia do controlador obtém-se uma performance suficiente para suprir as necessidades e

objetivos desejados. Assim conseguimos um controlador que em menos de 80 segundos é capaz reduzir as oscilações da *personnel basket* nas condições iniciais apresentadas a praticamente zero.

Levando-se em consideração que a situação inicial é um caso extremo, com o objetivo de verificar os limites de atuação do controlador, e que em situações reais este sistema estaria em atuação desde o princípio de toda a operação, evitando que a cesta de transferência se encontre em uma angulação elevada, pode-se afirmar que a alternativa de amortecimento de oscilações proposta melhorara a segurança destas operações e apresenta um excelente desempenho.

4.5. Modelo 3 – Amortecimento Ativo – Complexo de Turbinas Acoplado ao Guindaste.

O sistema de amortecimento proposto pelo modelo 2, amortecimento ativo através de um complexo de turbinas acoplado a base da cesta, apresentou uma excelente performance e supriu as necessidades de amortecimento necessárias para a estabilização do equipamento de transporte em um curto intervalo de tempo. No entanto alguns fatores operacionais e de viabilidade técnica devem ser considerados.

O fato de o sistema de turbina estar acoplado à base da cesta pode permitir o contato desde equipamento diretamente com a água e este fato torna necessário um tratamento especial de todo o equipamento e controladores o que pode acabar por tornar o custo do projeto mais elevado e inviabilizá-lo economicamente.

Outra questão importante é o fato de ser necessário o acoplamento do sistema a uma *personnel basket* já existente ou o desenvolvimento de um projeto com o sistema de amortecimento acoplado. Dessa forma este mecanismo estaria dedicado exclusivamente a utilização para este tipo de operação e seria necessário um sistema para cada cesta existente.

A alternativa a estas questões apresentadas acima, seria o desenvolvimento de um mecanismo avulso, semelhante em estrutura e função ao sistema apresentado pelo modelo 2, no entanto ficaria acoplado ao guindaste e a *personnel basket* sustentada por ele. A Figura 4.29 representa o acoplamento deste sistema ao mecanismo cesta / guindaste.

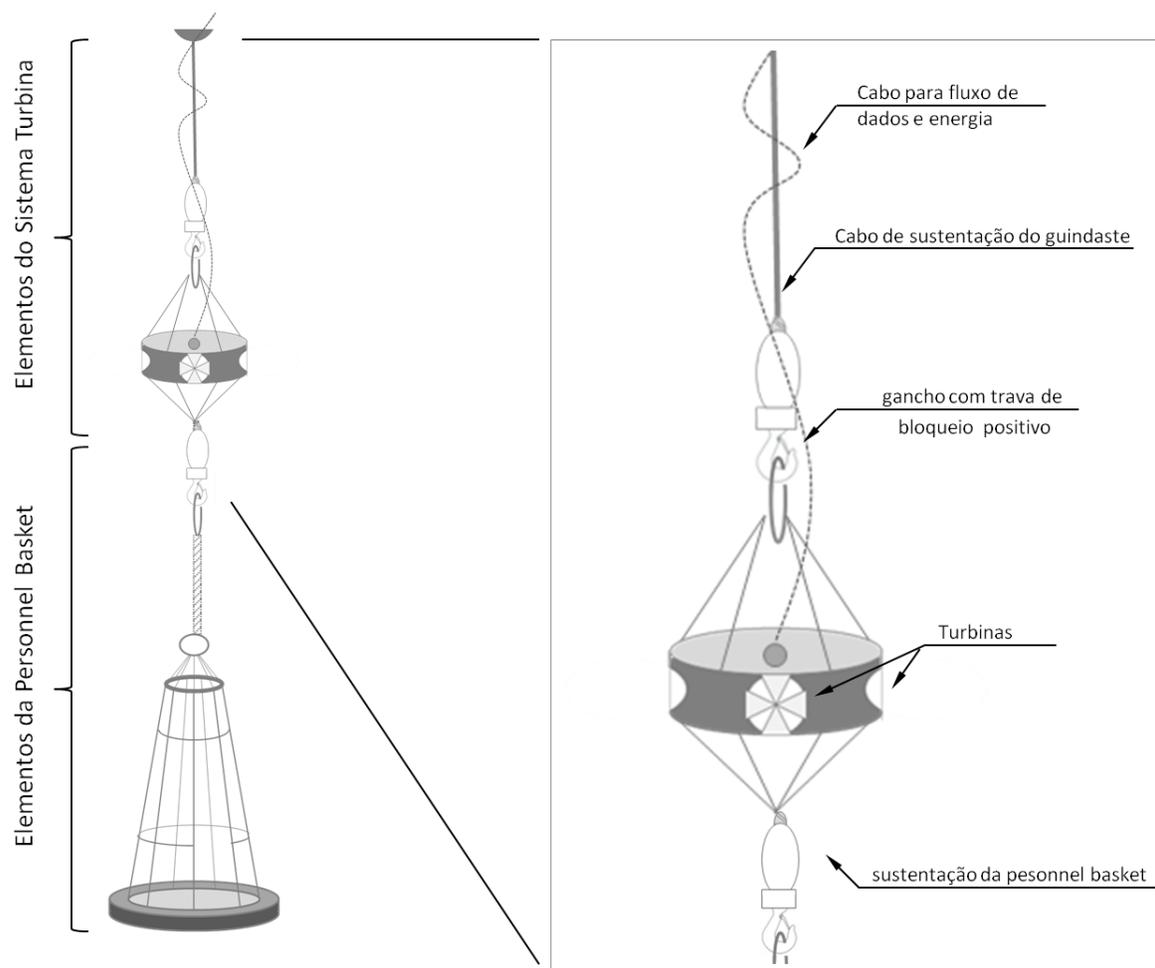


Figura 4.29: Sistema de Amortecimento avulso - Modelo 3

Esta simples modificação de localização e estrutura, permite que este sistema funcione diretamente no guindaste, independente de sua utilização. Dessa forma o equipamento passa a ser um acessório ao guindaste que permite a redução de oscilações de perturbações independentemente da operação.

Assim pode ser utilizado no guindaste avulso, tornando o seu controle facilitado e evitando acidentes resultantes de ventanias e falhas na condução do operador. Além disso, poderia ser utilizado para transporte de equipamento em diferentes configurações, sendo somente necessário o estudo para verificar se as limitações de empuxo do complexo de turbinas será suficiente para a estabilização do peso da carga a ser deslocado.

Avaliando as vantagens desta nova configuração do complexo de turbinas, se faz necessário a realização de simulações para este novo modelo afim de verificar se a sua performance continuará

efetiva e avaliar se a estratégia de controle utilizado pelo modelo 2 pode ser replicada a esta nova configuração. A Figura 4.30 apresenta o diagrama de massas do modelo 3.

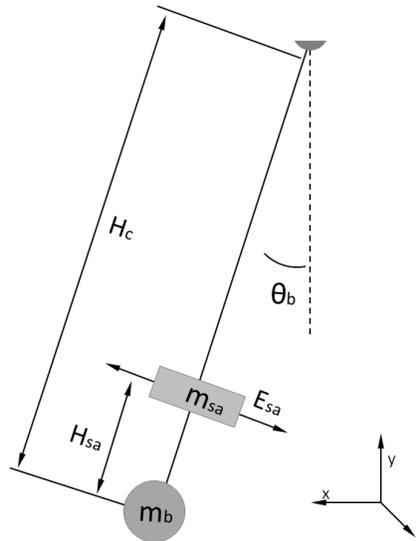


Figura 4.30: Modelo 3 - Diagrama de massas

θ_b : Ângulo da personnel basket em relação ao eixo perpendicular ao solo/oceano .

H_c : Comprimento do cabo de apoio a personnel basket.

H_{sa} : Distância ente a base da cesta e o sistema de turbinas.

m_b : Massa da personnel basket somada ao peso das pessoas sobre a mesma.

m_{sa} : Massa do sistema de amortecimento acoplado a personnel basket.

E_{sa} : Empuxo resultante da atuação das turbinas.

É possível notar que a principal diferença entre o modelo 2 e o modelo atual é o termo H_{sa} . Este termo representa a distância do sistema de amortecimento e a base da cesta. Este novo termo altera a dinâmica da cesta de devido a isto este novo modelo proposto deve passar por todo processo de modelagem de suas equações de movimento.

4.5.1. Modelagem:

Utiliza-se o método das equações de Lagrange, o mesmo método utilizado nos modelos anteriores. O primeiro passo é encontrar o lagrangeano (L), cuja fórmula é apresentada pela Equação (4.51) por conveniência.

$$L = T - U \quad (4.51)$$

O lagrangeano pode ser detalhado pelo desmembramento dos termos em função das energias provenientes da basket (b) e provenientes do sistema de amortecimento (sa). Assim como apresentado pela Equação (4.52).

$$L = (T_b + T_{sa}) - (U_b + U_{sa}) \quad (4.52)$$

As Equações (4.53), (4.54), (4.55) e (4.56) representam as energias cinéticas e potências de cada um dos termos do sistema. Repare que as alterações na organização física no modelo atual representaram um acréscimo do termo H_{sa} nas Equações (4.55) e (4.56).

$$T_b = \frac{1}{2} m_b H_c^2 \dot{\theta}_b^2 \quad (4.53)$$

$$U_b = - m_b g H_c \cos \theta_b \quad (4.54)$$

$$T_{sa} = \frac{1}{2} m_{sa} (H_c - H_{sa})^2 \dot{\theta}_b^2 \quad (4.55)$$

$$U_{sa} = - m_{sa} g (H_c - H_{sa}) \cos \theta_b \quad (4.56)$$

Em posse de todos os termos de energia do sistema é possível encontrar a equação representativa do lagrangeano.

$$L = T - U = \frac{1}{2} m_b H_c^2 \dot{\theta}_b^2 + \frac{1}{2} m_{sa} (H_c - H_{sa})^2 \dot{\theta}_b^2 + \\ + m_b g H_c \cos \theta_b + m_{sa} g (H_c - H_{sa}) \cos \theta_b \quad (4.57)$$

Após o cálculo do lagrangeano o próximo passo consiste na resolução das equações de Lagrange que resultará nas equações de movimento do sistema. As fórmulas e o passo a passo da resolução do método de Lagrange são apresentados abaixo pelas Equações (4.58), (4.59), (4.60) e (4.61).

