

Estudo da dinâmica de um *glider* – ‘planador’ submarino para monitoração oceanográfica

Bruno de Barros Feitosa

Resumo – Este artigo tem como objetivo explorar a construção de um modelo computacional para a representação da dinâmica de um planador submarino, através do software Orcaflex. Através dos resultados obtidos, é discutida a validade do modelo e suas vantagens e limitações como ferramenta para desenvolvimento de projeto de *gliders*.

Palavras-chave – Glider; Dinâmica; Simulação

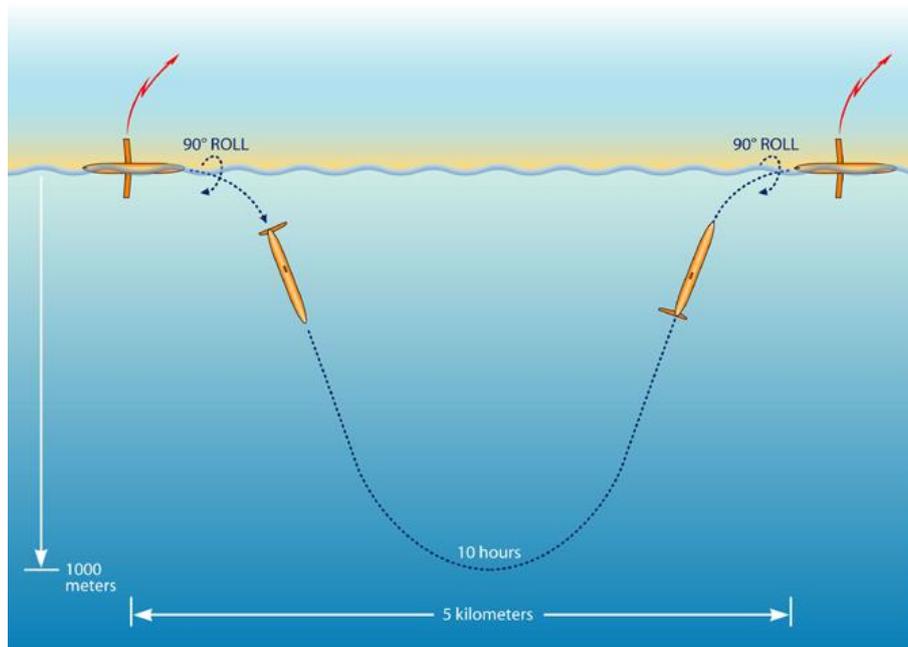
1 Introdução

Este artigo tem como objetivo apresentar os resultados da pesquisa de Iniciação Científica no tema “Estudo da dinâmica de um *glider* – ‘planador’ submarino para monitoração oceanográfica” que vem sendo desenvolvido no Laboratório de Mecânica Offshore (LMO) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP).

Gliders, ou planadores subaquáticos, são veículos autônomos voltados à coleta de dados em ambiente marinho, como medidas de profundidade, de ruído ambiente, de temperatura, de salinidade e de distância até o fundo do oceano (PESCE et al., 2017).

Essa classe de veículos não apresenta propulsão, utilizando-se da variação da distribuição de massa interna e da atuação das forças gravitacional e de empuxo para realizar seu deslocamento. O controle direcional de sua movimentação é realizado através do deslocamento de seu centro de massa na direção do eixo transversal do veículo, assim como pelo controle da força de empuxo exercida sobre o veículo. O movimento resultante é uma trajetória periódica ou quase-periódica, com profundidades que variam, normalmente, de 50m a 1000m.

Figura 1 – Representação da trajetória de um *glider* em operação.



Fonte: (SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY, Acesso em: 31 de maio de 2019).

Devido à ausência de propulsores, *gliders* possuem alta eficiência energética, superando a capacidade de operação contínua da maioria dos veículos de pesquisa aquáticos não tripulados. *Gliders* podem chegar a operar por meses de forma independente, possibilitando uma coleta extensiva de dados, além de se configurarem como alternativa de baixo custo operacional e de fácil manutenção. Constituem-se, portanto, como uma poderosa ferramenta de pesquisa, cujo estudo e desenvolvimento são então importantes para a oceanografia.

Neste projeto, foi estudado o comportamento dinâmico de um *glider*, avaliando-se, através da aplicação de métodos computacionais para simulação dinâmica, a trajetória do veículo durante a execução de mergulhos no plano vertical. Neste relatório é apresentado o modelo desenvolvido para simulação, bem como resultados obtidos com a aplicação de duas leis de controle diferentes. Também são discutidos resultados de análises paramétricas que podem ser utilizadas na construção de curvas de operação.

2 Figuras

Para a realização do estudo proposto, foi escolhido um *glider* do modelo *Slocum*, idêntico aos de propriedade do Instituto Oceanográfico (IO-USP), dada sua disponibilidade para futuros testes. A obtenção das características geométricas e físicas do *glider*, necessárias para as simulações, foi realizada através da consulta aos manuais de operação do veículo (TELEDYNE WEBB RESEARCH, 2012), assim como à base na literatura (KOROTKIN, 2008) e aos trabalhos científicos relevantes que abordam o mesmo modelo (GRAVER, 2005) e (CHEN et al., 2015).

Figura 2 – Foto de um *glider* do modelo *Slocum*.



Fonte: (SEQUOIA SCIENTIFIC, Acesso em: 31 de maio de 2019).

O modelo *Slocum* foi projetado para mergulhos na faixa de 50 a 200 metros, com capacidade de bateria para aproximadamente 30 dias, ou uma distância percorrida próxima de 1000km de operação. O comprimento do veículo é de aproximadamente 1,5m, com um diâmetro de 22cm em seu corpo paralelo médio, de seção cilíndrica. A variação de empuxo total do *Slocum* é realizada através do controle de uma bexiga inflável, que expela água e assim reduz o volume alagado dentro do veículo. O enchimento da bexiga é realizado através de uma bomba de ar.

