



PNV3314 – Dinâmica de Sistemas I

Professor: Gustavo Roque da Silva Assi

Relatório da Simulação Lançamento do manifold

Aluno

Gustavo de Oliveira Nacif

Número USP

12702454

14/07/2023

São Paulo

RESUMO

O presente relatório apresenta uma análise detalhada da simulação da manobra de lançamento do manifold, considerando diferentes aspectos relacionados à ressonância e oscilação do sistema.

Na Parte 1, foram realizados cálculos preliminares para estimar a profundidade em que ocorre a ressonância entre a resposta do manifold e a excitação de ondas no casco. Foram calculadas a tensão estática no topo do cabo e a frequência natural do manifold em função do comprimento do cabo. Os resultados foram apresentados em gráficos, avaliando-se o risco de rompimento do cabo e identificando o comprimento crítico de ressonância.

Na Parte 2, foi realizada a simulação do lançamento do manifold no domínio do tempo, utilizando um grau de liberdade com movimento vertical imposto na barcaça. Foram considerados elementos como massa, amortecimento, dissipação de arrasto e rigidez do sistema. As curvas de resposta do manifold em função do comprimento do cabo foram obtidas e comparadas com os cálculos preliminares de ressonância.

Na Parte 3, a simulação foi aprimorada, considerando dois graus de liberdade e incluindo a resposta de oscilação do PSV. Foram considerados fatores como massa, rigidez, amortecimento, dissipação de arrasto e restauração hidrostática. As curvas de resposta do manifold, do PSV e de tensão no topo do cabo foram plotadas em função do comprimento do cabo e dos períodos de onda.

O relatório apresenta diagramas de blocos, memórias de cálculo e interpretações dos resultados obtidos em cada etapa. Os cálculos preliminares, simulações e análises realizadas fornecem um entendimento aprofundado sobre as características de ressonância e oscilação do sistema de lançamento do manifold.

Palavras-chave: Manobra de lançamento, ressonância, oscilação, simulação, manifold.

ABSTRACT

This report presents a detailed analysis of the simulation of the manifold launching maneuver, considering different aspects related to the resonance and oscillation of the system.

In Part 1, preliminary calculations were performed to estimate the depth at which resonance occurs between the manifold response and the hull wave excitation. The static tension at the top of the cable and the natural frequency of the manifold were calculated as a function of cable length. The results were presented in graphs, evaluating the risk of cable breakage and identifying the critical length of resonance.

In Part 2, the simulation of the launch of the manifold in the time domain was carried out, using a degree of freedom with vertical movement imposed on the barge. Elements such as mass, damping, drag dissipation and system stiffness were considered. Manifold response curves as a function of cable length were obtained and compared with preliminary resonance calculations.

In Part 3, the simulation was improved, considering two degrees of freedom and including the PSV oscillation response. Factors such as mass, stiffness, damping, drag dissipation and hydrostatic restoration were considered. The manifold, PSV and cable top voltage response curves were plotted as a function of cable length and wave periods.

The report presents block diagrams, calculation memories and interpretations of the results obtained in each step. Preliminary calculations, simulations and analyzes performed provide an in-depth understanding of the resonance and oscillation characteristics of the manifold launching system.

Keywords: Launching maneuver, resonance, oscillation, simulation, manifold.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do sistema em ar.	09
Figura 2 – Representação do sistema em água	11
Figura 3 – Gráfico da tensão estática no topo	13
Figura 4 – Gráfico da frequência x comprimento do cabo.	14
Figura 5 – Métodos alternativos para a descida do manifold.	16
Figura 6 – Representação esquemática da simulação com um grau de liberdade	17
Figura 7 – Simulação com um grau de liberdade em diagrama de blocos	18
Figura 8 – Gráfico de X/Y em função do comprimento do cabo.	19
Figura 9 – Picos de ressonância ao longo do comprimento do cabo	19
Figura 10 – Pontos de ressonância obtidos a partir da planilha.	20
Figura 11 – Representação esquemática do sistema com dois graus de liberdade.	22
Figura 12 – Representação da simulação com dois graus de liberdade em diagrama de blocos	23
Figura 13 – Gráfico de X em função do comprimento do cabo	24
Figura 14 – Gráfico de Y em função do comprimento do cabo.	24
Figura 15 – Gráfico de X/Y em função do comprimento do cabo.	25
Figura 16 – Gráfico do deslocamento relativo em função do comprimento do cabo.	25
Figura 17 – Gráfico da tração em função do comprimento do cabo.	26
Figura 18 – Gráfico da tensão dinâmica em função do comprimento do cabo.	26
Figura 19 – Gráfico da tensão total em função do comprimento do cabo	27
Figura 20 – Intervalo de tensão de ruptura.	27
Figura 21 – Picos de ressonância para dois graus de liberdade.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados para a simulação.	08
Tabela 2 – Carga e tensão em função do comprimento do cabo e em ar.	12
Tabela 3 – Frequência natural em função do comprimento do cabo.	13
Tabela 4 – Comparação entre os períodos de ressonância.	29

LISTA DE SÍMBOLOS

T	Período (s)
Y	Amplitude do movimento em heave (m)
ρ	Massa específica (kg/m ³)
C _a	Coeficiente de massa adicional
C _D	Coeficiente de arrasto
V	Volume submerso (m ³)
L	Comprimento (m)
B	Boca (m)
H	Calado (m)
D	Diâmetro (m)
E	Constante elástica do material (Pa)
$\frac{\Delta U}{U}$	Fator de histerese
A	Área do cabo (m ²)
g	Gravidade (m/s ²)
σ	Tensão (Pa)
f	Frequência (Hz)
l	Comprimento do cabo (m)

SUMÁRIO

1. DADOS PARA SIMULAÇÃO.....	08
2. PARTE UM.....	09
2.1. Em ar.....	09
2.2. Em água.....	10
2.3. Interpretação dos resultados obtidos.....	14
3. PARTE DOIS.....	17
3.1. Modelagem do problema.....	17
3.2. Interpretação dos resultados obtidos.....	19
4. PARTE TRÊS.....	22
4.1. Modelagem do problema.....	22
4.2. Interpretação dos resultados obtidos.....	27
5. CONCLUSÃO.....	31
REFERÊNCIAS.....	32

1. DADOS PARA SIMULAÇÃO

Para a realização das etapas subsequentes foram considerados a massa estrutural, adicional e participativa do cabo, o amortecimento histerético do cabo, amortecimento hidrodinâmico de arrasto e o movimento de heave imposto no navio e foram utilizados os seguintes dados para a simulação do problema:

Tabela 1: Dados para a simulação

Condições do mar	
T (s)	7
Y (m)	2
Profundidade (m)	3000
massa específica (kg/m ³)	1030

Dados do manifold	
m (kg)	100000
Ca	0,8
Cd	1,2
Deslocamento (m ³)	50
L (m)	8
B (m)	5
H (m)	4

Dados do cabo de aço	
d (m)	0,04
massa específica (kg/m ³)	7860
E (GPa)	150
Tensão de ruptura (GPa)	1,2
Fator de histerese	0,2
Area (m ²)	0,001256637

Gravidade	
g (m/s ²)	9,8

Amortecimentos	
Zeta cte	0,5
C cte	100000

Fonte: Autoria própria

2. PARTE UM

Antes da simulação completa do lançamento, é necessário realizar cálculos preliminares para estimar a profundidade em que poderá haver ressonância entre a reposta do manifold e a excitação de ondas no casco. Portanto, para o cálculo desta etapa foi utilizado uma planilha para calcular a carga, tensão no topo do cabo e também a frequência natural em ar e em água respeitando as seguintes equações:

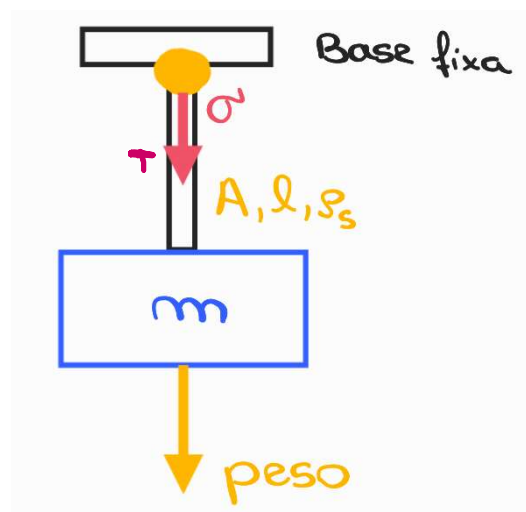
2.1 EM AR

Para o cálculo da tração e tensão no topo do cabo foi considerado apenas a força peso resultante do manifold (constante para qualquer comprimento do cabo) e também do cabo (variável conforme a descida do manifold). A equação (I) representa o cálculo da tração em função do comprimento “c” do cabo e a equação (II) representa a tensão no topo em função do comprimento “c”.

Em relação a frequência natural do sistema, foram calculados a frequência com apenas a massa do manifold e outra considerando a massa do manifold e também do cabo. Essas situações estão representadas pelas equações (III) e (IV), respectivamente.