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = F_{\text{n\~{a}o conservativas}} \quad i = (b) \quad (4.58)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_b} = m_b H_c^2 \dot{\theta}_b + m_{sa} (H_c - H_{sa})^2 \dot{\theta}_b \quad (4.59)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_b} \right) = [m_b H_c^2 + m_{sa} (H_c - H_{sa})^2] \ddot{\theta}_b \quad (4.60)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_b} = -[m_b H_c + m_{sa} (H_c - H_{sa})] g \sin(\theta_b) \quad (4.61)$$

Após a resolução das equações diferenciais apresentadas encontra-se a Equação (4.62) que representa a fórmula de movimento do sistema.

$$[m_b H_c^2 + m_{sa} (H_c - H_{sa})^2] \ddot{\theta}_b + [m_b H_c + m_{sa} (H_c - H_{sa})] g \sin(\theta_b) = -E_{sa} H_c \quad (4.62)$$

Isolando-se $\ddot{\theta}_b$ e realizando as devidas simplificações, obtém-se a Equação (4.63).

$$\ddot{\theta}_b = \frac{-[m_b H_c + m_{sa} (H_c - H_{sa})] g \sin(\theta_b) - E_{sa} H_c}{[m_b H_c^2 + m_{sa} (H_c - H_{sa})^2]} \quad (4.63)$$

O termo que representa o empuxo resultando do sistema de amortecimento encontra-se simplificado na equação acima. O método de controle PID será utilizado assim como no modelo anterior para verificar o efeito da mudança física do sistema de turbina.

$$E_{sa} = K(\theta_b + T_i \int \theta_b dt + T_d \dot{\theta}_b) \quad (4.64)$$

Assim como utilizando no modelo anterior, a metodologia através da qual será avaliada o desempenho do sistema é a comparação da energia inicial com a energia final, após o intervalo de simulação. O referencial de energia zero é representado quando o sistema se encontra em repouso na

posição vertical. A fórmula de energia ajustada ao referencial desejado é apresentado pela Equação (4.65).

$$E_{total} = [m_b \cdot g \cdot H_c + m_{sa} \cdot g \cdot (H_c - H_{sa})] \cdot (1 - \cos \theta_b) + \frac{1}{2} [m_b H_c^2 + m_{sa} (H_c - H_{sa})^2] \dot{\theta}_b^2 \quad (4.65)$$

Concluída a modelagem do sistema e encontrando-se todas as equações de movimento necessárias para realizar as simulações tem-se como próximo passo a simulação deste sistema e escolha da estratégia de controle. Assim como nos modelos anteriores utiliza-se um controlador PID. A representação em diagrama de blocos das equações do sistema juntamente com a ação do controlador é apresentado pela Figura 4.31.

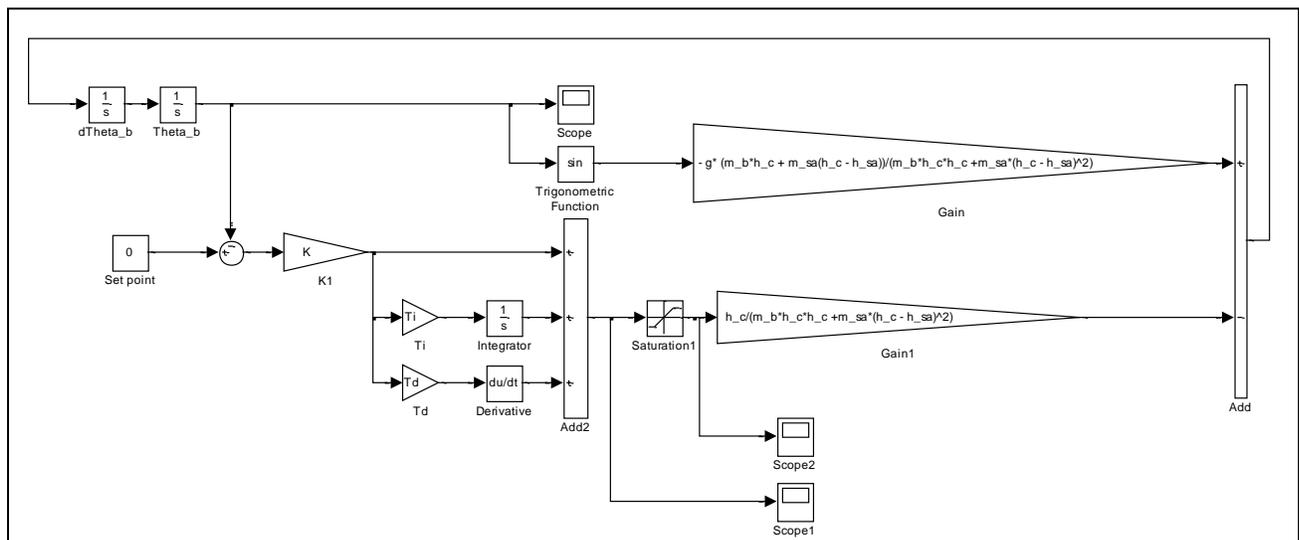


Figura 4.31: Diagrama de blocos do modelo 3 - Simulink

Assim como no modelo 2 este diagrama representa todas as equações do sistema em uma estrutura de blocos que permite a simulação de todo o sistema e visualização das variáveis necessárias a partir dos blocos de “scope”. Nota-se uma complexidade maior nos ganhos necessários para esta modelagem devido a alteração estrutural proposta por esta nova alternativa de sistema de amortecimento.

Com o objetivo de manter um nível de comparação possível entre os sistemas, as premissas e parâmetros para a simulação do modelo 3 serão mantidas o mais próximas dos sistemas de amortecimento propostos anteriormente. Dessa forma, continuaremos utilizando a personnel basket X-870 como base e o complexo de turbinas será composto pelo modelo JetCat P200-SX. O único parâmetro adicional necessário é o termo H_{sa} , exatamente pelo fato de representar alteração em

relação ao modelo anterior. De acordo com as especificações da modelo de personnel basket X-870 e JetCat P200-SX, temos esse valor definido como três metros.

Parâmetros Utilizados:

- $g : 9,80665 \text{ m/s}^2$;
- $H_C : 50 \text{ m}$;
- $H_{sa} : 3 \text{ m}$;
- $m_b : 500 \text{ Kg}$;
- $\theta_{b\text{-inicial}} : 10^\circ$;
- $m_{sa} : 50 \text{ Kg}$;
- $E_{sa\text{máx}} : 50 \text{ Kg}$
- *Tempo de simulação: 300 s*

A sintonia do controlador PID será realizada pelo método de Ziegler-Nichols e seus parâmetros de controle serão obtidos através da metodologia de resposta em frequência do sistema.

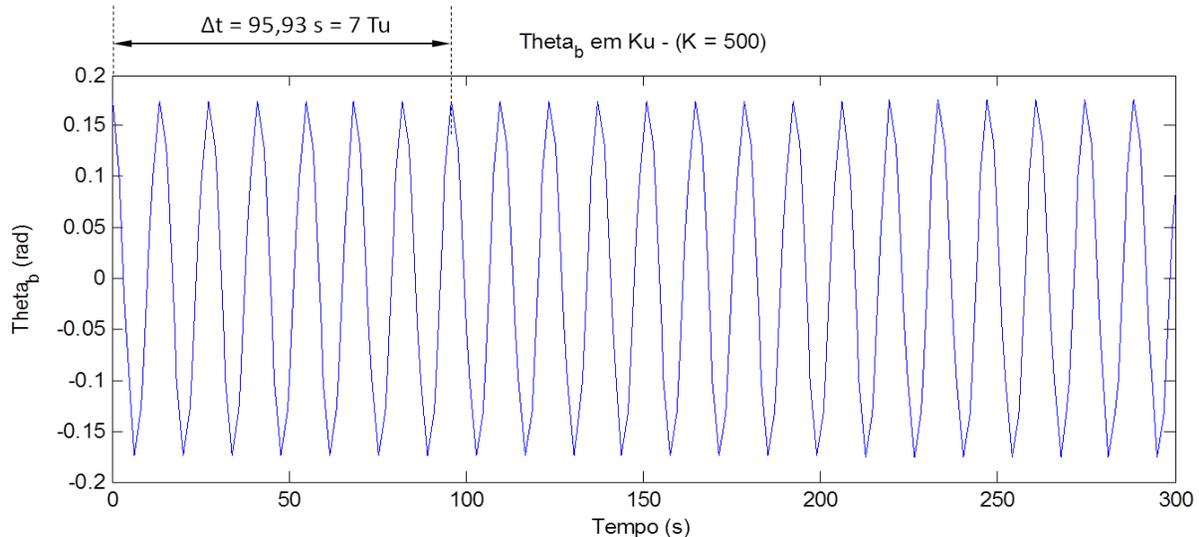


Figura 4.32:Gráfico representativo do modelo 3 quando K=Ku=500.

A Figura 4.32 representa o comportamento de θ_b quando o sistema se encontra no limite de sua estabilidade, assim como no modelo anterior obtemos a constante proporcional crítica (K_u) igual a 500. Através do gráfico apresentado acima obtém-se o período crítico (T_u) como apresentado abaixo.