Para melhorar o controle de manobra do veículo e aumentar o controle sobre o ângulo de mergulho, é utilizado um sistema de variação da posição do centro de massa. Este controle é realizado através do deslocamento de um contrapeso, que no caso do modelo *Slocum* é o próprio conjunto principal de baterias do *glider*, com massa total de 9,1kg, e que pode ser deslocado de uma distância de até 0,25m, ao longo do eixo principal do veículo. Para a realização de curvas laterais, o *glider* utiliza um leme montado na parte superior de sua calda, aliado a um sistema de deslocamento lateral do contrapeso.

As forças hidrodinâmicas podem ser representadas através de curvas de forças de sustentação, de arrasto (*drag*) e de momento. Para o presente estudo, as curvas de coeficientes de sustentação, de arrasto e de momento hidrodinâmicos foram extraídas da tese “Underwater *gliders*: dynamics, control and design” (GRAVER, 2005), obtidas através da análise do comportamento dinâmico do *glider* em uma série de ‘voos’ experimentais no oceano, cujas características foram definidas previamente com o objetivo de auxiliar na identificação de parâmetros. Os experimentos realizados incluíam mergulhos estáveis e instáveis, mergulhos com posições fixas de baterias e leme, assim como mergulhos utilizando o sistema de feedback e controle de trajetória com diferentes ganhos.

Para manobras no plano vertical, são apresentadas abaixo as equações obtidas para os coeficientes de sustentação, de arrasto e de momento hidrodinâmico, respectivamente, em função do ângulo de ataque, α , do *glider*, expresso em radianos. Segundo (GRAVER, 2005), a atuação do momento de Munk foi já incluída no coeficiente de momento hidrodinâmico total lá apresentado.

$$Cl(\alpha) = 11.76 \alpha + 4.6 \alpha |\alpha|, \quad (1)$$

$$Cd(\alpha) = 0.214 + 32.3 \alpha^2, \quad (2)$$

$$Cm_{total}(\alpha) = 0.63 \alpha. \quad (3)$$

O software OrcaFlex considera medidas do ângulo de incidência em graus, devendo ser feita a devida conversão. É importante ressaltar que as equações para cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos haviam sido obtidas, (GRAVER, 2005), através de ajuste a dados experimentais. Este ajuste é válido apenas para condições de mergulho nas quais os ângulos de ataque efetivos são pequenos. Desta forma, eventuais resultados de simulações nas quais o ângulo de ataque se mostre elevado devem ser vistos com ressalvas.

A simulação da trajetória do *glider* necessita também que sejam determinadas posições para o centro de massa e para o empuxo do veículo. Na operação real, a movimentação do contrapeso provoca variação da posição do centro de massa e o controle do volume da bexiga modifica o volume interno alagado, causando o reposicionamento do centro de empuxo. No modelo no OrcaFlex, essas ações serão emuladas através da aplicação de um binário de forças e de uma força. Essa é uma abordagem quase-estática, porquanto são desprezados os efeitos inerciais e dinâmicos na dinâmica do veículo, devidos a tais variações.

As coordenadas de posição apresentadas nessa seção referem-se a um sistema xyz solidário ao corpo do *glider*, cuja origem é localizada no centro geométrico do veículo, com eixo x paralelo ao eixo longitudinal do mesmo e eixo y perpendicular ao plano vertical do movimento (Figura 4).

A precisa determinação das coordenadas de interesse, do centro de massa e do empuxo do *glider*, não explicitadas na documentação do veículo, exigiria a realização de uma série de testes laboratoriais, que não puderam ser realizados dentro do escopo desta pesquisa de Iniciação Científica (IC). A escolha da posição do centro de massa foi então arbitrada como próxima ao centro geométrico do mesmo¹.

Através de testes iniciais realizados no OrcaFlex, adotando-se o modelo aqui apresentado, verificou-se que forças de alguma amplitude podem ser aplicadas, sem perda de estabilidade hidrostática e de trajetória, quando o centro de massa é posicionado ligeiramente à frente e abaixo do centro geométrico do *glider*.

¹ A realização de experimentos para determinação precisa das posições dos centros de massa e do empuxo, com comparação dos resultados com as hipóteses adotadas nesta análise e com verificação dos seus efeitos na trajetória do veículo, constituiu-se, dessa forma, em uma possível expansão deste trabalho.

Desta forma, a posição do centro de gravidade (CG) escolhida para a realização dessas análises, no sistema de coordenadas solidário ao corpo e centrado em seu centro geométrico, foi $x=0,02m$ e $z=-0,005m$. Exemplos de simulações executadas durante os testes iniciais podem ser verificados no Apêndice A.

O centro de empuxo deve estar localizado acima do centro de massa, para que não surja um binário de forças desestabilizador, que faça o veículo emborcar. Por simplicidade, o centro de empuxo foi posicionado diretamente acima do centro de massa, na posição $x_c=0,02m$ e $z_c=0,015m$.

3 Software Orcaflex e modelo utilizado

O OrcaFlex, (ORCINA, 2018), é um software de simulação voltado ao estudo e à análise de sistemas mecânicos offshore. O programa permite a realização de análises estáticas e dinâmicas globais do sistema, através de sua modelagem por meio de entidades computacionais que interagem entre si.

Neste estudo, o *glider* será representado por uma entidade denominada *buoy* (boia), no programa OrcaFlex. Esta entidade permite a definição de propriedades físicas, incluindo massa, momentos de inércia, posições dos centros de massa e empuxo, assim como a adição dos coeficientes de massa adicional. A massa total e o volume de água deslocado do veículo devem estar definidos e são utilizados no cálculo das forças de empuxo e peso.

Figura 3 – Propriedades físicas do *glider* utilizadas na simulação como vistas no software OrcaFlex.