Segue abaixo uma representação esquemática do sistema e as equações mencionadas.

Figura 01 – Representação do sistema em ar



Fonte: Autoria própria

$$Carga\ em\ ar\ (c) = m_{manifold} \cdot g + A \cdot l(c) \cdot \rho_{aço} \cdot g \quad (I)$$

$$\sigma = \frac{Carga\ em\ ar\ (c)}{A} \quad (II)$$

$$frequência\ natural\ em\ ar\ sem\ massa\ do\ cabo\ (c) = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot E}{l(c) \cdot m_{manifold}}} \quad (III)$$

$$frequência\ natural\ em\ ar\ sem\ massa\ do\ cabo\ (c) = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot E}{l(c) \cdot (m_{manifold} + \frac{\rho_{aço} \cdot A \cdot l(c)}{3})}} \quad (IV)$$

2.2 EM ÁGUA

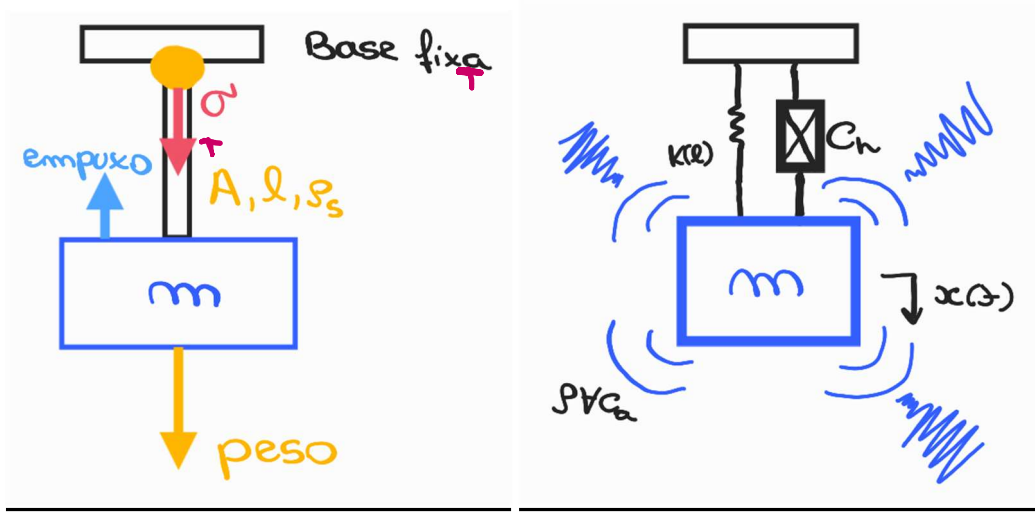
Ao colocar o problema em água, acrescentam-se novas complicações ao sistema. No quesito relacionado a carga e tensão no topo do cabo, deve ser considerado a parcela do empuxo no sistema. O empuxo do manifold será sempre constante, uma vez que ele estará sempre submerso na água, mas o empuxo do cabo será variável uma vez que ao longo da simulação o volume submerso do cabo aumentará, gerando cada vez mais empuxo. O cálculo do empuxo no cabo, no manifold, a tração e a tensão no topo do cabo podem ser calculadas pelas equações (V), (VI), (VII) e (VIII), respectivamente.

Em relação a frequência natural, adiciona-se a massa adicional de água na formulação do problema. Primeiramente, pode-se calcular a frequência natural do sistema em água sem amortecimento considerando apenas a massa do manifold ou considerando a massa do manifold mais a massa variável do cabo, conforme ilustrado pelas equações (IX) e (X), respectivamente.

Para analisar a frequência natural do sistema com amortecimento, foram feitos os cálculos preliminares com três tipos de amortecimento: utilizando ‘zeta’ constante, utilizando ‘C’ constante e utilizando ‘ $C_{histerético}$ ’ constante, calculados conforme ilustrado nas equações (XI), (XII) e (XIII), respectivamente.

Segue abaixo uma representação esquemática do sistema e as equações mencionadas.

Figura 02 – Representação do sistema em água



Fonte: Autoria própria

$$\text{Empuxo no cabo } (c) = \rho_{\text{água}} \cdot A \cdot l(c) \cdot g \quad (\text{V})$$

$$\text{Empuxo no manifold} = \rho_{\text{água}} \cdot V \cdot g \quad (\text{VI})$$

$$\text{Carga } (c) = m_{\text{manifold}} \cdot g + \rho_{\text{aço}} \cdot g \cdot A \cdot l(c) - \text{Empuxo}_{\text{manifold}} - \text{Empuxo}_{\text{cabo}}(c) \quad (\text{VII})$$

$$\text{Tensão em água } (c) = \frac{\text{Carga em água } (c)}{A} \quad (\text{VIII})$$

$$f.n. \text{ sem massa do cabo } (c) = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k(c)}{m_{\text{manifold}} + \rho_{\text{água}} \cdot C_a \cdot V}} \quad (\text{IX})$$

$$f.n. \text{ com massa do cabo } (c) = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k(c)}{m_{\text{manifold}} + \rho_{\text{água}} \cdot C_a \cdot V + \frac{\rho_{\text{aço}} \cdot A \cdot l(c)}{3}}} \quad (\text{X})$$

$$f.n. \text{ amortecido zeta } cte(c) = f.n. \text{ com massa do cabo} \cdot \sqrt{1 - (\text{zeta } cte)^2} \quad (\text{XI})$$

$$f.n. \text{ amortecido } C \text{ cte}(c) = f.n. \text{ com massa do cabo} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{C}{C_{\text{crit}}(c)}\right)^2} \quad (\text{XII})$$

$$f.n. \text{ amortecido } C_h \text{ cte}(c) = f.n. \text{ com massa do cabo} \cdot \sqrt{1 - \text{zeta}(c)^2} \quad (\text{XIII})$$

Onde:

$$A = \frac{\pi \cdot \text{Diâmetro}^2_{\text{cabo}}}{4} \quad (\text{XIV})$$

$$C_{crit}(c) = 4\pi \cdot (m_{\text{manifold}} + \frac{\rho_{\text{aço}} \cdot A \cdot l(c)}{3} + \rho_{\text{água}} \cdot Ca \cdot \forall) \cdot f_{\text{com massa do cabo}}(c) \quad (\text{XV})$$

$$C_h(c) = \frac{\text{fator de histerese} \cdot k(c) \cdot T}{4\pi^2} \quad (\text{XVI})$$

$$\text{Zeta}(c) = \frac{C_h(c)}{C_{crit}(c)} \quad (\text{XVII})$$

$$k(c) = \frac{A \cdot E}{l(c)} \quad (\text{XVIII})$$

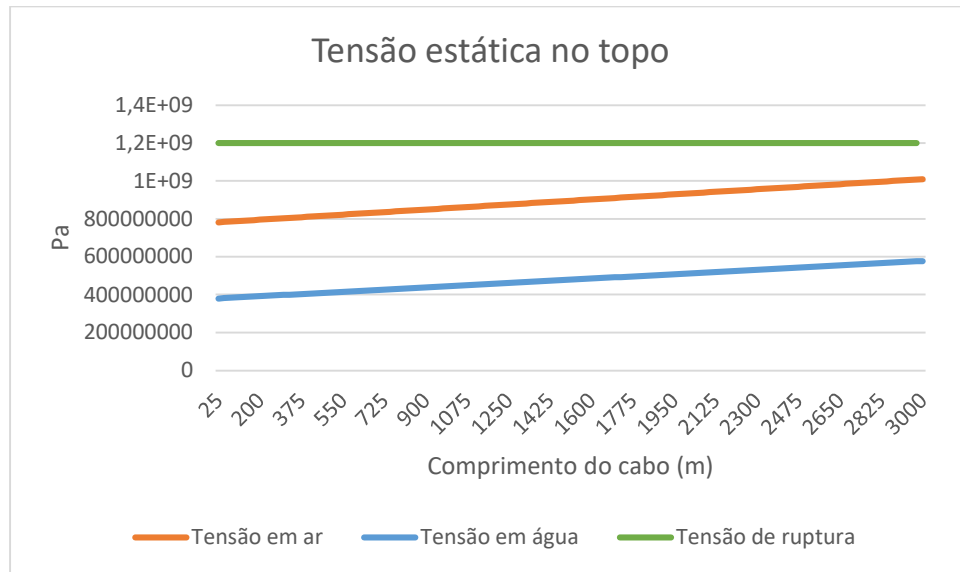
Obtendo as seguintes tabelas e gráficos:

Tabela 2: Carga e tensão em função do comprimento do cabo e em ar

Comprimento do cabo (m)	Carga em ar (N)	Tensão em ar (Pa)	Empuxo no cabo (N)	Carga em água (N)	Tensão em água (Pa)
100	989679,624	787562021,2	1268,44945	483711,1745	384925122,3
200	999359,2479	795264821,2	2536,8989	492122,349	391618522,3
300	1009038,872	802967621,2	3805,348349	500533,5235	398311922,3
400	1018718,496	810670421,2	5073,797799	508944,698	405005322,3
500	1028398,12	818373221,2	6342,247249	517355,8725	411698722,3
600	1038077,744	826076021,2	7610,696699	525767,047	418392122,3
700	1047757,368	833778821,2	8879,146149	534178,2215	425085522,3
800	1057436,992	841481621,2	10147,5956	542589,3961	431778922,3
900	1067116,616	849184421,2	11416,04505	551000,5706	438472322,3
1000	1076796,24	856887221,2	12684,4945	559411,7451	445165722,3
1100	1086475,864	864590021,2	13952,94395	567822,9196	451859122,3
1200	1096155,487	872292821,2	15221,3934	576234,0941	458552522,3
1300	1105835,111	879995621,2	16489,84285	584645,2686	465245922,3
1400	1115514,735	887698421,2	17758,2923	593056,4431	471939322,3
1500	1125194,359	895401221,2	19026,74175	601467,6176	478632722,3
1600	1134873,983	903104021,2	20295,1912	609878,7921	485326122,3
1700	1144553,607	910806821,2	21563,64065	618289,9666	492019522,3
1800	1154233,231	918509621,2	22832,0901	626701,1411	498712922,3
1900	1163912,855	926212421,2	24100,53955	635112,3156	505406322,3
2000	1173592,479	933915221,2	25368,989	643523,4901	512099722,3
2100	1183272,103	941618021,2	26637,43845	651934,6646	518793122,3
2200	1192951,727	949320821,2	27905,8879	660345,8392	525486522,3
2300	1202631,351	957023621,2	29174,33735	668757,0137	532179922,3
2400	1212310,975	964726421,2	30442,7868	677168,1882	538873322,3
2500	1221990,599	972429221,2	31711,23625	685579,3627	545566722,3
2600	1231670,223	980132021,2	32979,6857	693990,5372	552260122,3
2700	1241349,847	987834821,2	34248,13514	702401,7117	558953522,3
2800	1251029,471	995537621,2	35516,58459	710812,8862	565646922,3
2900	1260709,095	1003240421	36785,03404	719224,0607	572340322,3
3000	1270388,719	1010943221	38053,48349	727635,2352	579033722,3

Fonte: Autoria própria

Figura 3: Gráfico da tensão estática no topo



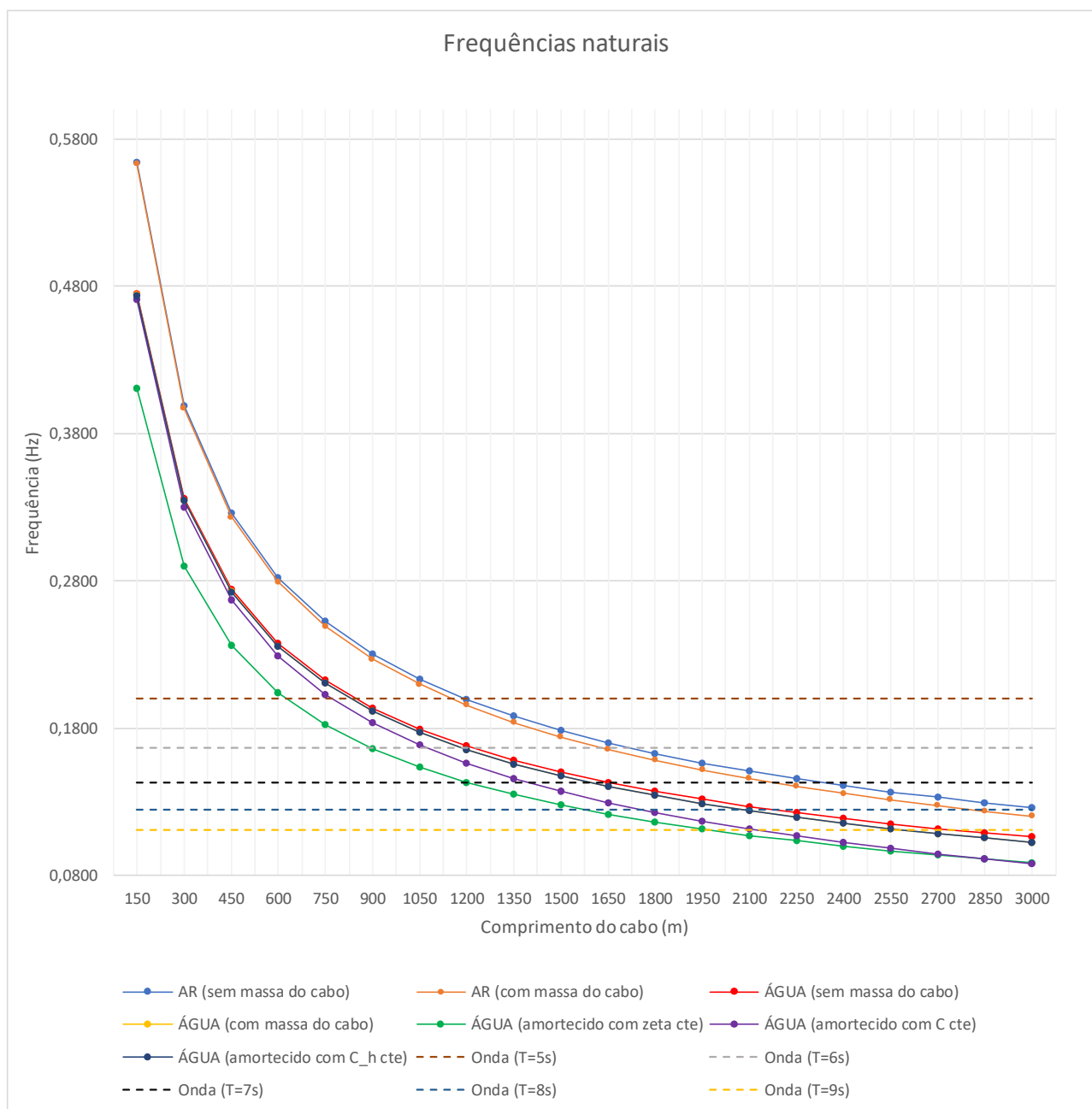
Fonte: Autoria própria

Tabela 3: Frequência natural em função do comprimento do cabo

CABO		FREQUÊNCIAS NATURAIS						
		AR		ÁGUA				
		f _n (Hz)	f _n (Hz)	f _n (Hz)	f _n (Hz)	f _n (Hz)	f _n (Hz)	f _n (Hz)
Comprimento do cabo (m)	k (N/m)	Sem massa do cabo	Com massa do cabo	Sem massa do cabo	Com massa do cabo	Amortecido (zeta cte)	Amortecido (c cte)	Amortecido (c _h cte)
150	1256637,061	0,564189584	0,562801574	0,474796726	0,473968578	0,410468829	0,470629464	0,473307339
300	628318,5307	0,39894228	0,396986547	0,335731984	0,33456386	0,289740802	0,329849554	0,334331375
450	418879,0205	0,325735008	0,32334849	0,274124017	0,272697081	0,236162599	0,266932755	0,272571203
600	314159,2654	0,282094792	0,279349107	0,237398363	0,235754947	0,204169773	0,229109613	0,235673615
750	251327,4123	0,252313252	0,249254607	0,212335551	0,210502901	0,18230086	0,203084939	0,210445006
900	209439,5102	0,230329433	0,226990942	0,193834952	0,191832553	0,166131864	0,18371917	0,191788738
1050	179519,5802	0,213243619	0,209650588	0,179456294	0,177299007	0,153545444	0,168548842	0,177264416
1200	157079,6327	0,19947114	0,195643765	0,167865992	0,165565656	0,143384064	0,156225217	0,165537488
1350	139626,3402	0,188063195	0,184018105	0,158265575	0,155831922	0,134954404	0,145939265	0,155808437
1500	125663,7061	0,178412412	0,174163629	0,150143908	0,147585135	0,127812476	0,13717214	0,147565184
1650	114239,7329	0,17010956	0,165669129	0,143156599	0,140479738	0,121659021	0,12957361	0,140462532
1800	104719,7551	0,162867504	0,158245926	0,137062009	0,134273183	0,116283987	0,12289748	0,134258158
1950	96664,38934	0,156478036	0,151684581	0,131684918	0,128789529	0,111535003	0,116964898	0,128776271
2100	89759,7901	0,150786009	0,145828941	0,126894763	0,12389762	0,107298487	0,111642337	0,123885817
2250	83775,8041	0,145673124	0,140559878	0,122591987	0,119497418	0,1034878	0,106827795	0,119486828
2400	78539,81634	0,141047396	0,135784707	0,118699181	0,115511102	0,100035548	0,102441805	0,115501536
2550	73919,82714	0,136836073	0,131430086	0,115155121	0,111877101	0,096888412	0,098421394	0,11186841
2700	69813,17008	0,13298076	0,127437108	0,111910661	0,108545976	0,094003573	0,094715919	0,108538039
2850	66138,79271	0,129433967	0,123757844	0,108925839	0,105477504	0,091346198	0,091284112	0,105470221
3000	62831,85307	0,126156626	0,120352839	0,106167775	0,102638583	0,088887621	0,088091954	0,102631873

Fonte: Autoria própria

Figura 4: Gráfico da frequência x comprimento do cabo



Fonte: Autoria própria

2.3 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Em relação a tensão no topo do cabo, o primeiro e mais evidente fato a ser analisado é que a tensão aumenta cada vez mais conforme o manifold desce, uma vez que haverá mais cabo no sistema e consequentemente haverá mais força peso atuando na tração do cabo.