- $T_u=95,93/7 = 13,70$

A sintonia de controladores a partir do método de Ziegler-Nichols é obtida com a utilização da Tabela 4.1. Assim obtemos:

- $K=294$
- $T_i=6.85$
- $T_d=1.71$

Definindo-se a sintonia do controlador PID responsável pela ação de empuxo do sistema de amortecimento de oscilações propostas realiza-se as simulações com o objetivo de verificar a eficácia do controlador para a finalidade desejada. A Figura 4.33 representa a evolução do ângulo entre a cesta de transferência de pessoas e o eixo vertical, dessa forma podemos verificar uma redução significativa das oscilações deste sistema.

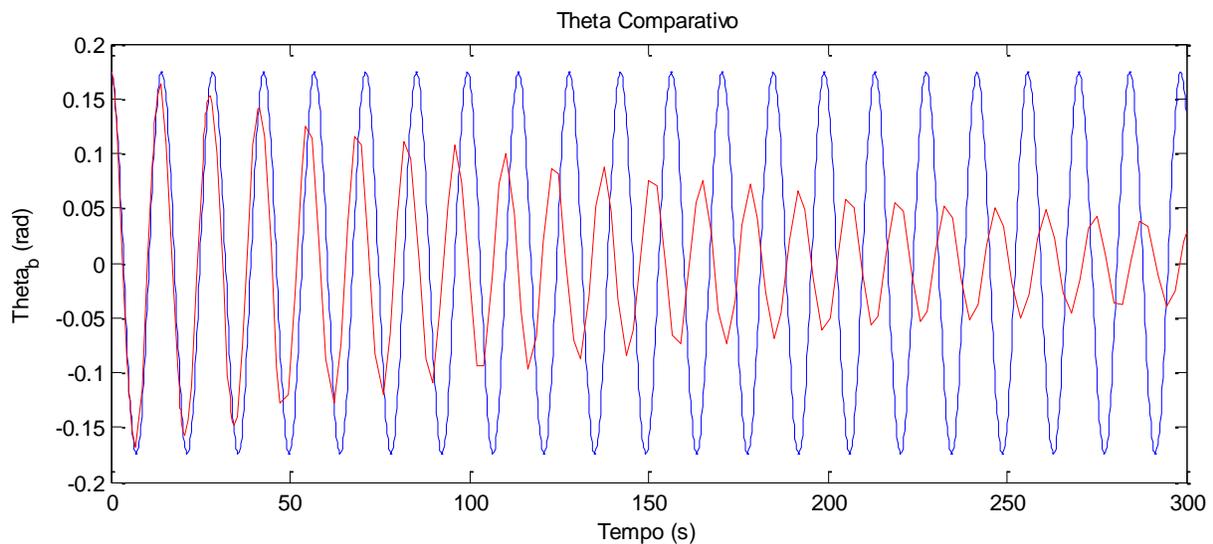


Figura 4.33 Modelo 3 - Resultado comparativo de performance PID.

Seguindo a metodologia de avaliação de desempenho empregada nos modelos anteriores, utilizaremos o percentual de energia remanescente no sistema para avaliar o grau de dissipação de energia atingido pelo controlador. A Figura 4.34 representa a evolução da energia do sistema comparada com a energia do sistema nas condições iniciais. Assim pode-se notar uma redução

significativa das oscilações tendo mantido somente 5,41 % da energia inicial após o período de avaliação do sistema.

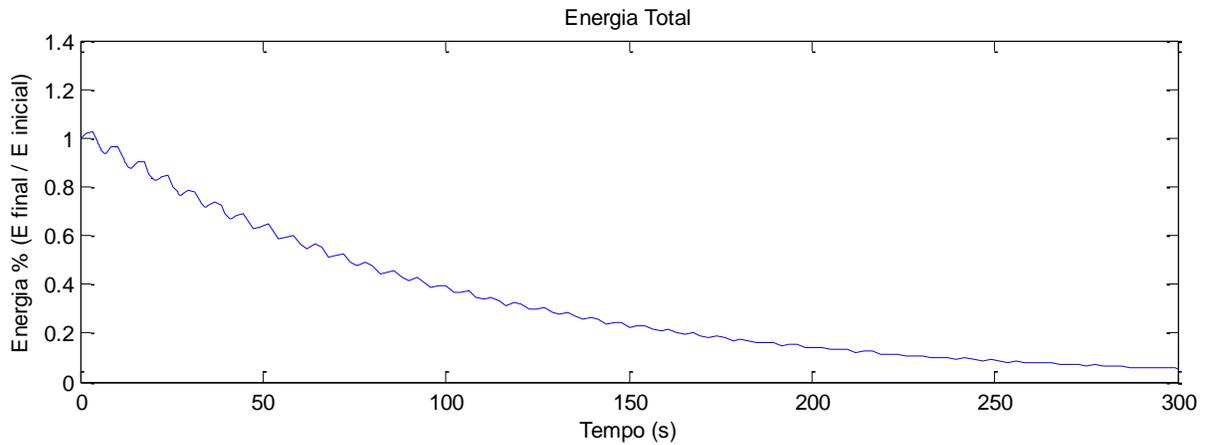


Figura 4.34: Modelo 3 - Comportamento da energia.

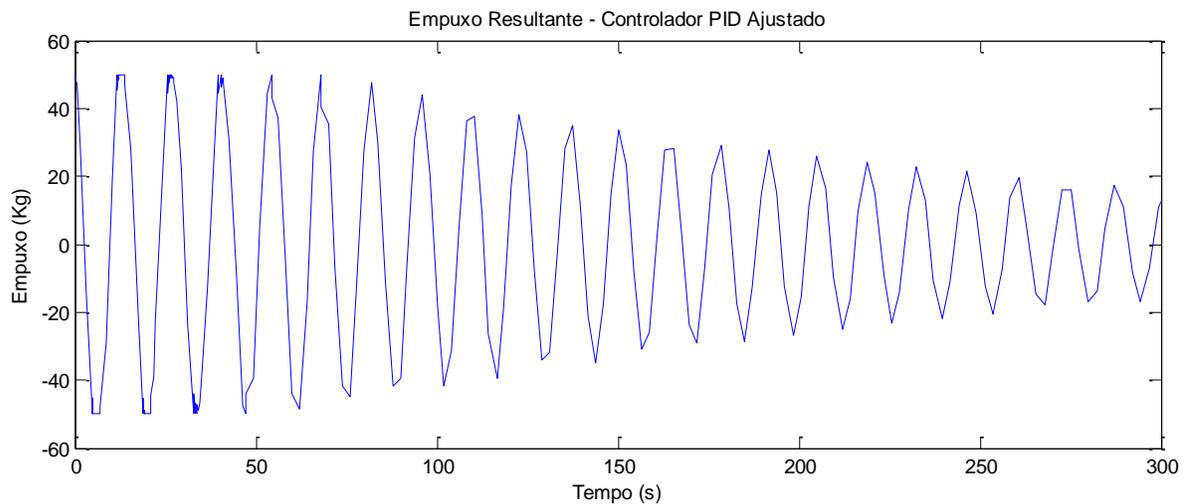


Figura 4.35: Modelo 3: Resposta do controlador PID

O modelo 2 apresentou um excelente desempenho com a aplicação do controlador PID ajustado, que coloca o termo diferencial com uma representatividade cinco vezes maior devido as características peculiares e objetivos do sistema. A Figura 4.35 demonstra que o controlador na sintonia sugerida pela metodologia de Ziegler-Nichols apresenta poucos pontos de saturação o que pode indicar uma subutilização de sua potência para o controle do sistema. Aliando os dois argumentos apresentados sugeri-se a utilização do PID ajustado como forma de melhor utilizar o potencial do sistema de amortecimento e ao se aumentar o termo derivativo deseja-se controlar melhor as oscilações do sistema.

4.5.2. PID Ajustado

O PID ajustado eleva a representação do termo derivado, pois o maior fator de segurança para este sistema é a redução de oscilação da cesta. Assim ao se aumentar este termo o sistema final apresenta uma menor tolerância às oscilações.