Initial Position and Attitude:

x (m)	y (m)	z (m)	Rotation 1 (deg)	Rotation 2 (deg)	Rotation 3 (deg)
0,000	0,000	-50,000	0,000	0,000	0,000

Inertia:

Mass (kg)	Mass Moments of Inertia (kg.m ²)			Centre of Mass (m)		
	x	y	z	x	y	z
49,000	4,000	12,000	11,000	0,020	0,000	-0,0050

Geometry:

Volume (m ³)	Bulk Modulus (kPa)	Height (m)	Centre of Volume (m)		
			x	y	z
0,050	Infinity	0,220	0,020	0,000	0,015

Damping:

TRANSLATION			ROTATION		
x	y	z	x	y	z
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Drag:

Drag Area (m ²)			Drag Moment of Area (m ⁵)		
4,095	19,500	21,000	0,000	0,000	0,000

Fluid Inertia:

Hydrodynamic Mass (kg)			Hydrodynamic Inertia (kg.m ²)		
5,000	60,000	70,000	0,000	0,000	0,000

Slam:

Slam Area (m ²)	Slam Force Data	
	Entry	Exit
0,000	0,000	0,000

A Figura 3 apresenta uma tabela, retirada do OrcaFlex, com todas as propriedades físicas do *glider* utilizadas na simulação.

Os coeficientes de massa adicional utilizados foram calculados considerando o *glider* como um elipsoide de revolução com mesma razão de esbeltez, (KOROTKIN, 2008). Foi desconsiderado o momento de inércia adicional do veículo.

A geometria atribuída a essa entidade boia é genérica e não pode ser definida pelo usuário. Suas características não são levadas em consideração durante a simulação. Quando trabalhando com uma entidade boia, o programa desconsidera a atuação de forças de sustentação e de momentos hidrodinâmicos, podendo ser apenas definido um coeficiente de arrasto constante, que não leva em consideração os ângulos de incidência relativos ao escoamento.

No entanto, a atuação das forças hidrodinâmicas é indispensável no estudo da dinâmica de um *glider* submarino e pode ser considerada através da sobreposição (conexão rígida) de uma outra subentidade denominada *wing* (asa). Essa segunda entidade não possui propriedades físicas, como massa própria, mas permite a inclusão de curvas de coeficientes hidrodinâmicos em função do ângulo de incidência entre asa e escoamento, que serão utilizadas para calcular as forças de sustentação, o arrasto e os momentos hidrodinâmicos correspondentes, através das clássicas equações:

$$L = Cl \frac{\rho V^2}{2} A, \quad (4)$$

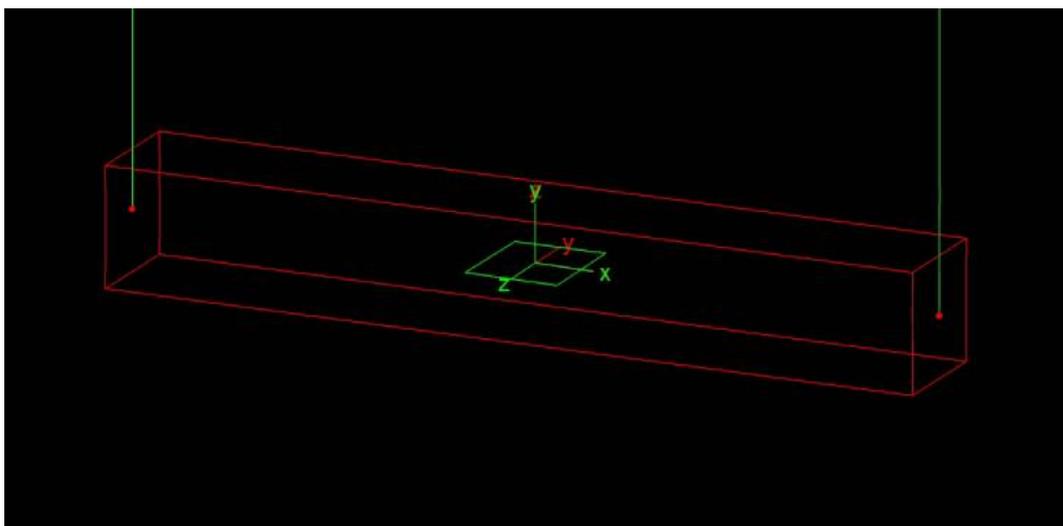
$$D = Cd \frac{\rho V^2}{2} A, \quad (5)$$

$$Mf_{total} = Cm_{total} \frac{\rho V^2}{2} A. \quad (6)$$

Na seção anterior, foram apresentadas as equações dos coeficientes hidrodinâmicos, em função do ângulo de ataque efetivo, determinados experimentalmente para todo o veículo. Desta forma, sobreposta à entidade boia, que contém os principais atributos geométricos e inerciais, será utilizada neste modelo uma única entidade asa para representação do *glider*, caracterizada pelos coeficientes hidrodinâmicos. Para que sejam obtidas as forças hidrodinâmicas corretas, a relação entre corda e envergadura da asa criada deve ser tal que sua área total, utilizada pelo programa OrcaFlex, seja equivalente à área de referência adotada na realização dos experimentos. Em (GRAVER, 2005), essa área de referência foi tomada igual à da seção transversal do veículo, $A = 0,0355 \text{ m}^2$.

É importante ressaltar que a asa possui um eixo de coordenadas próprio. A origem deste sistema próprio foi posicionada no centro geométrico do veículo, de forma a que a asa ficasse paralela ao plano XY da boia.

Figura 4 – Entidades utilizadas na representação do *glider*, na simulação OrcaFlex. A boia está representada em vermelho e a asa e as molas em verde. Os eixos de coordenadas das duas entidades não são os mesmos.



Os efeitos da variação de posição do contrapeso e do volume total da bexiga interna são modelados, de forma quase-estática, através da aplicação de um binário e de uma força de empuxo, variáveis no tempo. Esta abordagem desconsidera os efeitos inerciais relacionados ao movimento do contrapeso e à expulsão de água na bexiga. O equacionamento destas forças é discutido na próxima seção. A lei temporal que rege força e binário será denominada de ‘lei de controle’ (em malha aberta).

Uma peculiaridade do software é que para que seja possível realizar a simulação da dinâmica do *glider*, que é o foco deste estudo, é necessário que uma análise de estabilidade estática seja feita anteriormente. Durante a análise estática é necessário que a entidade boia, solidariamente à entidade asa, seja ‘fixada’ no espaço por outras entidades, no caso molas. Para contornar esse problema, a boia foi pendurada por duas entidades mola, posicionadas nas extremidades. Após feito o teste de estabilidade estática, pode ser iniciada a simulação dinâmica, onde a ligação entre boia e molas é suprimida e passam a ser aplicadas as forças definidas pela ‘lei de controle’.