Outro fator a ser ressaltado é que a tensão no cabo diminui quando imerso em água, uma vez que a atuação da força empuxo diminui a força resultante no topo do cabo tal que está no sentido contrário a força peso do manifold e do cabo.

Por fim, é importante mencionar que, segundo estes cálculos preliminares, o cabo não apresentará problemas de ruptura pois, conforme pode ser observado no gráfico, a tensão máxima atuante no sistema será sempre menor do que 1,2 GPa, que é a tensão de ruptura para o material do cabo utilizado nesta simulação.

Em relação às frequências naturais, pode-se afirmar que as frequências são maiores para as situações onde o meio ao qual está inserido é o ar e são menores para as situações as quais o meio inserido é a água e consideramos amortecimento no sistema.

Além disso, observa-se que a frequência natural para sistemas onde desprezamos a massa do cabo converge com a frequência natural para sistemas onde consideramos a massa do cabo para os comprimentos iniciais (até por volta dos 1000 metros), após isso a frequência diverge de maneira significativa para as duas simulações em ambos os meios (ar e água).

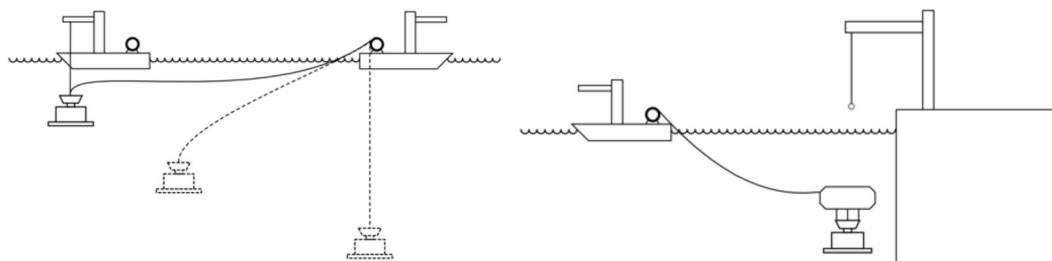
Para que não ocorra problemas de ressonância do sistema com o meio externo deve-se analisar como o manifold e os cabos se comportariam com algumas condições externas de onda. Para isso, como pode ser observado no gráfico 2, foram plotados curvas de frequência de onda, que no caso variam de 5 a 9 segundos. Com posse destes dados em mão, deve-se analisar o espectro do mar ao qual o manifold será colocado para que, se preciso, realizar manobras para “fugir” da ressonância do sistema com o meio externo. Os locais que ocorrem ressonância são observados facilmente a partir do cruzamento da curva da frequência natural do sistema manifold e da onda.

Por exemplo, para o caso da simulação do manifold imerso em água e considerando amortecimento histerético em um mar que possui ondas de período de 5 segundos, o sistema manifold entrará em ressonância com o meio externo quando o cabo estiver com comprimento de aproximadamente 825 metros.

Para evitar problemas dessa natureza, cabe ao engenheiro responsável pelo projeto definir uma estratégia para evitar que o sistema entre em ressonância. Essas soluções envolvem mudar a maneira

ao qual o manifold irá passar por esta seção, podendo fazer um lançamento pendular, utilizar uma bóia lastreável, etc.

Figura 5: Métodos alternativos para descida do manifold

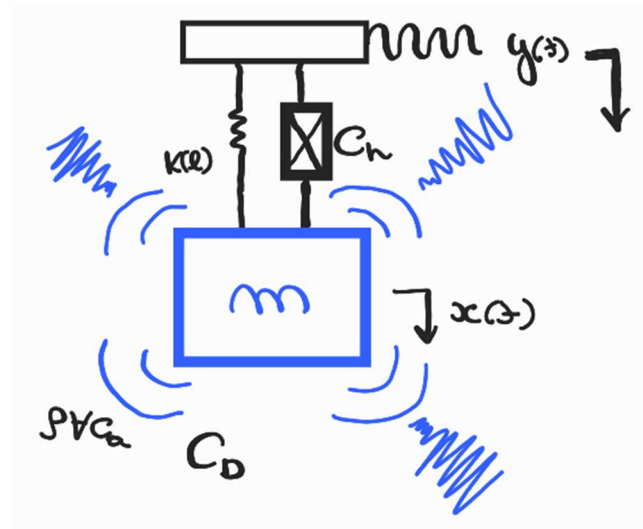


Fonte: Silva Assi, 2023

3. PARTE DOIS

Para esta etapa, foi implementado a simulação do manifold com um grau de liberdade na função XCOS, do Scilab. Para esta parte, foram considerados o amortecimento histerético do cabo, massa do corpo, massa adicional de água, dissipação por arrasto, rigidez do cabo, massa do cabo e também o movimento da base (navio), conforme pode ser observado na figura esquemática abaixo:

Figura 6: representação esquemática da simulação com um grau de liberdade



Fonte: Autoria própria

3.1 MODELAGEM DO PROBLEMA

O sistema acima descrito pode ser modelado da seguinte forma:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m_{e-a}} \cdot ((y - x) \cdot \text{rigidez} + (\dot{y} - \dot{x}) \cdot \text{amortecimento}_{\text{histerético}} - \dot{x} \cdot |\dot{x}| \cdot \text{amortecimento}_{\text{hidrodinâmico}} \quad (\text{XIX})$$

Onde:

$$m_{e-a} = m_{\text{manifold}} + C_a \cdot \rho_{\text{água}} \cdot V + \frac{A \cdot \rho_{\text{aço}} \cdot l}{3} \quad (\text{XX})$$

$$\text{amortecimento}_{\text{hidrodinâmico}} = \frac{C_D \cdot \rho_{\text{água}} \cdot L \cdot B}{2} \quad (\text{XXI})$$

$$\text{amortecimento}_{\text{histerético}} = \frac{\Delta U / U \cdot A \cdot E}{l \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f}$$

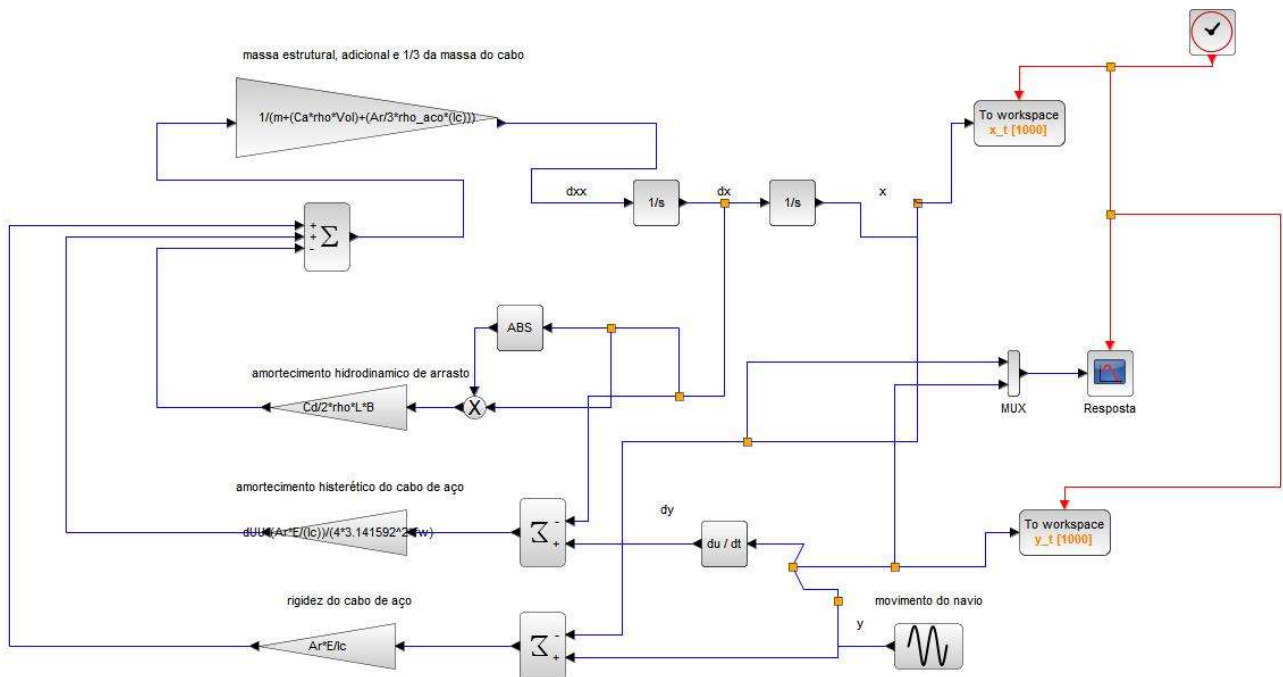
$$\text{rigidez} = \frac{A \cdot E}{l} \quad (\text{XXIII})$$