- $K=294$
- $T_i=6.85$
- $T_d= T_d \times 5 = 8,57$

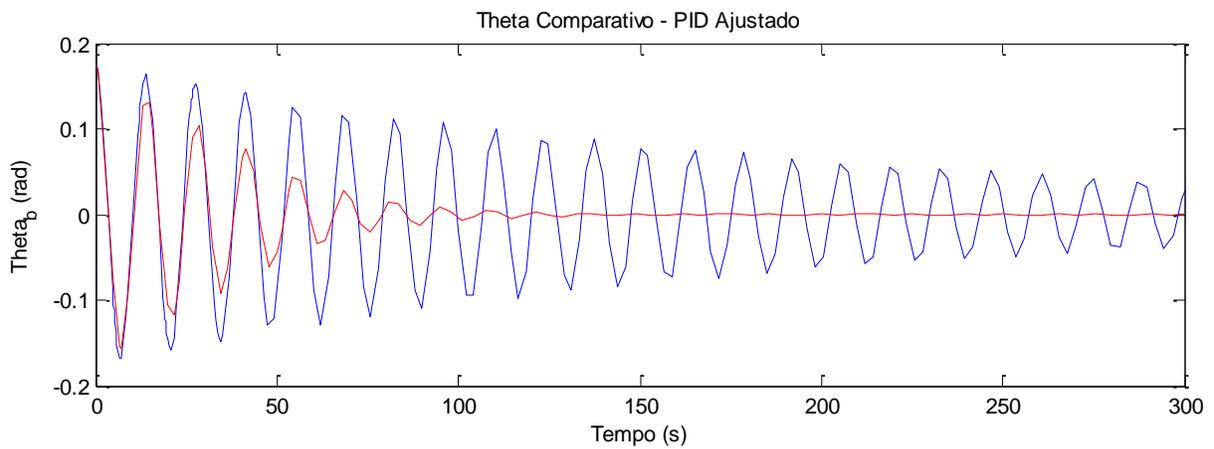


Figura 4.36: Modelo 3 - Resultado comparativo de performance PID ajustado

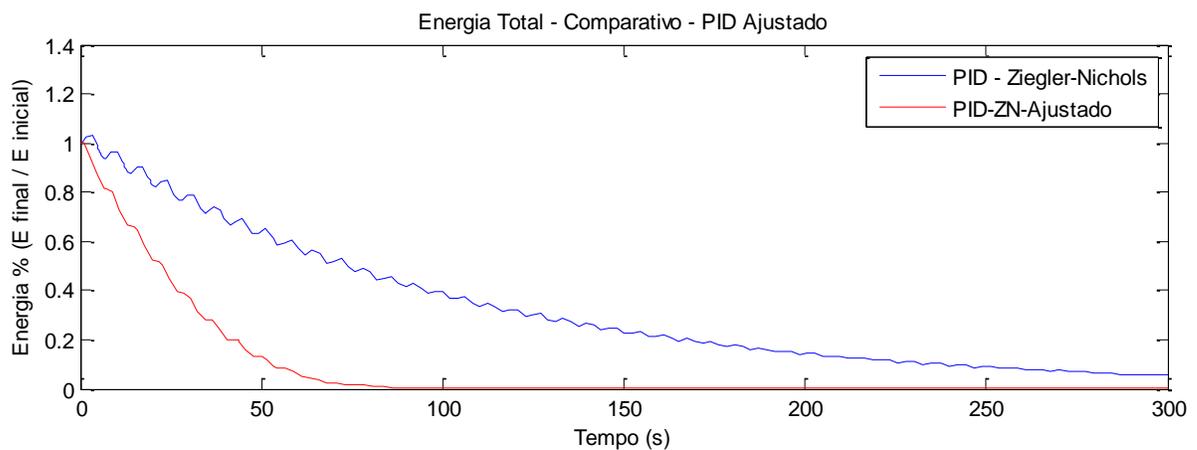


Figura 4.37: Modelo 3 - Comportamento da energia. Comparativo PID x PID ajustado

A Figura 4.36 e a Figura 4.37 representam o desempenho do controlador ajustado para o modelo 3. Nota-se uma melhora considerável na performance do sistema, assim como ocorrido no modelo 2 e portanto conclui-se que as modificações propostas para este novo sistema de amortecimento não afetam desfavoravelmente a eficiência do controle PID. Assim pode-se incorporar as vantagens mencionadas anteriormente por estas modificações com a certeza que o controle se manterá sua eficácia.

A análise da resposta gerado pelo controlador é importante para se verificar se este controlador está sintonizado de maneira a atuar com o seu potencial máximo de controle. Assim como apresenta a Figura 4.38 pode-se notar que existem diversos pontos de saturação no sistema o que indica que durante os primeiro 50 segundos de simulação o controlador atua com seu potencial máximo para reduzir a energia do sistema. Dessa forma podemos concluir que a sintonia do controlador nos permite a utilização eficiente de toda potência do sistema de turbinas instalado.

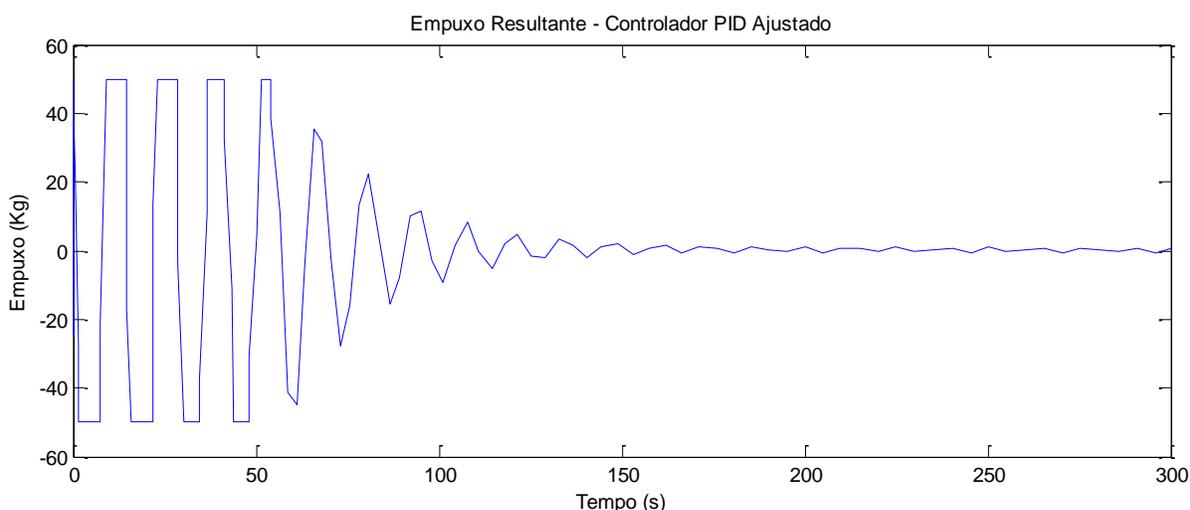


Figura 4.38: Modelo 3: Resposta do controlador PID ajustado

Após a análise de todas os modelos de amortecimento propostos, pode-se concluir que o Modelo 1 apesar de possuir maior simplicidade operacional apresenta uma ação muito tímida reduzindo apenas 25% da energia do sistema no intervalo de 300 segundos propostos pela simulação. Por outro lado os modelos 2 e 3 apresentam uma redução superior a 95% quando sintonizados por Ziegler-Nichols no intervalo de interesse e uma estabilização praticamente total da cesta em menos de 100 segundos para o PID ajustado.

Assim essa maior eficiência operacional nos permite afirmar que a metodologia de controle ativo através da utilização de turbinas geradoras de empuxo é uma abordagem pertinente a solução das questões apresentadas neste projeto. Além disso, o modelo 3 apresenta vantagens funcionais e econômicas ao projeto que torna este modelo o mais relevante para implantação.

4.5.3. Robustez do Controlador – Variação de Peso

O controlador sintonizado a partir da metodologia do PID ajustado apresentou um desempenho suficiente para reduzir as oscilações do sistema em um intervalo de tempo inferior as propostas dos mecanismos anteriores. O modelo 3 se diferencia do modelo 2 pelo posicionamento do complexo de turbinas geradoras de empuxo, esta modificação foi realizada com o intuito de tornar este mecanismo de amortecimento útil em diferentes cenários de operação, não ficando restrito somente a uma cesta de transferência de pessoas específica.

Dessa forma, acredita-se que esta modificação física, apesar de não apresentar grandes ganhos em desempenho, torne este equipamento mais atraente ao mercado *offshore* e assim possa ser utilizado como um equipamento anexo ao guindaste. Isso permitirá que este novo mecanismo proposto possa auxiliar o operador na redução de oscilações em qualquer operação que envolva o guindaste.

Este escopo mais amplo de operações apresentado possui diferentes cenários com variações significativas na inércia do sistema e na massa. Assim sendo, é necessário realizar simulações para verificar a robustez deste mecanismo de amortecimento a este diferente espectro de parâmetros.

Como testes preliminares é importante entender a variação de desempenho deste controlador para diferentes massas em m_b , pois este será o parâmetro de maior variação nesses diferentes cenários. Além disso, pode representar uma alteração de modelo de cesta de transferência de quatro pessoas para uma com capacidade maior.

Dessa forma, foram realizados testes com quatro diferentes constantes de peso em m_b para avaliar a alteração no comportamento do controle e desempenho na redução de oscilações. A Figura 4.39 apresenta as curvas que representam o comportamento da energia do sistema em relação a energia inicial do sistema o que nos permite avaliar a quão eficiente o controlador está sendo em realizar a dissipação de energia com foco na redução das oscilações do sistema.

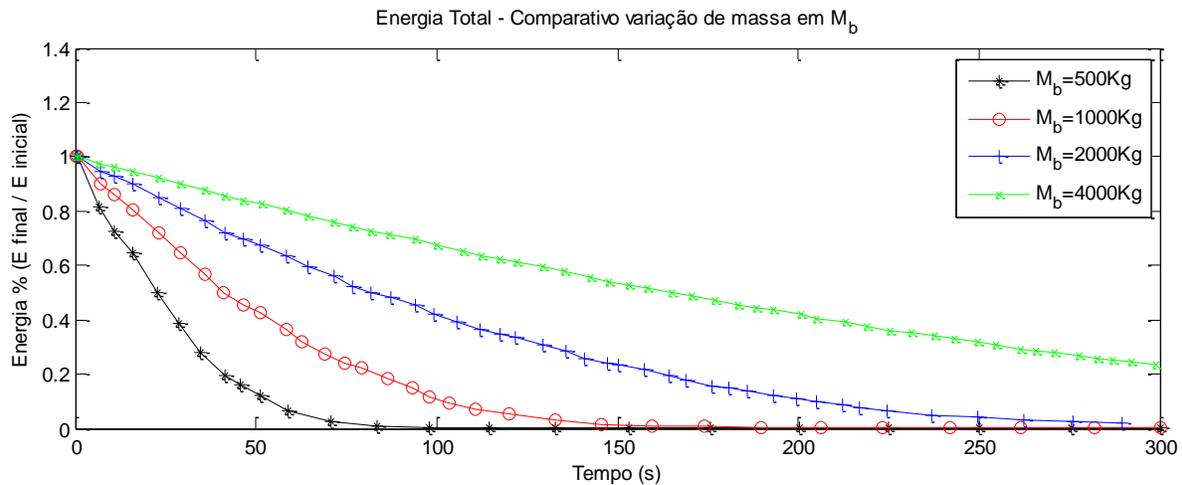


Figura 4.39 : Modelo 3 - Resposta a variação do peso da cesta.

As curvas de diferentes simulações nos permitem afirmar que este controlador é tão mais eficiente na redução de oscilações quanto menor a massa de m_b . Assim nota-se uma gradual perda de desempenho com o aumento desta massa. No entanto pode-se notar que mesmo com uma massa oito vezes maior do que a qual foi projetado, apresenta uma redução de 59,4% da energia do sistema nos 300 segundos de simulação.