Por fim, o programa permite definir as propriedades da água no ambiente de operação, assim como considerar efeitos de correnteza. Para este estudo, será considerada a operação em águas salgadas com salinidade de 3,5% e com massa específica de 1025kg/m³, em uma temperatura de 10°C. Serão desprezados efeitos de correnteza, nesta primeira análise.

4 Simulação de trajetória

4.1 1ª Lei de controle – senoidal

Como já explicado, os efeitos do movimento do contrapeso e da variação de volume da bexiga interna podem ser modelados, de forma quase-estática, por um binário e por uma força, variáveis no tempo. A lei que rege essas funções temporais será aqui denominada ‘lei de controle’, sem realimentação.

Objetivando trajetórias periódicas ao longo da profundidade, a modelagem de binário e de força terá caráter senoidal, nessa primeira lei de controle proposta. Serão utilizados como parâmetros de simulação o período, a distância máxima de deslocamento da bateria, com a qual se representa o binário, a amplitude do empuxo variável e o ângulo de fase inicial entre eles.

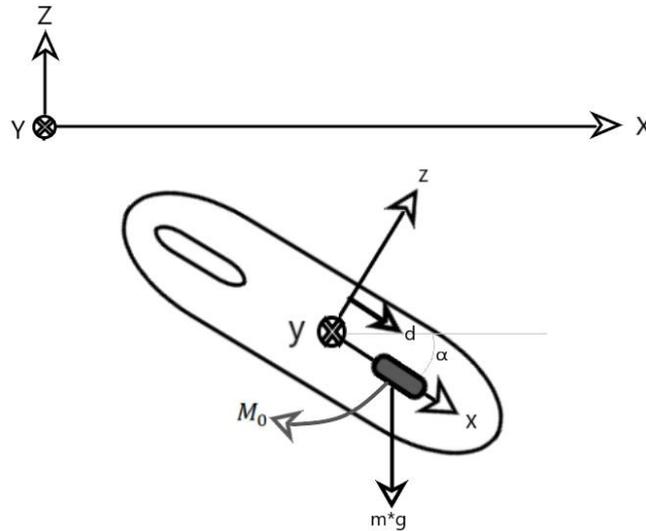
No modelo *Slocum*, a bexiga fica localizada na parte traseira do veículo. No entanto, é adotada hipótese simplificadora admitindo que o empuxo variável correspondente à sua atuação tenha como ponto de aplicação o centro de empuxo do veículo, cuja posição será considerada fixa.

As equações da primeira ‘lei de controle’ são:

$$M(t) = M_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

$$M_0 = mgd \cos \bar{\alpha}. \quad (8)$$

Nessas equações, M_0 é a amplitude do binário, proporcional ao deslocamento máximo do contrapeso escolhido como parâmetro de simulação. Como a aplicação de forças no OrcaFlex deve ser em malha aberta, não se pode fazer com que M_0 varie em função do ângulo de mergulho α ao longo da simulação. Adotou-se um valor para o ângulo de mergulho considerado ‘de projeto’. Na maioria dos casos estudados, a adoção do ângulo de mergulho médio $\bar{\alpha} = 10^\circ$ mostrou-se consistente. Quando os resultados obtidos ao longo da simulação mostraram muita discrepância com essa hipótese, a simulação foi refeita com um ângulo médio mais apropriado, com valores de $\bar{\alpha} = 1^\circ, 5^\circ$ ou 20° . Uma melhor condição poderia ser alcançada através de um processo iterativo em todas as simulações.

Figura 5 – Esquemático de como a variação de posição do contrapeso gera momento sobre o *glider*.

Durante a operação, o volume da bexiga, e consequentemente o empuxo variável aplicado, é uma variável controlável. A força de empuxo variável é dada pela equação:

$$E(t) = E_0 - Ae \cos(\omega t + \varphi). \quad (9)$$

Nessa expressão, E_0 é o empuxo líquido quando a bexiga está vazia.

Na execução de todas as simulações, foi adotado um tempo de simulação de 4 horas, ou 14400 segundos. Para evitar dificuldades de convergência numérica quando da possível emergência do veículo, cruzando a superfície livre, foi adotada profundidade de partida em $z=-50\text{m}$.

O estudo dos resultados teve como base a análise dos gráficos de posição ao longo dos eixos x e z , de ângulo de mergulho e de velocidade do *glider* ao longo do tempo. Os gráficos obtidos, a partir da aplicação de diferentes parâmetros, podem ser consultados no Apêndice B.

Para a execução de uma manobra eficaz, o ‘nariz’ (ou proa) do *glider* deve estar apontado para baixo (ângulo y positivo) durante o mergulho e para cima (ângulo y negativo) durante a ascensão e seu eixo longitudinal deve estar próximo à horizontal nos pontos de máximo e de mínimo da trajetória. Esse resultado pode ser obtido através da aplicação de uma fase de 180° entre as duas ações da ‘lei de controle’, como pode ser verificado nos Gráficos 1 e 2.

Gráfico 1 – Rotação do *glider*, em função do tempo, simulada no OrcaFlex. Parâmetros: $Ae=100\text{N}$; $d=0,005\text{m}$; $P=7200\text{s}$; $\varphi=180^\circ$.