O centro de coordenada 'x' está no centro do manifold

O centro de coordenada 'y' está na base fixa (PSV)

A equação (XIX) pode ser representada pelo diagrama de blocos abaixo:

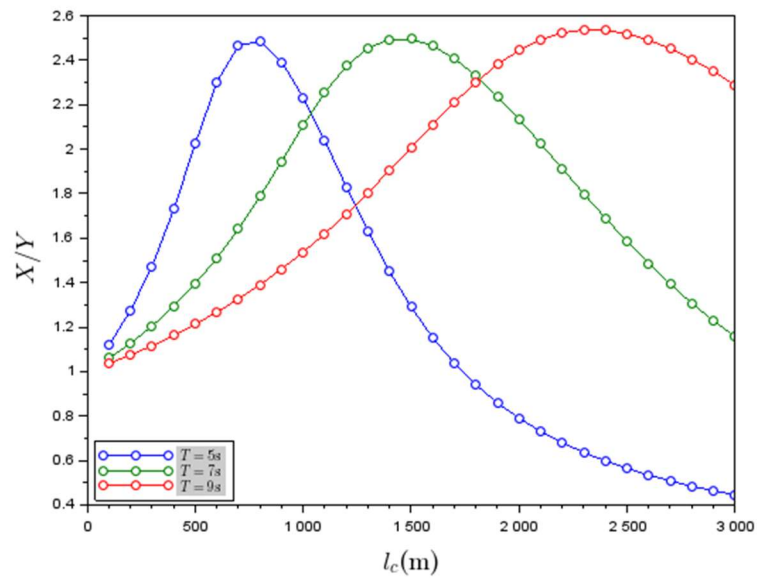
Figura 7: Simulação com um grau de liberdade em diagrama de blocos



Fonte: Autoria própria

Realizando uma simulação para períodos de onda de 5, 7 e 9 segundos, com integração numérica pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem e tempo final de simulação de 100 segundos obtemos o seguinte gráfico a respeito da amplitude X/Y em função do comprimento do cabo:

Figura 8: Gráfico de X/Y em função do comprimento do cabo

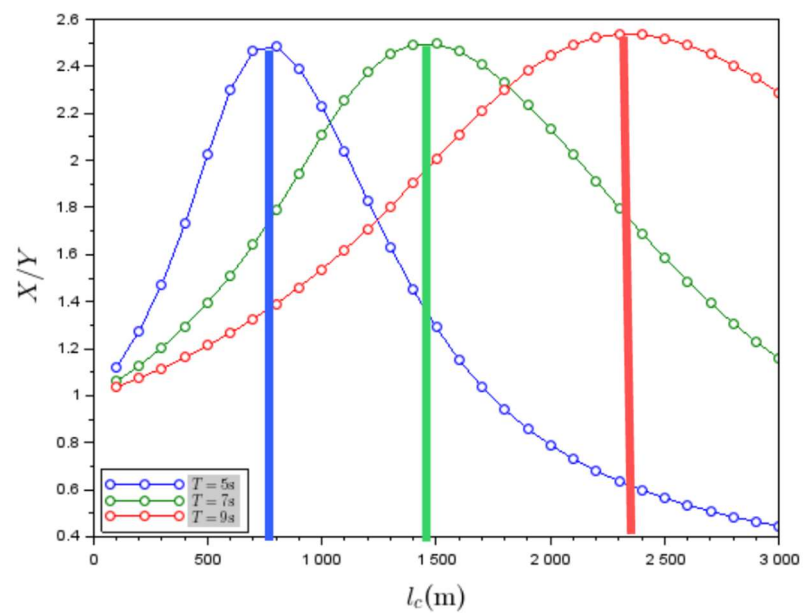


Fonte: Autoria própria

3.2 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Como pode ser observado a partir do gráfico 3, os picos de cada curva plotada representam aonde haverá ressonância, portanto:

Figura 9: Picos de ressonância ao longo do comprimento do cabo

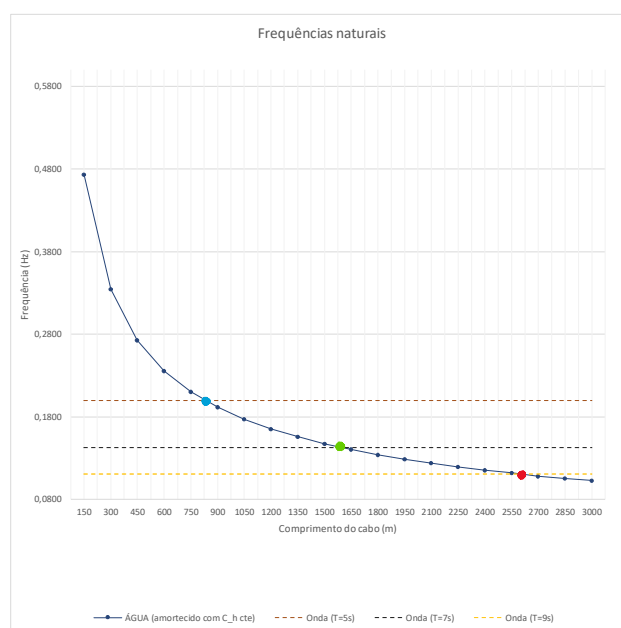


Fonte: Autoria própria

Dessa forma, percebemos que para uma onda com período de 5 segundos, o sistema entrará em ressonância quando o cabo estiver com 800 metros. Para uma onda de 7 segundos, o cabo estará com 1470 metros e para uma onda de 9 segundos estará com 2300 metros.

Comparando com os cálculos anteriores realizados na planilha, observamos que:

Figura 10 – Pontos de ressonância obtidos a partir da planilha



Fonte: Autoria própria

Para uma onda de período de 5, 7, 9 segundos, o cabo entrará em ressonância quando estiver com 825, 1550 e 2550 metros, respectivamente.

Apesar do fato da simulação dinâmica ser mais precisa que os cálculos preliminares realizados na planilha, uma vez que é possível adicionar os efeitos de arrasto e também de onda e observar os efeitos em “tempo real”, os resultados obtidos desta simulação são muito parecidos com os resultados obtidos na planilha. Isto mostra a importância dos cálculos preliminares pois, apesar de possuírem erros maiores que de outros métodos mais sofisticados, fornecem uma base muito boa para a verificação e entendimento do problema a ser estudado.

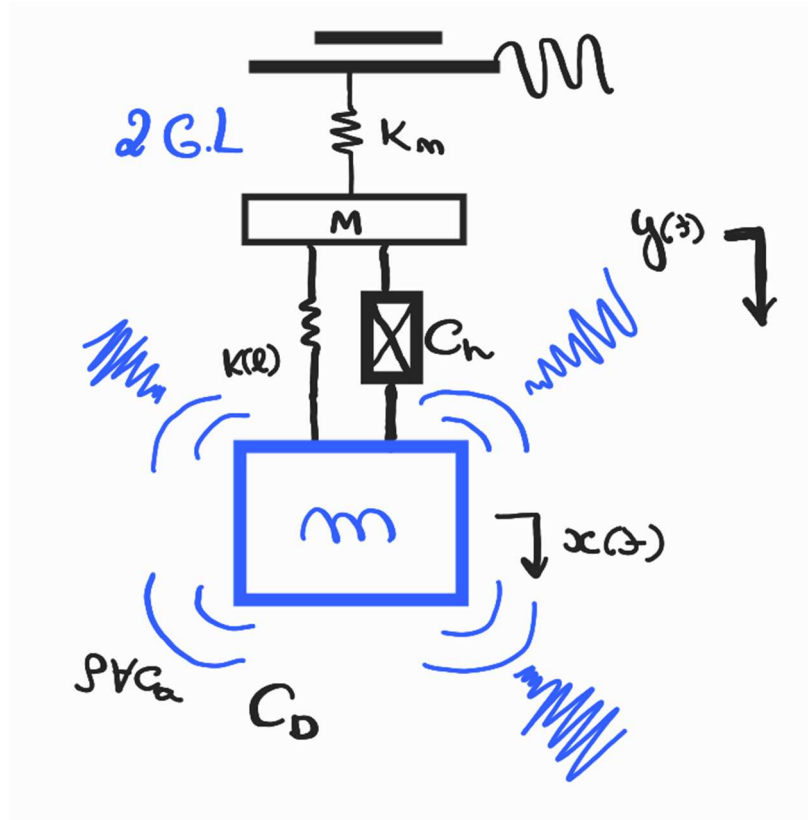
Portanto, pode-se afirmar que os resultados obtidos da simulação com um grau de liberdade estão de acordo com o esperado, afinal a diferença entre estes resultados e os resultados da planilha são

pequenos e também esperados uma vez que nesta segunda etapa foram utilizadas metodologias mais sofisticadas e adicionamos mais componentes da realidade para simular o problema do manifold.