Este resultado nos permite afirmar que mesmo com um complexo de turbinas limitado somente a 50 kg de empuxo podemos obter uma redução efetiva para massas consideravelmente maiores do que a utilizada para o dimensionamento do controlador. Além disso, ao se analisar a resposta do controlador para este cenário de variáveis, representado pela Figura 4.40, nota-se uma saturação continuada do empuxo. Esse fato demonstra que o comprometimento do amortecimento pelo aumento da massa é causado pela limitação de potência do mecanismo gerador de empuxo.

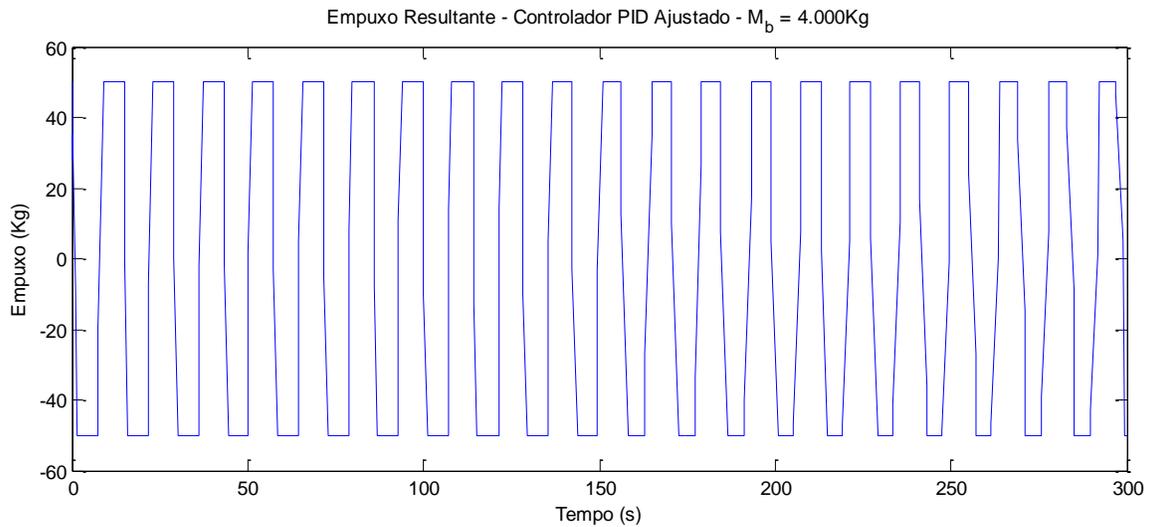


Figura 4.40: Modelo 3 - Resposta do controlador PID - $m_b = 4.000\text{Kg}$

Dessa maneira, pode-se afirmar que ao se projetar um sistema de turbinas com potência superior, cargas mais elevadas podem vir a ter suas oscilações reduzidas com maior eficiência. Sendo assim, este modelo poderia ser utilizado para transporte de cargas consideravelmente superiores as apresentadas nas simulações anteriores, bastando apenas utilizar um complexo de turbinas com um potencial de empuxo adequado a massa pretendida.

5. Considerações Finais

A crescente relevância do setor de óleo de gás no país propiciou um aumento considerável do desenvolvimento de tecnologia envolvida na operação e extração de petróleo para as novas reservas presentes na camada pré-sal. Estas novas operações apresentam elevada complexidade e novos desafios para o setor.

Este projeto apresentou uma abordagem focada no aumento da segurança para a movimentação de pessoas e cargas. Sendo como foco principal a apresentação de um mecanismo de amortecimento alternativo e que possibilite a absorção de energia do sistema conhecido como *personnel transfer basket*.

A abordagem inicial teve como foco todas as alternativas de deslocamento e embarque em plataformas, assim como as normas e regulamentações de segurança e regras de operação. Com estas informações em análise foi possível realizar simulações com parâmetros e modelagens que a aproximassem ao máximo de uma operação real.

O desenvolvimento da plataforma de simulações tem como objetivo incentivar o estudo deste assunto e permitir o desenvolvimento de abordagens futuras, através de uma ferramenta interativa e analítica.

Os três modelos apresentados apresentam características peculiares, mas demonstraram, mesmo que insuficiente em alguns casos, serem capazes de reduzir as oscilações do sistema através da absorção de energia.

O primeiro modelo baseado em uma abordagem de mecanismo passivo com o acréscimo de um peso morto atrelado a um coeficiente de atrito teve como principal desafio encontrar o valor de atrito que maximizasse a dissipação de energia. No entanto este modelo apresentou uma redução das oscilações em pouco mais de 25% em 300 segundos de simulação. Este resultado se deve principalmente as limitações das dimensões físicas do sistema que reduzem significativamente a eficácia do sistema.

Os modelos seguintes apresentam uma abordagem similar de utilização de um mecanismo ativo gerador de empuxo, responsável pela redução das oscilações do sistema controlado através de um controlador PID. A abordagem de sintonia por Ziegler-Nichols apresentou uma redução significativa das oscilações do sistema, mas ao se incrementar a relevância do termo derivativo, T_d , pode-se obter uma melhora considerável. Esta nova abordagem torna a absorção de toda a energia do sistema possível em um tempo inferior a 100 segundos para os parâmetros utilizados na simulação.

O terceiro modelo apresenta um desempenho similar, mas suas alterações no posicionamento físico do complexo de turbinas permite vantagens operacionais como a utilização deste mecanismo em diversas operações com cargas distintas, não ficando acoplado a uma única *personnel basket*.

Além disso, o teste de robustez permite afirmar que este modelo poderia ser utilizado para cargas com massa superior a 4.000 kg sofrendo apenas uma redução em seu desempenho.

Levando em considerações os fatos citados acima e os dados e gráficos de simulações apresentadas anteriormente pode-se afirmar que o modelo proposto cumpriu o seu objetivo de melhora da segurança das operações de transferência de pessoas em operações *offshore* através da redução das oscilações do sistema.

Além disso, estes resultados e a abordagem do último mecanismo alternativo proposto, permitem uma abordagem mais ampla da temática apresentada, expandindo o tema para todos os tipos de operações de transferências de carga. Este mecanismo pode ser encarado como um mecanismo auxiliar a qualquer guindaste cuja oscilação represente um problema operacional.

Diversos artigos e projetos tem a metodologia para a resolução da problemática de oscilação de um guindaste baseada na alteração estrutural do guindaste e/ou de seu controle. Esta abordagem alternativa, permite um desempenho suficiente e representa como principal diferencial o fato de poder ser acoplado a um grande espectro de modelos de guindaste sem que para isso seja necessário grandes mudanças estruturais.

5.1. Estudos Futuros

Este projeto iniciou uma abordagem para a redução das oscilações das operações de um guindaste em operações *offshore* apresentando abordagem de mecanismos com estruturas para amortecimento de energia. Estes modelos se mostraram válidos para a redução de uma oscilação causada devido a condições iniciais do sistema.

A abordagem através da plataforma de teste e modelos de mecanismo estimula o desenvolvimento de novas alternativas para a mesma problemática e também a apresentação de trabalhos com abordagens de simulações que levem em considerações outros parâmetros e variáveis presentes nas situações reais.

Assim a Figura 5.1 e Figura 5.2 apresentam uma abordagem mais completa como maneira de estimular a continuidade dos estudos neste tema. Este diagrama representa um diagrama que considera a oscilação nos dois graus de liberdade, a influência da oscilação da plataforma na movimentação da *personnel basket* e os distúrbios causados pela força do vento. Segue abaixo os diagramas e as variáveis para a modelagem e simulação desta problemática mais complexa proposta.

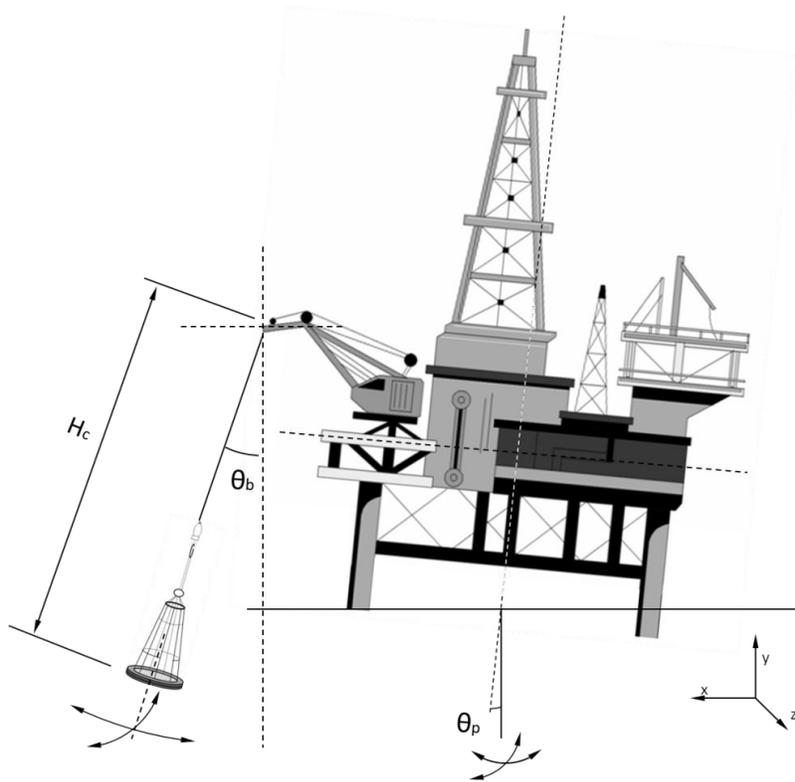


Figura 5.1: Plataforma completa: parâmetros para simulação

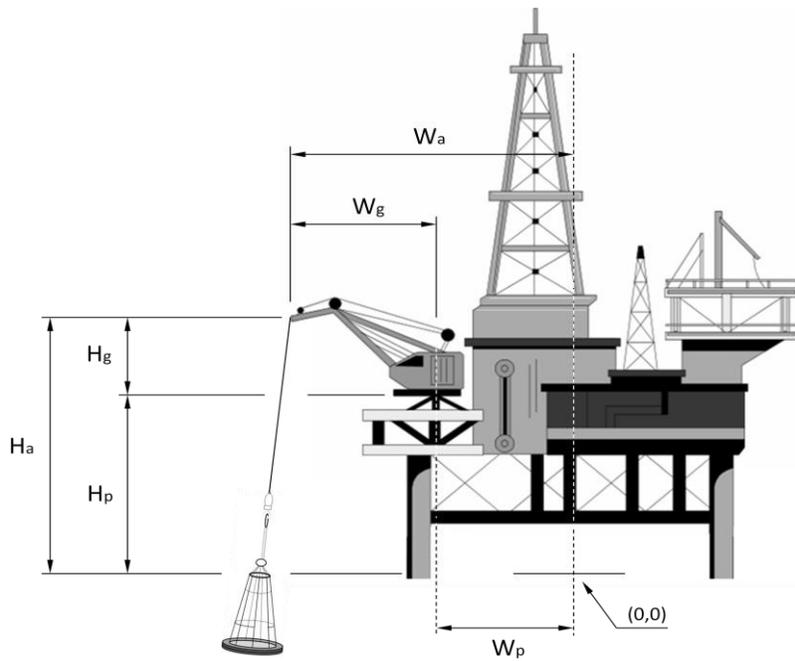


Figura 5.2: Plataforma completa: parâmetros para simulação (2)