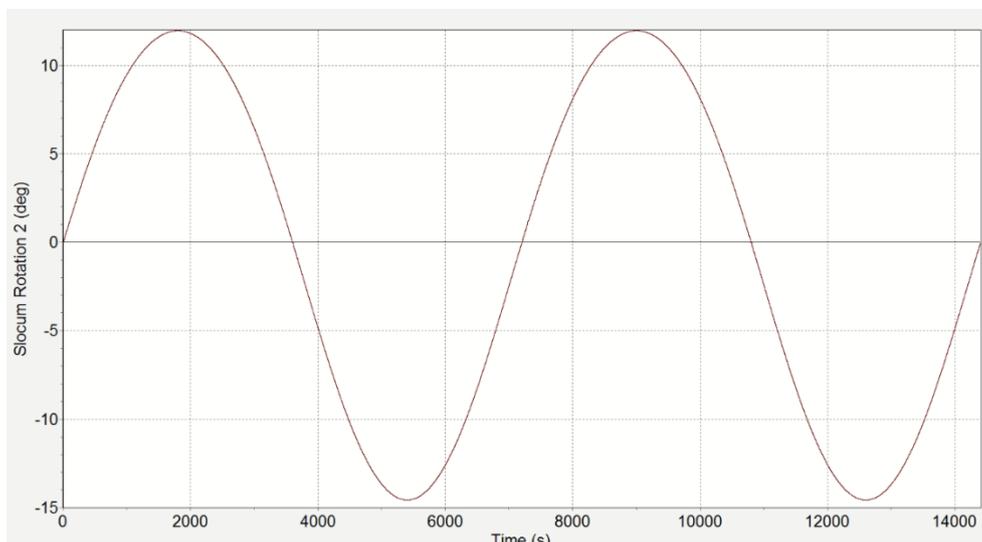
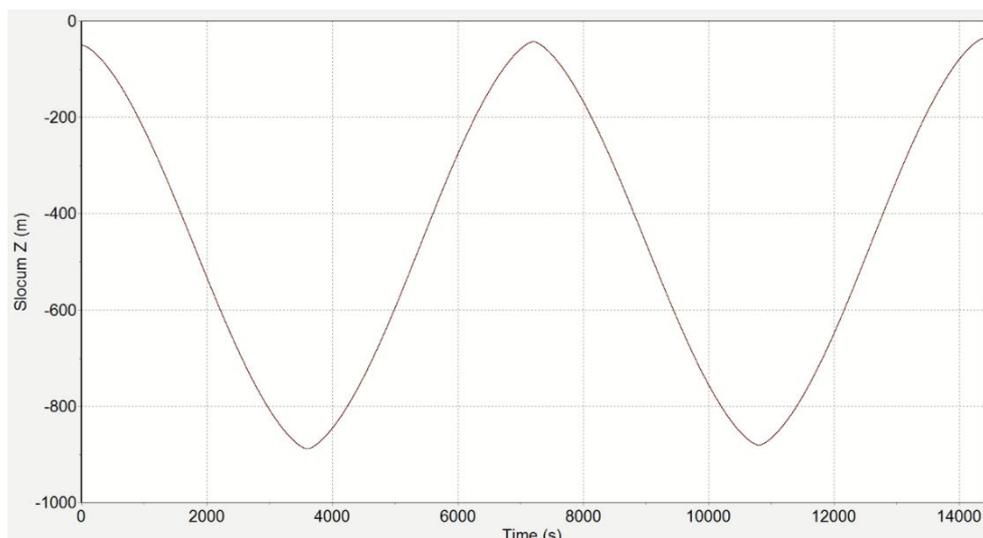


Gráfico 2 – Posição na direção z do *glider*, em função do tempo, simulada no OrcaFlex.
Parâmetros: $A_e=100\text{N}$; $d=0,005\text{m}$; $P=7200\text{s}$; $\varphi=180^\circ$.



Gráficos que permitem um estudo mais aprofundado dos efeitos da variação de fase na trajetória, mantendo outros parâmetros constantes, são disponibilizados no Apêndice F. A partir deles, pode-se verificar que a velocidade média do *glider* atinge um máximo para o ângulo de fase de 180° e que a amplitude de variação angular na direção y atinge um mínimo. Também se verifica que para ângulos de fase muito distantes de 180° a manobra se torna instável e não produz a trajetória esperada. Desta forma, a fase de 180° será adotada para todas as simulações realizadas.

Gráfico 3 – Velocidade máxima atingida para diferentes ângulos de fase entre as ações de controle.
Parâmetros: $A_e=20\text{N}$; $d=0,03\text{m}$; $P=7200\text{s}$; φ =variável.