4. PARTE 3

Para a terceira etapa, implementamos a simulação de descida do manifold em dois graus de liberdade no diagrama de blocos da função XCOS, do Scilab. Para esta simulação, foram considerados todos os efeitos mencionados na parte 2 do relatório, porém com dois graus de liberdade, ou seja, obtendo as respostas do manifold (X) e do PSV (Y) em função do comprimento do cabo, conforme pode ser observado na figura esquemática abaixo.

Figura 11: Representação esquemática do sistema com dois graus de liberdade



Fonte: Autoria própria

4.1 MODELAGEM DO PROBLEMA

De uma maneira análoga a modelagem apresentada no tópico 3.1, o sistema com dois graus de liberdade pode ser modelado a partir das seguintes equações:

$$\ddot{y} = \frac{1}{m_y} [-c_y(\dot{y} - \dot{x}) - k_y(y - x)] \quad (\text{XXIV})$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{m_x} [F_1 - c_x\dot{x} + c_y(\dot{y} - \dot{x}) - k_x x + k_y(y - x)] \quad (\text{XXV})$$

Onde:

$$m_x = m_{manifold} + C_a \cdot \rho_{\acute{a}gua} \cdot \nabla + \frac{A \cdot \rho_{a\grave{c}o} \cdot l}{3} \quad (XXVI)$$

$$m_y = M \cdot (1 + C_{33}) \quad (XXVII)$$

$$c_y = \frac{\Delta U / U \cdot A \cdot E}{4 \cdot \pi^2 \cdot l \cdot f} \quad (XXVIII)$$

$$c_x = \frac{C_D \cdot \rho_{\acute{a}gua} \cdot L \cdot B}{2} \quad (XXIX)$$

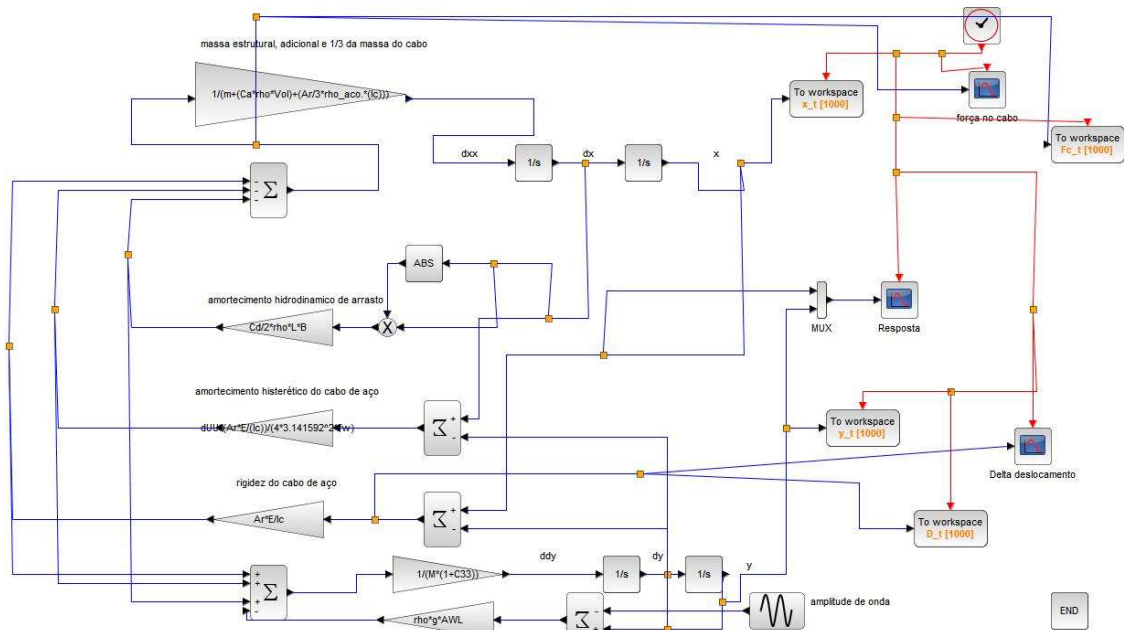
$$k_x = \rho_{\acute{a}gua} \cdot g \cdot AWL \quad (XXX)$$

$$k_x = \frac{A \cdot E}{l} \quad (XXXI)$$

A massa estrutural e adicional do manifold e do PSV, o amortecimento histerético do cabo de aço, amortecimento hidrodinâmico de arrasto, restauração hidrostática e a rigidez do cabo de aço são descritas pelas equações (XXVI), (XXVII), (XXVIII), (XXIX), (XXX) e (XXXI), respectivamente.

Podendo ser escrito em diagrama de blocos da seguinte maneira:

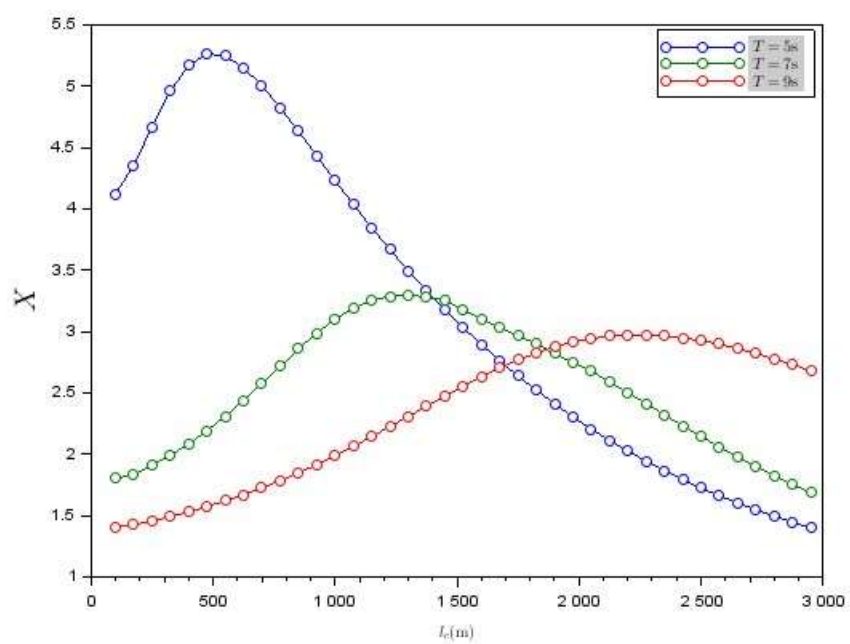
Figura 12: Representação da simulação com dois graus de liberdade em diagrama de blocos



Fonte: Autoria própria

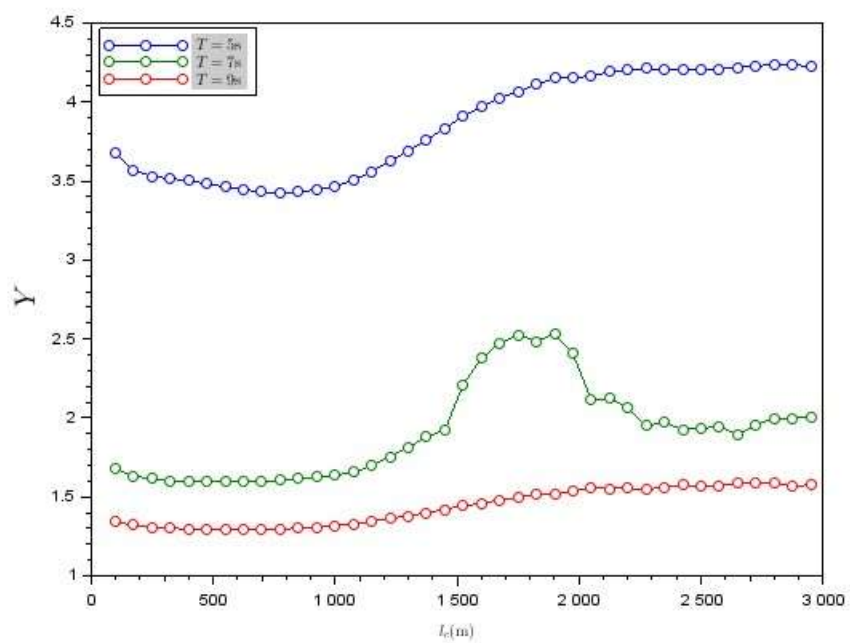
Realizando uma simulação para períodos de onda de 5, 7 e 9 segundos, com integração numérica pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem e tempo final de simulação de 500 segundos obtemos os seguintes gráficos a respeito da amplitude X, Y, X/Y, o deslocamento relativo entre o manifold e o PSV, a tração no cabo, tensão dinamica, tensão total em função do comprimento do cabo.