$\theta_{b_{xy}}$: Ângulo da personnel basket em relação ao eixo perpendicular ao solo/oceano (plano xy).

$\theta_{b_{yz}}$: Ângulo da personnel basket em relação ao eixo perpendicular ao solo/oceano (plano yz).

$\theta_{p_{xy}}$: Ângulo da base da plataforma/navio em relação ao eixo perpendicular ao solo/oceano (plano xy).

$\theta_{p_{yz}}$: Ângulo da base da plataforma/navio em relação ao eixo perpendicular ao solo/oceano (plano yz).

W_P : Distância horizontal entre o centro de massa da plataforma/navio e o ponto de apoio do guindaste.

W_G : Distância horizontal entre o ponto de apoio do guindaste e o ponto de apoio do cabo.

W_A : Distância horizontal entre o centro de massa da plataforma/navio e o ponto de apoio do cabo ($W_P + W_G$).

H_C : Comprimento do cabo de apoio a personnel basket.

H_P : Distância horizontal entre o centro de massa da plataforma/navio e o ponto de apoio do guindaste.

H_G : Distância horizontal entre o ponto de apoio do guindaste e o ponto de apoio do cabo.

H_A : Distância horizontal entre o centro de massa da plataforma/navio e o ponto de apoio do cabo ($H_P + H_G$).

m_b : Massa da personnel basket somada ao peso das pessoas sobre a mesma.

I_b : Momento de inércia da personnel basket e as pessoas embarcadas.

y_b : Coordenada que representa a altura da personnel basket em relação ao ponto de referência.

g : Gravidade - 9,8 m/s.

F_{ar} : Força de atrito com o ar referente ao balanço da personnel basket.

F_{vento} : Força de arrasto do vento sobre a personnel basket.

m_{sa} : Massa do sistema de amortecimento acoplado a personnel basket.

I_b : Momento de inércia do sistema de amortecimento acoplado a personnel basket.

y_{sa} : Coordenada que representa a altura da personnel basket em relação ao ponto de referência.

$F_{amortecimento}$: Força de atrito com o eixo do sistema de amortecimento acoplado.

6. Referências

1. ALVAREZ, D.; FIQUEIREDO, M.; ROTENBERG, L. Aspectos do Regime de Embarque, turnos e gestão do trabalho em plataforma offshore da Bacia de Campos (RJ) e sua relação com a saúde e a segurança dos trabalhadores. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, São Paulo, v. 35, p. 201-216, 2010.
2. BARBI, F. C.; SILVA, A. L. P. **O Petróleo do Pré-Sal: Os desafios e as possibilidades de uma nova política industrial no Brasil**. FGV/SP. São Paulo, p. 255-271. 2008. (2 (34)).
3. BILLY Pugh - Personnel Transfer Net. **itrade market**. Disponível em: <http://itrademarket.com/kpm_marine/955403/billy-pugh-x-871-personnel-transfer-net.htm>. Acesso em: 30 ago. 2012.
4. Billy Pugh - Product Catalog. Billy Pugh Co. Inc. [S.I.]. 2011.
5. Billy Pugh X-904 Personnel Transfer Basket. Chevron. [S.I.].
6. CREW Boat Transfer. **Ng Boat.com**. Disponível em: <<http://ngboat.com/search/crew-boat-transfer-for-sale>>. Acesso em: 10 ago. 2012.
7. DICKEY, T. D.; ITSWEIRE, M. A. M.; J., P. M. Introduction to the "Limnology and Oceanography" Special Issue on Autonomous and Lagrangian Platforms and Sensors. [S.I.]: [s.n.], v. 2, 2008.
8. Estruturas Oceânicas - Cestas de Transferência de Pessoal - Especificação - ABNT NBR 10876:2011. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.I.]. 2011.
9. ESVAGT. Disponível em: <<http://www.esvagt.dk/Default.aspx?ID=8&M=News&PID=322&NewsID=40>>. Acesso em: 10 set. 2012.
10. Esvagt Safe Personnel Transfer Basket. W. H. Brennan & Co Pte Ltd. [S.I.].
11. Guidance on. [S.I.].
12. Guidance on the Transfer of Personnel to and from Offshore Vessels - IMCA SEL 025. The International Marine Contractors Association. [S.I.]. 2010.
13. Guidelines on Procedures for Transfer Personnel by Basket on the UK Continental Shelf - IMCA SEL 08/01. The International Marine Contractors Association (IMCA). [S.I.]. 2001.
14. HISTÓRIA do Petróleo no Brasil. **Com Ciência**, 2012. Disponível em: <<http://www.comciencia.br>>. Acesso em: 01 mar. 2012.

15. Instruction manual - V6.0 ECU (US Patent # 6216440). JetCat. [S.l.]. 2008.
16. LIMA, P. C. R. **Os Defasios, os Impactos e a Gestão da Exploração do Pré-Sal**. Consultoria Legislativa. [S.l.]. 2008.
17. OFFSHORE News. Disponível em: <<http://www.offshore-news.eu/?n=104>>. Acesso em: 15 set. 2012.
18. Orientações para Operação de Içamento - IMCA SEL 019. The International Marine Contractors Association (IMCA). [S.l.]. 2007.
19. ORITIZ, J. B.; COSTA, A. D. A Petrobrás e a Exploração de Petróleo Offshore no Brasil: um approach evolucionário. **RBE**, Rio de Janeiro, v. 61, p. 95-109, Jan-Mar 2007. ISSN 1.
20. PERSONNEL Transfer Using Ship's Cranes. **Standard Safety**, p. 1-8, 2010.
21. ROBERT, A. P. System Modeling : the Lagrange Equations, 2001.
22. SANJAY, S. Rigid Body Dynamics, Novembro 2007.
23. SOUZA, A. Perfil do Homem Offshore: Aspectos relevantes na relações no trabalho e familiares. **Caderno de Pesquisas em Administração**, São Paulo, v. 1, 1996. ISSN 3.
24. WAITING To Transfer. **Pier System**. Disponível em: <<https://www.piersystem.com/go/doc/586/29118/Waiting-To-Transfer>>. Acesso em: 03 ago. 2012.
25. Water Transport accident Statistics. OGP -Risk Assessment Data Directory. [S.l.]. 2010. (Report No. 434 - 10).
26. WIDNALL, S. Energy Methods: Lagrange's Equations, 2009.

7. Anexos

7.1. GUI_Animacao.m

```
function varargout = GUI_Animacao(varargin)

% GUI_Animacao - função de inicialização da plataforma de simulação

% --- Funções de Inicialização
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @GUI_Animacao_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @GUI_Animacao_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End --- Funções de Inicialização

% --- Execução na inicialização da plataforma
function GUI_Animacao_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

set(handles.btn_Stop, 'Enable', 'off')

% Carrega Funções de Inicialização
pbo1_init
pbm1_init
Tspan = 1000;

% Ajustante de Parâmetros Padrões na Interface
set(handles.pbo_peso, 'string', pbo1_m1);
set(handles.pbo_comp, 'string', pbo1_l1);
set(handles.pbo_ka, 'string', pbo1_ka1);
set(handles.theta0, 'string', pbo1_theta0);
set(handles.dtheta0, 'string', pbo1_dtheta0);
set(handles.Tspan, 'string', Tspan);

set(handles.pbm_PesoBasket, 'string', pbm1_m1);
set(handles.pbm_PesoMorto, 'string', pbm1_m2);
set(handles.pbm_CaboPesoMorto, 'string', pbm1_l2);
set(handles.pbm_ka2, 'string', pbm1_ka2);
```

```

% Configuração dos Eixos dos Gráficos e Animações
axes(handles.graf_pbml)
axis off
axis square

axes(handles.graf_pbo1)
axis off
axis square

axes(handles.graf_theta);
title('Theta - Comparativo');

axes(handles.graf_dtheta);
title('Theta 2');

axes(handles.graf_energ);
title('Energia Total');

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = GUI_Animacao_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

% --- Executa quando o botão Iniciar é acionado.
function btn_Play_Callback(hObject, eventdata, handles)

% Configuração dos Botões
set(handles.btn_Play, 'Enable', 'off')
set(handles.btn_Stop, 'Enable', 'on')

global pbo1_m1 pbo1_l1 pbo1_ka1 pbo1_theta0 pbo1_dtheta0 g
global pbml_m1 pbml_l1 pbml_ka1 pbml_m2 pbml_l2 pbml_ka2
global finalizar

% Ajuste dos Parâmetros para a Simulação
pbo1_m1 = str2double(get(handles.pbo_peso, 'string'));
pbo1_l1 = str2double(get(handles.pbo_comp, 'string'));
pbo1_ka1 = str2double(get(handles.pbo_ka, 'string'));
pbo1_theta0 = str2double(get(handles.theta0, 'string'));
pbo1_dtheta0 = str2double(get(handles.dtheta0, 'string'));

pbm_theta2 = 0;
pbm_dtheta2 = 0;
pbml_m1 = str2double (get(handles.pbm_PesoBasket, 'string'));
pbml_l1 = pbo1_l1;
pbml_ka1 = pbo1_ka1;