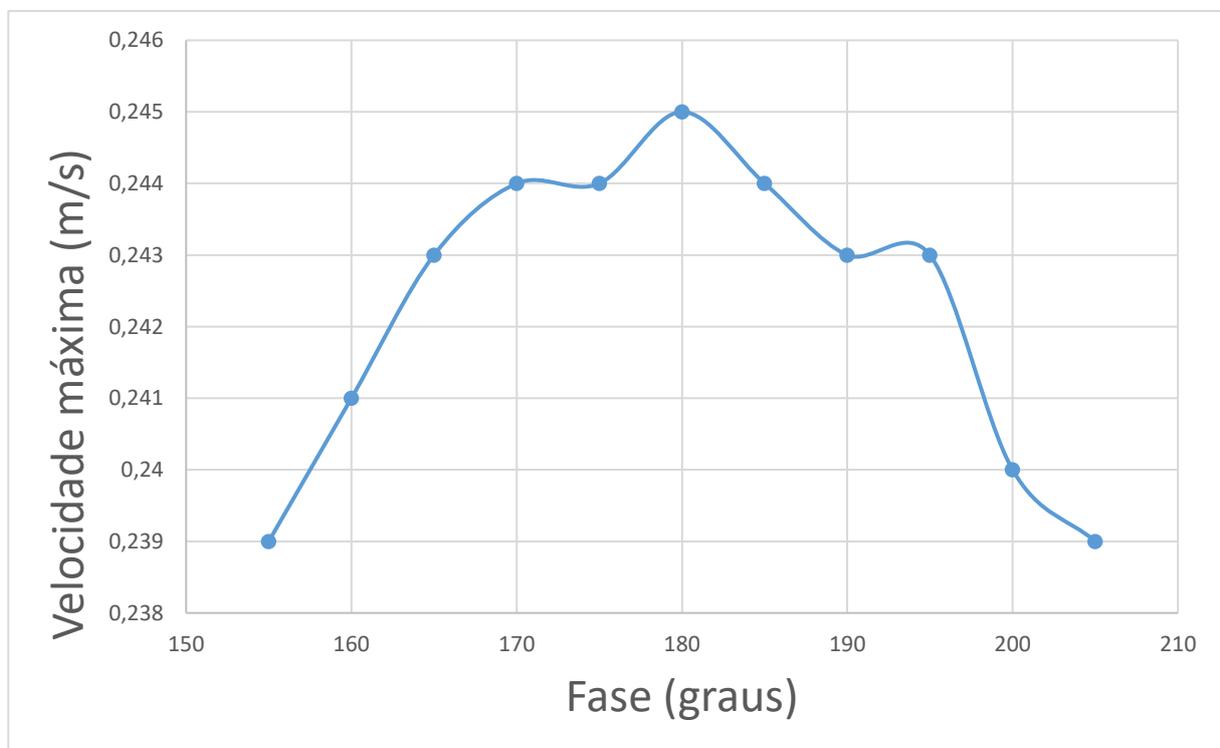
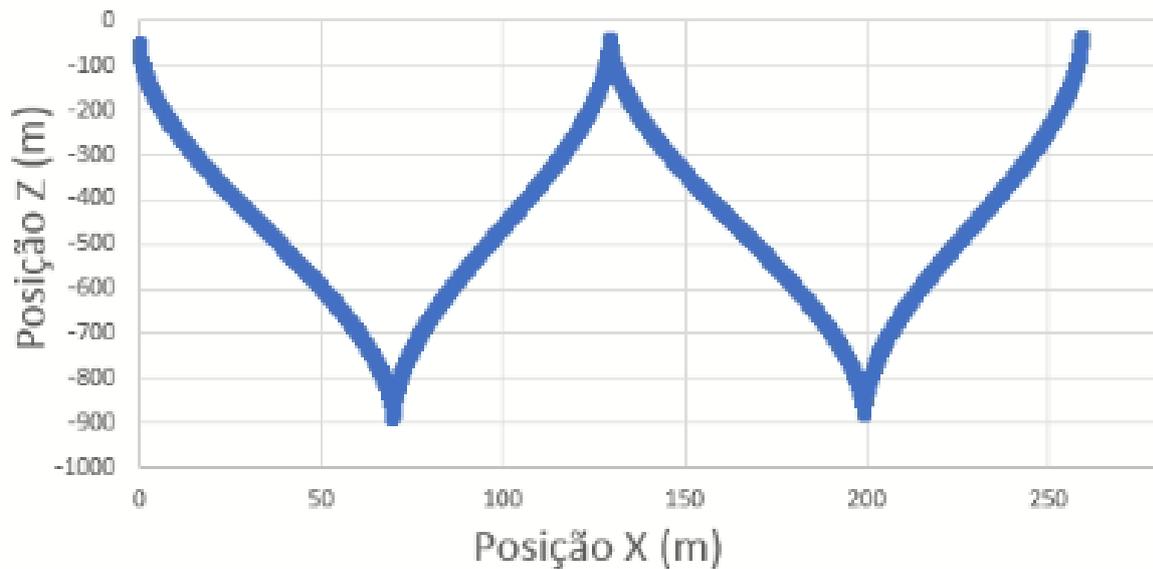


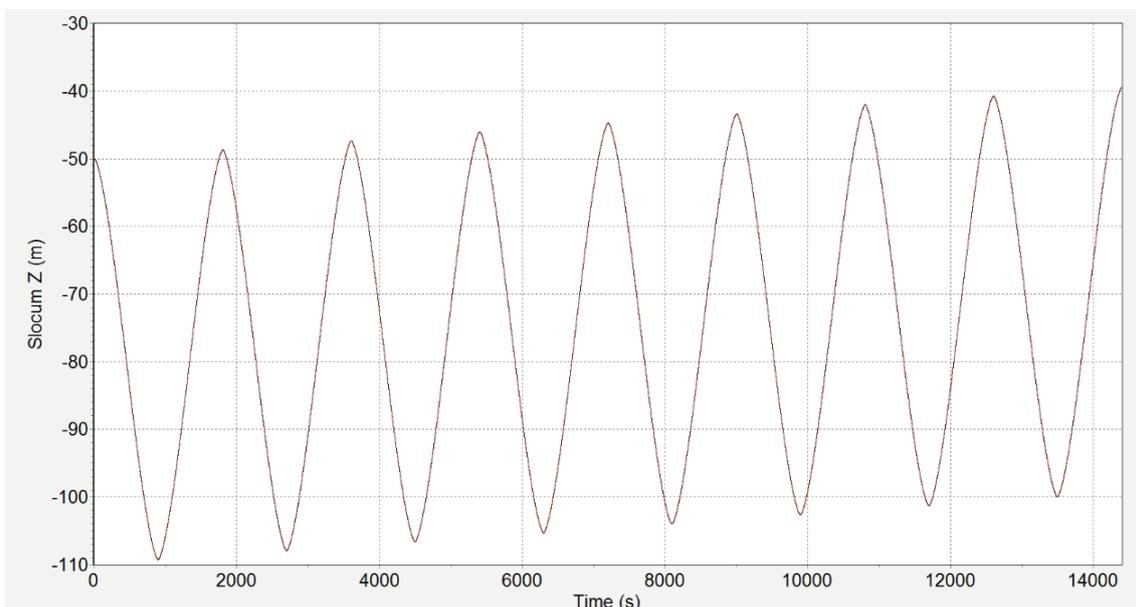
Gráfico 4 – Trajetória do centro de massa do *glider*, obtida pela aplicação da ‘lei de controle’ senoidal. Parâmetros: $A_e=100\text{N}$; $d=0,005\text{m}$; $P=7200\text{s}$; $\varphi=180^\circ$.



O gráfico 4 ilustra um exemplo de trajetória obtida através da simulação desta ‘lei de controle’. Como esperado, a trajetória obtida é quase-periódica. De fato, a periodicidade não é perfeita, podendo-se verificar que ocorre uma pequena variação na posição z do ponto máximo da trajetória a cada ciclo. Observa-se, por outro lado, que o único efeito dissipativo considerado é aquele causado pelo arrasto hidrodinâmico e que a atuação através de força de empuxo e de binário variáveis introduz energia ao sistema, de forma não-conservativa.