Figura 13: Gráfico de X em função do comprimento do cabo



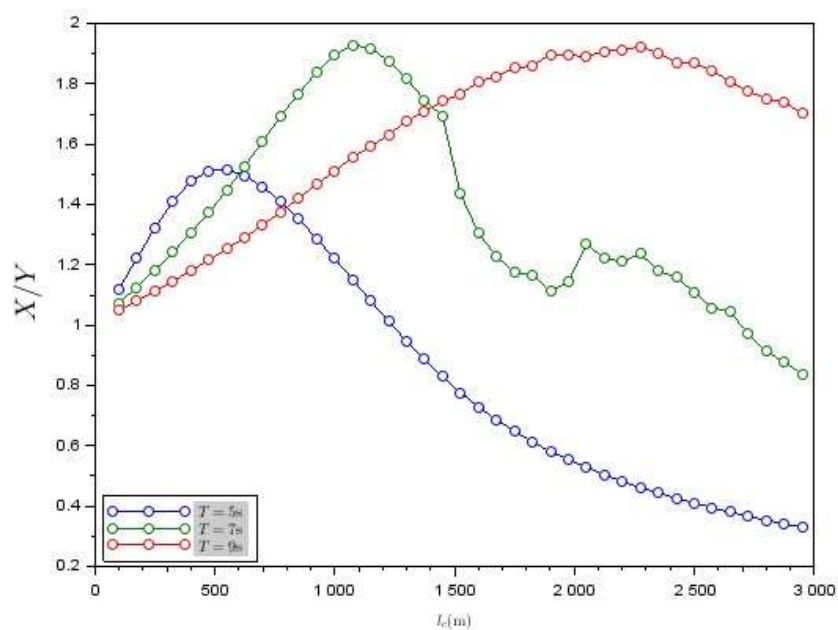
Fonte: Autoria própria

Figura 14: Gráfico de Y em função do comprimento do cabo



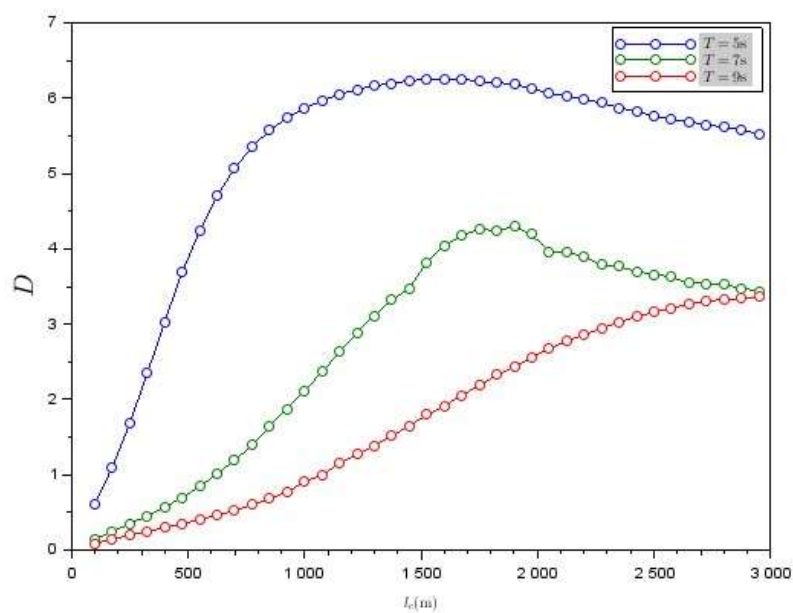
Fonte: Autoria própria

Figura 15: Gráfico de X/Y em função do comprimento do cabo



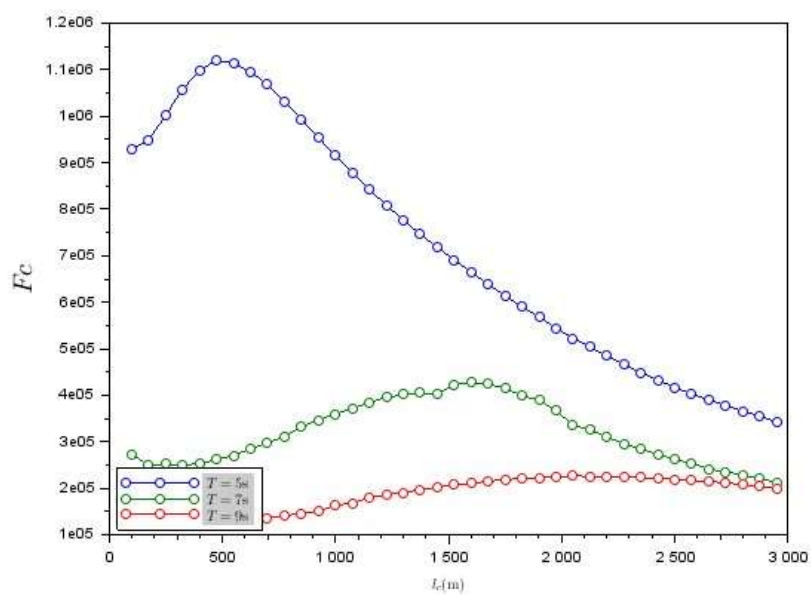
Fonte: Autoria própria

Figura 16: Gráfico do deslocamento entre o manifold e o PSV em função do comprimento do cabo