```

```

pbm1_m2 = str2double(get(handles.pbm_PesoMorto, 'string'));
pbm1_l2 = str2double(get(handles.pbm_CaboPesoMorto, 'string'));
pbm1_ka2 = str2double(get(handles.pbm_ka2, 'string'));

Tspan = str2double(get(handles.Tspan, 'string'));

l1 = pbo1_l1;
l2 = pbm1_l2;

% Equações Diferenciais - Simulações
[pbo_tlin pbo_theta] = pbo1_simul (Tspan,pbo1_theta0,pbo1_dtheta0);
[pbm_tlin pbm_theta] = pbm1_simul
(Tspan,pbo1_theta0,pbo1_dtheta0,pbm_theta2,pbm_dtheta2);

axes(handles.graf_theta);

% Formatação de Eixos
plot(pbo_tlin ,pbo_theta(:,1),pbm_tlin,pbm_theta(:,1), 'r');
title('Theta - Comparativo');
%legend('string1','string2');

axes(handles.graf_dtheta);
plot(pbm_tlin,pbm_theta(:,3), 'b');
title('Theta 2');

axes(handles.graf_energ);

% Cálculo de algumas variáveis

Ec1= (pbm1_m1*pbm1_l1*pbm1_l1*(pbm_theta(:,2).*pbm_theta(:,2)))/2;
Ep1= -g*pbm1_l1*pbm1_m1*(cos(pbm_theta(:,1)));

x2= pbm1_l1*sin(pbm_theta(:,1)) + pbm1_l2*sin(pbm_theta(:,3));
y2= -pbm1_l1*(cos(pbm_theta(:,1)))-pbm1_l2*(cos(pbm_theta(:,3)));

dx2=pbm1_l1*cos(pbm_theta(:,1)).*pbm_theta(:,2)+pbm1_l2*cos(pbm_theta(:,3)).*
pbm_theta(:,4);
dy2=-pbm1_l1*sin(pbm_theta(:,1)).*pbm_theta(:,2)-
pbm1_l2*sin(pbm_theta(:,3)).*pbm_theta(:,4);

Ep2= g*pbm1_m2*(y2);
Ec2= ((dx2.*dx2+dy2.*dy2)*pbm1_m2)/2;

%Ep2 = g*pbm1_m2*((pbm1_l1*(1-cos(pbm_theta(:,1)))) + ((pbm1_l2)*(1-
cos(pbm_theta(:,3)))));
%Ec2 = (pbm1_l1*pbm1_l1*pbm_theta(:,2).*pbm_theta(:,2)+
pbm1_l2*pbm1_l2*pbm_theta(:,4).*pbm_theta(:,4)+
2*pbm1_l1*pbm1_l2*cos(pbm_theta(:,1))-
pbm_theta(:,3)).*(pbm_theta(:,2).*pbm_theta(:,4)))*pbm1_m2/2;

```

```

Ecol= (pbo1_m1*pbo1_l1*pbo1_l1*(pbo_theta(:,2).*pbo_theta(:,2)))/2;
Epo1= g*pbo1_l1*pbo1_m1*(1-cos(pbo_theta(:,1)));

Etotal=Ec2+Ep2+((pbm1_l1+pbm1_l2)*g*pbm1_m2)+Ep1+Ec1+pbm1_l1*g*pbm1_m1;
%Ep1+Ec1+pbm1_l1*g*pbm1_m1
plot(pbm_tlin,[Ec2+Ep2+((pbm1_l1+pbm1_l2)*g*pbm1_m2)+Ep1+Ec1+pbm1_l1*g*pbm1_m
1]);
title('Energia Total');
axis([0 Tspan 0 max(Etotal)*1.1])

%ylim([0 Etotal(1)*1.1])
% Animação do Personal Basket Original
intervalo=0.01;
velocidade=0.01;

frame = 50; % %0 quadros por segundo
t0=pbm_tlin(1,1);
Vel= 5;

%Temporário
%pbm_theta=[ pbo_theta pbo_theta];

axes(handles.graf_pbol)
axis([-1*11 1*11 -1.5*11 0.5*11])
hold on

pbo_cabo_x =[0 11*sin(pbo_theta(1,1))];
pbo_cabo_y =[0 -11*cos(pbo_theta(1,1))];
pbo_cesta_x = pbo_cabo_x(2);
pbo_cesta_y = pbo_cabo_y(2);
h_pbo_cabo = plot(pbo_cabo_x,pbo_cabo_y,'Color','k','LineWidth', 1);
h_pbo_cesta = plot(pbo_cesta_x,pbo_cesta_y,'--
o','MarkerEdgeColor','r','MarkerFaceColor',...
'r','MarkerSize',10);

axes(handles.graf_pbm1)
axis([-1*11 1*11 -1.5*11 0.5*11])
hold on

pbm_cabo_x =[0 11*sin(pbm_theta(1,1))];
pbm_cabo_y =[0 -11*cos(pbm_theta(1,1))];
pbm_cesta_x = pbm_cabo_x(2);
pbm_cesta_y = pbm_cabo_y(2);
pbm_cabopeso_x =[11*sin(pbm_theta(1,1))
11*sin(pbo_theta(1,1))+12*sin(pbm_theta(1,3))];
pbm_cabopeso_y =[-11*cos(pbm_theta(1,1)) -11*cos(pbm_theta(1,1))-
12*cos(pbm_theta(1,3))];
pbm_peso_x = pbm_cabopeso_x(2);

```

```

pbm_peso_y = pbm_cabopeso_y(2);

h_pbm_cabo = plot(pbm_cabo_x,pbm_cabo_y,'Color','k','LineWidth', 1);
h_pbm_cesta = plot(pbm_cesta_x ,pbm_cesta_y , '--
o','MarkerEdgeColor','r','MarkerFaceColor', 'r','MarkerSize',10);
h_pbm_peso = plot(pbm_peso_x,pbm_peso_y,'--
o','MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
h_pbm_cabopeso = plot(pbm_cabopeso_x,pbm_cabopeso_y,'Color','k','LineWidth',
1);

count_pbo_tlin = 1;
count_pbm_tlin = 1;

finalizar = false;
tlin = (0:0.01:Tspan)';

for count= 1:1:length(tlin)

    if finalizar
        break
    end

    if tlin(count)>=pbo_tlin(count_pbo_tlin)

        if length(pbo_tlin)>=count_pbo_tlin+1
            while tlin(count)>= pbo_tlin(count_pbo_tlin + 1)
                count_pbo_tlin = count_pbo_tlin+1;
            end
        end

        axes(handles.graf_pbol)

        pbo_cabo_x(2)= 11*sin(pbo_theta(count_pbo_tlin,1));
        pbo_cabo_y(2)= -11*cos(pbo_theta(count_pbo_tlin,1));
        pbo_cesta_x(1)= pbo_cabo_x(2);
        pbo_cesta_y(1)= pbo_cabo_y(2);
        set (h_pbo_cabo,'XData',pbo_cabo_x)
        set (h_pbo_cabo,'YData',pbo_cabo_y)
        set (h_pbo_cesta,'XData',pbo_cesta_x)
        set (h_pbo_cesta,'YData',pbo_cesta_y)
        drawnow
        count_pbo_tlin = count_pbo_tlin+1;
    end

    if tlin(count)>=pbm_tlin(count_pbm_tlin)

        if length(pbm_tlin)>=count_pbm_tlin+1
            while tlin(count)>= pbm_tlin(count_pbm_tlin + 1)
                count_pbm_tlin = count_pbm_tlin+1;
            end
        end
    end
end

```

```

axes(handles.graf_pbml)

pbm_cabo_x(2) =l1*sin(pbm_theta(count_pbm_tlin,1));
pbm_cabo_y(2) =-l1*cos(pbm_theta(count_pbm_tlin,1));
pbm_cesta_x(1) = pbm_cabo_x(2);
pbm_cesta_y(1) = pbm_cabo_y(2);
pbm_cabopeso_x =[l1*sin(pbm_theta(count_pbm_tlin,1))
l1*sin(pbm_theta(count_pbm_tlin,1))+l2*sin(pbm_theta(count_pbm_tlin,3))];
pbm_cabopeso_y =[-l1*cos(pbm_theta(count_pbm_tlin,1)) -
l1*cos(pbm_theta(count_pbm_tlin,1))-l2*cos(pbm_theta(count_pbm_tlin,3))];
pbm_peso_x(1) = pbm_cabopeso_x(2);
pbm_peso_y(1) = pbm_cabopeso_y(2);

set (h_pbm_cabo, 'XData',pbm_cabo_x)
set (h_pbm_cabo, 'YData',pbm_cabo_y)
set (h_pbm_cesta, 'XData',pbm_cesta_x)
set (h_pbm_cesta, 'YData',pbm_cesta_y)
set (h_pbm_cabopeso, 'XData',pbm_cabopeso_x)
set (h_pbm_cabopeso, 'YData',pbm_cabopeso_y)
set (h_pbm_peso, 'XData',pbm_peso_x)
set (h_pbm_peso, 'YData',pbm_peso_y)
drawnow
count_pbm_tlin = count_pbm_tlin+1;
end

%pause((tlin(count,1)-t0)/2^Vel)
t0=tlin(count,1);

end
delete(h_pbo_cabo)
delete(h_pbo_cesta)
delete(h_pbm_cabo)
delete(h_pbm_cesta)
delete(h_pbm_cabopeso)
delete(h_pbm_peso)
set(handles.btn_Play, 'Enable', 'on')
set(handles.btn_Stop, 'Enable', 'off')

% --- Funções Estruturais

function Tspan_Callback(hObject, eventdata, handles)
function Tspan_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function pbo_peso_Callback(hObject, eventdata, handles)
function pbo_peso_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```

        set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function pbo_comp_Callback(hObject, eventdata, handles)
function pbo_comp_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function pbo_ka_Callback(hObject, eventdata, handles)
function pbo_ka_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function theta0_Callback(hObject, eventdata, handles)
function theta0_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function dtheta0_Callback(hObject, eventdata, handles)
function dtheta0_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function graf_pbo1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function pbm_PesoBasket_Callback(hObject, eventdata, handles)
function pbm_PesoBasket_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function pbm_CaboPesoMorto_Callback(hObject, eventdata, handles)
function pbm_CaboPesoMorto_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function pbm_PesoMorto_Callback(hObject, eventdata, handles)
function pbm_PesoMorto_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