Dependendo dos parâmetros aplicados, a variação do ápice da trajetória se torna desprezível. Mas, para alguns conjuntos de parâmetros, é possível que ocorra ascensão ou decaimento do ápice a cada ciclo, como ilustrado no gráfico 5. Fica, então, evidente a necessidade de adoção de um sistema de controle com realimentação de estado, tarefa que está fora do escopo deste trabalho de Iniciação Científica.

Gráfico 5 – Posição na direção z do *glider*, em função do tempo, para trajetória em ascensão. Parâmetros: $A_e=20\text{N}$; $d=0,03\text{m}$; $P=7200\text{s}$; φ =variável.



De fato, tais variações podem ser atribuídas à ‘lei de controle’ em malha aberta, em que a ação é preestabelecida de forma independente do estado do sistema. Nesse tipo de ‘lei de controle’, pequenas perturbações na trajetória não são corrigidas e podem se acumular com o tempo.

A estabilidade da trajetória simulada depende de uma combinação das intensidades de empuxo e de binário aplicados. Observou-se que caso os valores escolhidos sejam altos demais e os ângulos obtidos passem de 45° , o *glider* não consegue retornar e passa a girar em torno de si mesmo. Além disso, para alguns conjuntos de parâmetros, trajetórias inicialmente estáveis acabaram por se tornar instáveis. Esse fato foi observado quando o período estabelecido para a manobra era reduzido.

A aplicação de uma ‘lei de controle’ em malha fechada, onde a intensidade da força e do binário aplicados a cada instante são função do estado do sistema, é uma possível solução para obter uma trajetória periódica sem variações apreciáveis e para tornar a estabilidade do sistema independente do período de manobra escolhido.

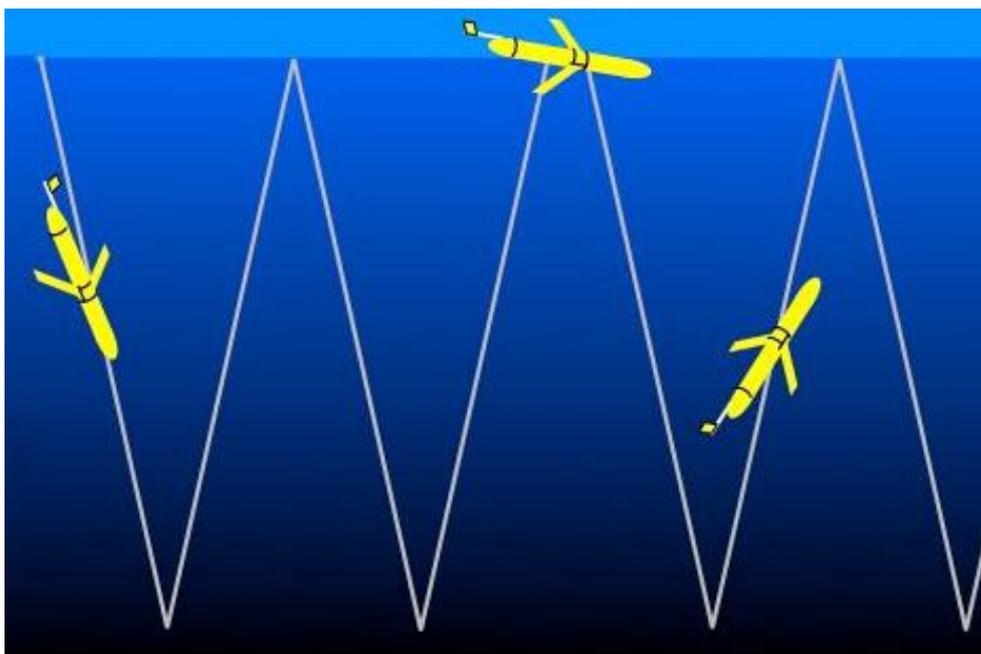
Relembra-se que o único efeito dissipativo do modelo considerado é a força de arrasto hidrodinâmica. Efeitos outros de amortecimento, associados à velocidade de rotação, não foram considerados e por certo teriam efeito estabilizador.