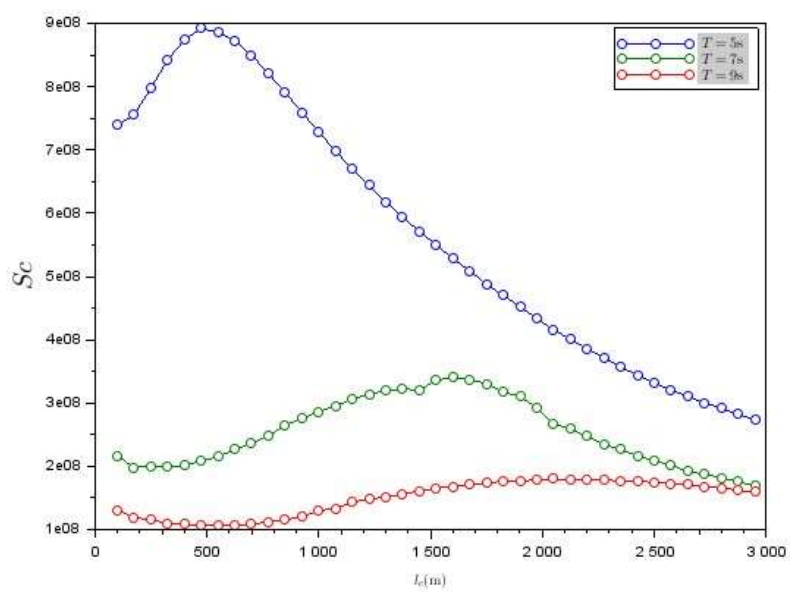
Fonte: Autoria própria

Figura 17: Gráfico da tração em função do comprimento do cabo



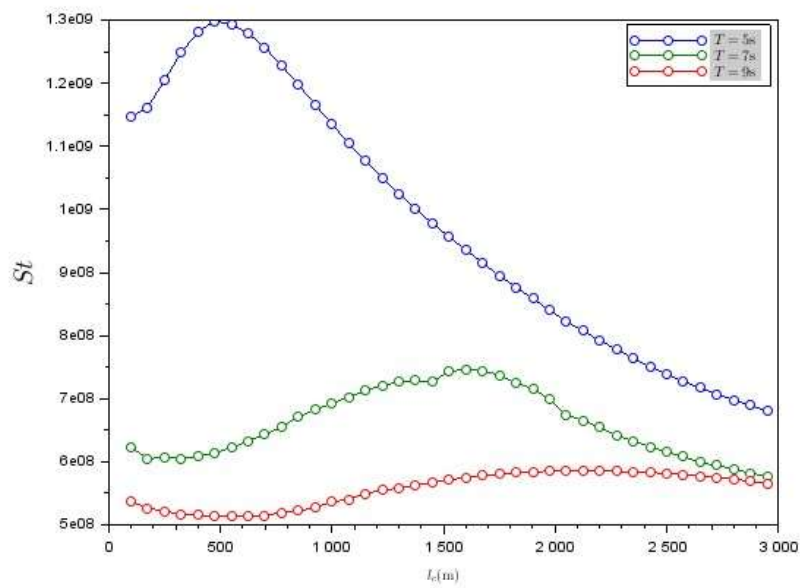
Fonte: Autoria própria

Figura 18: Gráfico da tensão dinâmica em função do comprimento do cabo



Fonte: Autoria própria

Figura 19: Gráfico da tensão total em função do comprimento do cabo

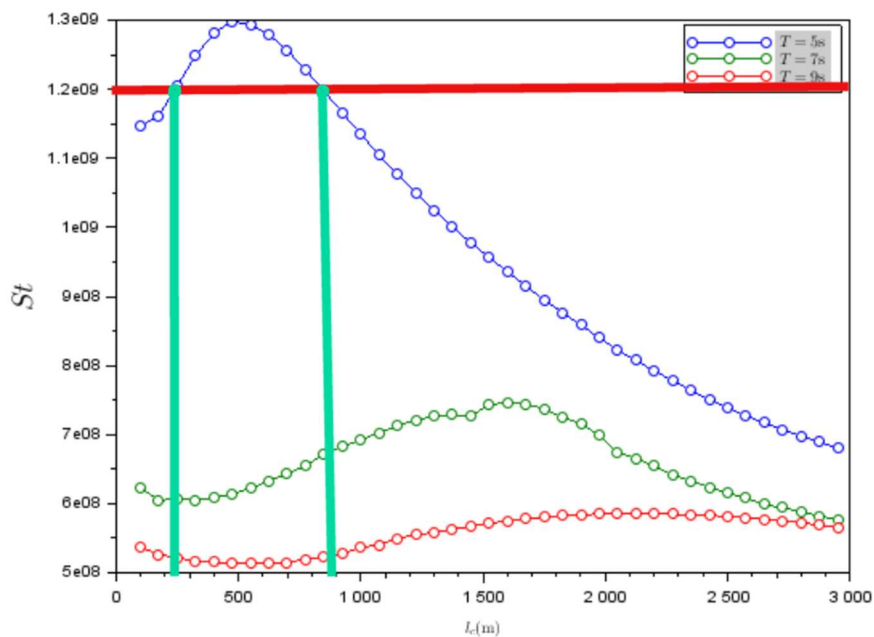


Fonte: Autoria própria

4.2 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A partir dos resultados para a tensão total no cabo, pode-se afirmar que para sistemas com períodos de onda próximos de 5 segundos, a tensão submetida no topo do cabo será maior do que a tensão de ruptura, como pode ser observado abaixo:

Figura 20: Intervalo de tensão de ruptura



Fonte: Autoria própria

Posto isso, para casos em que o mar possua um espectro de frequências semelhante ao demonstrado no gráfico, urge a necessidade de realizar manobras para que se evite a ressonância nos locais que estão entre as duas barras verde-água verticais na figura acima, como as manobras já mencionadas brevemente no capítulo 2.3 deste relatório ou seja feito mudanças estruturais no sistema manifold + água (como trocando o material do cabo).

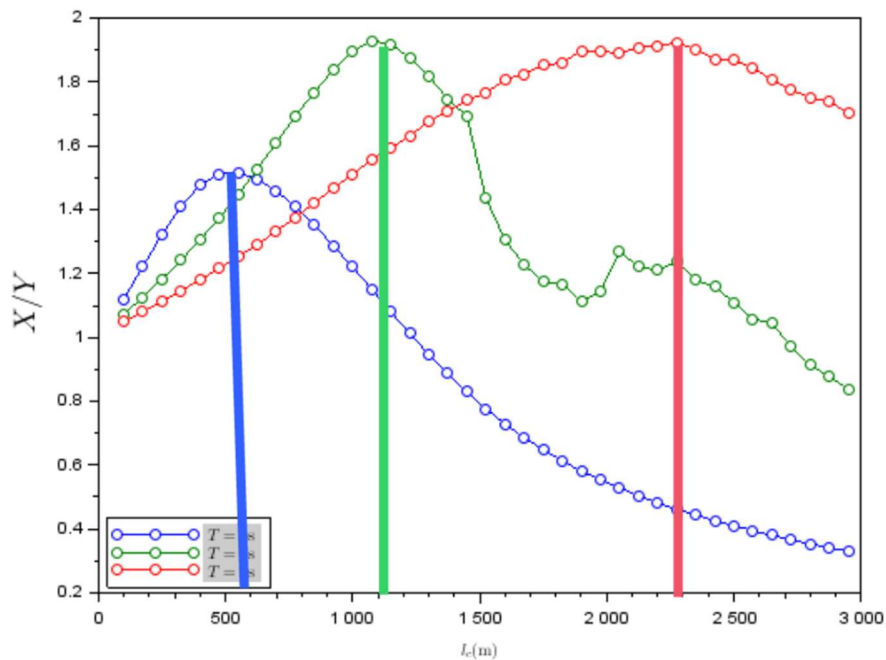
Fora isso percebe-se que para os outros períodos de onda simulados (7 e 9 segundos) não terão problema algum pois os valores não chegam nem perto da tensão de ruptura do material que estamos utilizando para o cabo (1,2 GPa).

Além disso, percebe-se que a tensão média é maior para períodos de onda menores, uma vez que possuem uma maior frequência. Isto ocorre pois, em geral, ondas com menor período (maior frequência) tendem a causar mais tensão no cabo, pois o cabo é submetido a mudanças rápidas de tensão devido às oscilações mais frequentes da superfície do mar. Ondas com maior período (menor frequência) têm menos oscilações no mesmo intervalo de tempo, o que pode permitir que o cabo tenha um comportamento mais estável e menos sujeito a mudanças bruscas de tensão.

Ainda sobre este tema, para ondas com um período curto de 5 segundos, o cabo estará sujeito a oscilações mais frequentes e rápidas, o que pode resultar em maiores tensões dinâmicas. Para ondas com um período mais longo de 9 segundos, o cabo terá oscilações menos frequentes e mais lentas, o que resultou em menores tensões dinâmicas. Posto isso, pode-se afirmar que, no geral, os efeitos de tensão dinâmicos são mais predominantes para sistemas com ondas de período menor e os efeitos de tensão estáticos são mais dominantes para sistemas com ondas de período maior.

Para analisar os efeitos de ressonância, deve-se recorrer ao gráfico da figura 15 e observar os picos de cada curva:

Figura 21: Picos de ressonância para dois graus de liberdade



Fonte: Autoria própria

Obtendo que a ressonância ocorrerá quando o comprimento do cabo for de 600, 1100 e 2300 metros para períodos de onda de 5, 7 e 9 segundos, respectivamente.

Dessa forma, pode-se fazer uma tabela para relacionar todas as informações obtidas a partir dos picos de ressonância para cada simulação realizada neste relatório:

Tabela 4: Comparação entre os períodos de ressonância

Período da onda (s)	Ponto na planilha (m)	Ponto em 1 G.L. (m)	Ponto em 2 G.L. (m)
5	825	800	600
7	1550	1470	1100
9	2550	2300	2300

Fonte: Autoria própria

Percebe-se então que a adição de mais um grau de liberdade impacta significativamente na análise do problema a ser estudado e se mostra muito importante pois demonstra resultados mais próximos a o que ocorre na realidade.

Em resumo, a escolha entre simular com 1 grau de liberdade ou 2 graus de liberdade dependerá dos objetivos da análise. Se uma análise mais simples e rápida for suficiente para as necessidades do

projeto, a simulação com 1 grau de liberdade pode ser adequada. No entanto, se for importante obter uma compreensão mais completa das interações entre o PSV e o manifold, bem como uma análise mais precisa das tensões no cabo, a simulação com 2 graus de liberdade será mais apropriada, apesar de ser mais complexa de ser realizada.

5. CONCLUSÃO

O relatório apresentou uma análise detalhada da descida de um manifold em águas com diferentes períodos de onda (5, 7 e 9 segundos), conduzida em três etapas: cálculos preliminares no Excel, modelagem e simulação com um grau de liberdade, e modelagem com dois graus de liberdade, incorporando o movimento do PSV juntamente com o do manifold. Os resultados de todas as etapas foram satisfatórios e coesos.

A precisão da modelagem foi identificada como fator crucial para a obtenção de resultados mais precisos. Recomenda-se considerar múltiplos graus de liberdade e ajustar os parâmetros do sistema adequadamente para melhorar a representação do comportamento do sistema em estudo.

O desafio do lançamento do manifold suscitou curiosidade e levantou questões sobre como abordar o problema, especialmente com o uso de linguagem computacional e conceitos avançados, como o efeito de arrasto. No entanto, graças às aulas ministradas e aos materiais fornecidos pelos Professores Dr. Gustavo Assi e Jordi Mas Soler, foi possível entender claramente o problema e realizar os cálculos preliminares e simulações de forma bem-sucedida, interpretando os resultados de maneira satisfatória.

O apoio e disponibilidade dos professores foram fundamentais para o sucesso do trabalho, contribuindo significativamente para seus resultados positivos.

Essa simulação foi uma experiência enriquecedora, consolidando os conhecimentos adquiridos nas aulas e em outras disciplinas ao longo da graduação. Permitiu uma abordagem interdisciplinar, desde a programação e modelagem do problema até a compreensão dos resultados da simulação dinâmica no mundo real.

Em resumo, este trabalho se mostrou um dos mais importantes e interessantes para a minha formação como engenheiro naval, proporcionando aprendizado em diversas áreas e aplicação prática dos conhecimentos adquiridos.

REFERÊNCIAS

- ASSI, Gustavo. Problema motivador. Disponível em:
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7609196/mod_resource/content/1/PNV3314_Aula_2.pdf. Acesso em: 14 jul. 2023.
- Todos os gráficos, tabelas, blocos e batches elaborados pelo autor, podem ser encontrados aqui:
NACIF, Gustavo. Pasta compartilhada do Google Drive [pasta online].
Disponível em:
<https://drive.google.com/drive/folders/1o9uzTzdYifl22CPNEdVqbw82GOsSkkL2?usp=sharing>. Acesso em: 17 jul. 2023.