```

```
function pbm_ka2_Callback(hObject, eventdata, handles)
function pbm_ka2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executa quando o botão Finalizar é acionado.
function btn_Stop_Callback(hObject, eventdata, handles)
global finalizar
finalizar= true;
set(handles.btn_Play,'Enable','on')
set(handles.btn_Stop,'Enable','off')
```

7.2. pbm1_init.m

```
function pbm1_init()

% init_pbm1 - função de inicialização de parâmetros da Personal Basket
% Modificada (Modelo 1) - Peso Morto Acoplado
%
% Parâmetros Inicializados:
%     g   : constante da gravidade - [m/s^2]
%     m_b : Massa da personnel basket somada ao peso das pessoas sobre a
%     mesma. - [Kg]
%     m_sa: Massa do sistema de amortecimento acoplado a personnel
%     basket.[Kg]
%     h_c : Comprimento do cabo de apoio a personnel basket.[m]
%     h_sa: Comprimento do cabo do sistema de amortecimento da personnel
%     basket.[m]
%     a_b : Constante de atrito sobre a junta Theta_b. [1/s]
%     a_sa: Constante de atrito sobre a junta Theta_sa. [1/s]

global g m_b m_sa h_c h_sa a_b a_sa

% Constatantes físicas
g = 9.80665;

% Constantes do modelo
m_b=500;
h_c=50;
a_b = 0;

m_sa=50;
h_sa=5;
a_sa = 0;
end
```

7.3. pbm1.m

```
function [dx] = pbm1(t,x)

% pbm1 = Personal Basket Modificada (Modelo 1) - Peso Morto Acoplado
% A função pbm1 possui as seguintes variáveis entrada:
% -> t : variável tempo
% -> x : vetor de coordenadas    x(1) = Theta_b (posição)
%                                x(2) = dTheta_b (velocidade)
%                                x(3) = Theta_sa (posição)
%                                x(4) = dTheta_sa (velocidade)
% Variável de saída:
% -> dx : derivada do vetor x - dx(1) = dTheta_b (velocidade)
%                                dx(2) = ddTheta_b (aceleração)
%                                dx(3) = dTheta_sa (velocidade)
%                                dx(4) = ddTheta_sa (aceleração)

% --- Inicialização dos parâmetros globais--- %
global g m_b h_c a_b m_sa h_sa a_sa

% --- Equações de Movimento --- %

A = (m_b+m_sa)*h_c*h_c;
B = m_sa*h_sa*h_c*cos(x(1)-x(3));
C = -m_sa*h_sa*h_c*x(4)*x(4)*sin(x(1)-x(3))-h_c*(m_b+m_sa)*g*sin(x(1))-
a_b*x(2);

D = m_sa*h_c*h_sa*cos(x(1)-x(3));
E = m_sa*h_sa*h_sa;
F = -m_sa*h_sa*g*sin(x(3))+ m_sa*h_c*h_sa*x(2)*x(2)*sin(x(1)-x(3))-a_sa*x(4);

% Resolução do sistema de variáveis para encontrar as variáveis ddTheta_b e
% ddTheta_sa explicitamente : ddtheta(1) = ddTheta_b
%                               ddtheta(2) = ddTheta_sa

ddtheta = inv([A B ; D E])*[C;F];

dx(1) = x(2);
dx(2) = ddtheta(1);
dx(3) = x(4);
dx(4) = ddtheta(2);

dx=dx';

end
```

7.4. pmb1_simul.m

```
function [tlin xlin] = pmb1_simul(Tspan,theta0)
% pmb1_simul = Função de simulação da Personnel Basket Modificada (Modelo 1)
- Peso Morto Acoplado
% A função pmb1_simul possui as seguintes variáveis entrada:
% -> Tspan : Intervalo de tempo de simulação.
% -> theta0 : condições iniciais do sistema - em graus:
%
%             theta0(1) = Theta_b (posição)
%             theta0(2) = dTheta_b (velocidade)
%             theta0(3) = Theta_sa (posição)
%             theta0(4) = dTheta_sa (velocidade)
% Variáveis de saída:
% -> tlin: tempos nos quais as equações foram avaliadas.
% -> xlin : vetor de variáveis do sistema no tempo
%
%             xlin(:,1) = Theta_b (posição)
%             xlin(:,2) = dTheta_b (velocidade)
%             xlin(:,3) = Theta_sa (posição)
%             xlin(:,4) = dTheta_sa (velocidade)

%Resolução das variáveis pelo ODE45
TSPAN=[0 Tspan];
xo=[theta0(1)*pi/180 theta0(2)*pi/180 theta0(3)*pi/180 theta0(4)*pi/180]';
%[theta1 dtheta1 theta2 dtheta2]
options = odeset('RelTol',1e-6);

[tlin,xlin]=ode45('pmb1',TSPAN,xo,options);

end
```

7.5. pmb1_graficos.m

```
%pmb1_graficos.m
%Este código é responsável pela geração de gráficos comparativos com a
%iteração das seguintes variáveis:
%   - a_sa : Atrito na junta Theta_sa
%   - m_sa : Massa do peso morto acoplado
%   - h_sa : Dimensão do cabo acoplador do peso morto

%--- Inicialização das Variáveis --- %
pmb1_init
Tspan = 300;
tempgraf=[];
leg=[];

%--- Condições Iniciais do Sistema --- %

theta_b = 10;
dtheta_b = 0;
theta_sa = 0;
dtheta_sa = 0;

theta_init=[theta_b dtheta_b theta_sa dtheta_sa];

global m_b h_c a_b m_sa h_sa a_sa g

%--- Intervalos de Iteração das variáveis de análise. ---%
% i   : Inicial
% int : Iteração
% f   : Final

a_sa_i= 0 ;
a_sa_int= 1000;
a_sa_f= 50000;

m_sa_i= 50 ;
m_sa_int= 50;
m_sa_f= 200;

h_sa_i= 1 ;
h_sa_int= 2;
h_sa_f= 7;

Grafx=(a_sa_i:a_sa_int:a_sa_f)';
Grafy=[];

%--- Loops para composição de gráficos --- %

for l2=h_sa_i:h_sa_int:h_sa_f
```

```

%Criação de novo gráfico a cada iteração de h_sa
figure
for m2=m_sa_i:m_sa_int:m_sa_f

    %Criação de nova curva a cada iteração de m_sa

    for ka2=a_sa_i:a_sa_int:a_sa_f

        % Atribuição de Variáveis
        a_sa = ka2;
        m_sa = m2;
        h_sa= l2;

        %Equações de movimento do sistema
        [tlin theta] = pbml_simul(Tspan,theta_init);

        %Energia cinética do sistema.
        Ec1= (m_b*h_c*h_c*(theta(:,2).*theta(:,2)))/2;
        Ep1= -g*h_c*m_b*(cos(theta(:,1)));

        x2= h_c*sin(theta(:,1)) + h_sa*sin(theta(:,3));
        y2= -h_c*(cos(theta(:,1)))-h_sa*(cos(theta(:,3)));

dx2=h_c*cos(theta(:,1)).*theta(:,2)+h_sa*cos(theta(:,3)).*theta(:,4);
        dy2=-h_c*sin(theta(:,1)).*theta(:,2)-
h_sa*sin(theta(:,3)).*theta(:,4);

        Ep2= g*m_sa*(y2);
        Ec2= ((dx2.*dx2+dy2.*dy2)*m_sa)/2;

        Etotal=Ec2+Ep2+((h_c+h_sa)*g*m_sa)+Ep1+Ec1+h_c*g*m_b;

        ka2
        E_0=Etotal(1);
        E_f=Etotal(length(Etotal));

        % Índice final de Energia após o tempo de simulação

        E_perc=E_f/E_0;
        tempgraf=[tempgraf;E_perc];

    end
    m2
    Grafy=[Grafy tempgraf];
    leg=[leg m2];
    tempgraf=[];

end
%--- Formatação e ajustes finais do gráfico ---%

```

```

plot(Grafx,Grafy(:, 1), '-k*');
ylim([0 1]);
hold on
plot(Grafx,Grafy(:, 2), '-ro');
ylim([0 1]);
plot(Grafx,Grafy(:, 3), '-b+');
ylim([0 1]);
plot(Grafx,Grafy(:, 4), '-gx');
ylim([0 1]);
hold off
title(strcat(strcat('Comparativo de Amortecimento | L2=' ,
num2str(h_sa)), ' m'));
xlabel('Coeficiente de Atrito Theta2 (Ka2)')
ylabel('Energia % (E_final / E_inicial)')
legend(strcat(' ',strcat(num2str(leg(1)), '
Kg')),strcat(' ',strcat(num2str(leg(2)), ' Kg')),...
strcat(' ',strcat(num2str(leg(3)), '
Kg')),strcat(' ',strcat(num2str(leg(4)), ' Kg')));
Grafy=[];

end

```