4.2 2ª Lei de controle

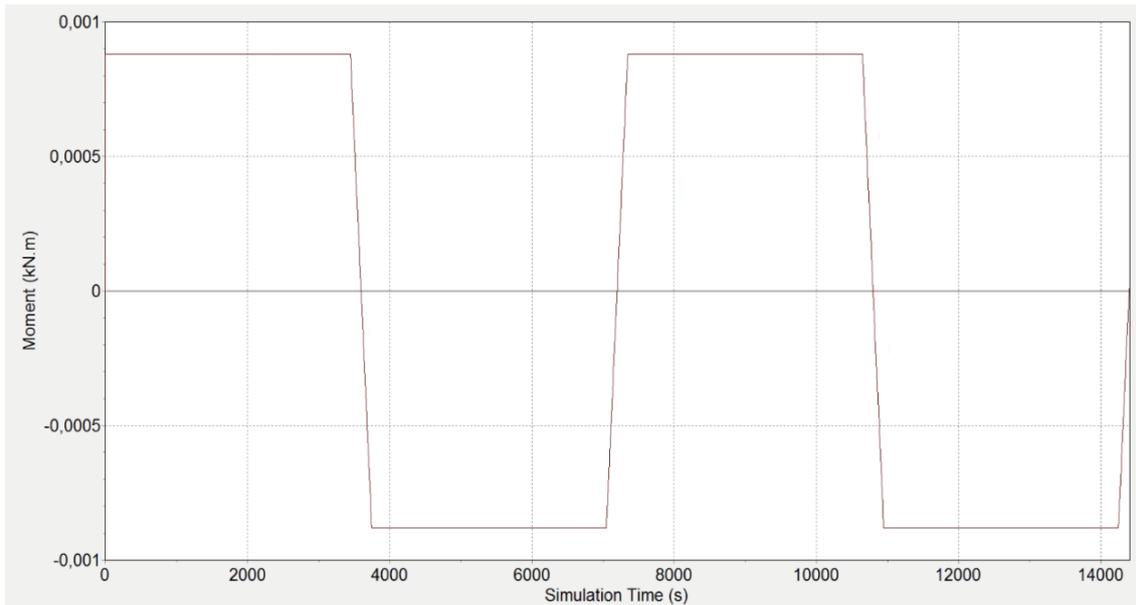
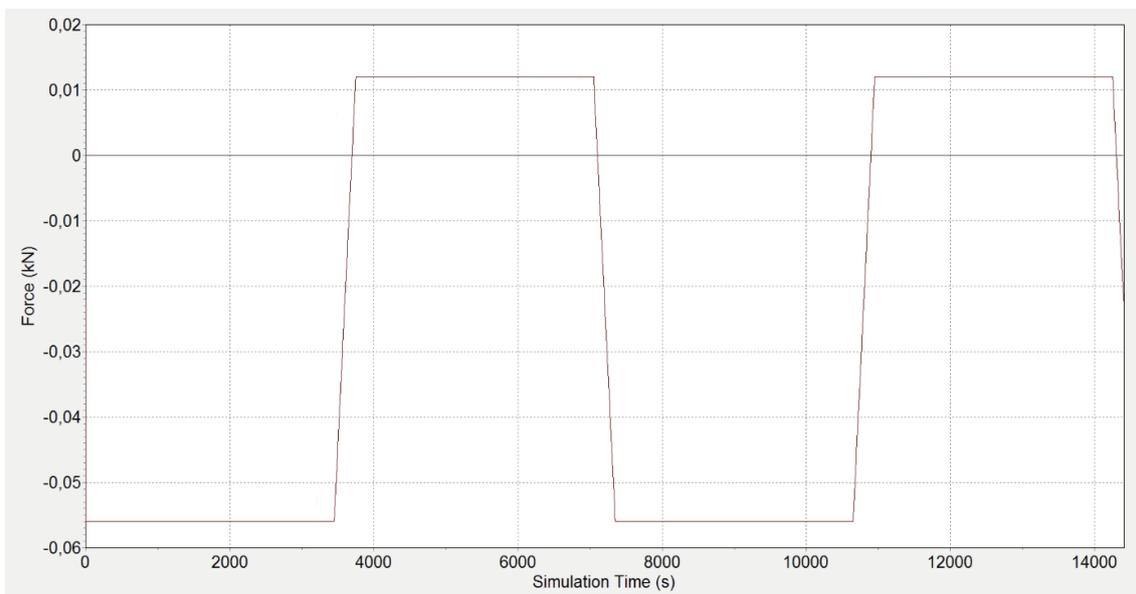
A trajetória executada pela maioria dos *gliders* comerciais, incluindo os modelos *Slocum*, é caracterizada por um movimento em ‘dente de serra’. A trajetória de projeto é periódica e é composta por longos trechos de movimento em linha reta, intercalados por curvas curtas e rápidas para inversão de direção. Para executar a modelagem desta trajetória nas simulações, foi desenvolvida uma nova ‘lei de controle’. Nesse novo modelo, são definidos valores máximos e mínimos e tempos de transição para as forças aplicadas. Nos trechos lineares da trajetória, o valor das forças é fixado no máximo ou no mínimo, de acordo com a direção do movimento. Nos períodos de transição, as forças variam linearmente de um extremo ao outro. O ângulo de fase entre as forças de empuxo e binário é de 180° .

Os gráficos 6 e 7 exemplificam a forma das funções obtidas aplicando-se a ‘lei de controle’ proposta, adotando-se um deslocamento máximo do contrapeso $d=0,1\text{m}$, uma amplitude de empuxo $A_e=10\text{N}$ e um tempo de transição $T_s=300\text{s}$.

Figura 6 – Ilustração da trajetória em ‘dente de serra’.

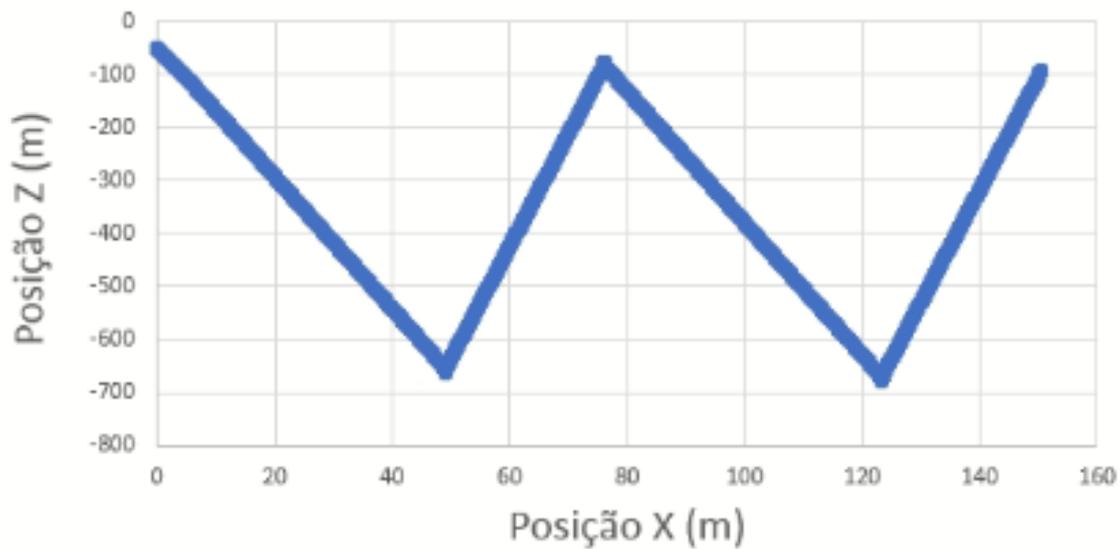


Fonte: (WHOI UNDERWATER GLIDER OPERATIONS, Acesso em: 31 de maio de 2019).

Gráfico 6 – Momento aplicado, em função do tempo. Parâmetros: $d=0,01\text{m}$; $T_t=300\text{s}$.Gráfico 7 – Empuxo aplicado, em função do tempo. Parâmetros: $A_e=10\text{N}$; $T_t=300\text{s}$.

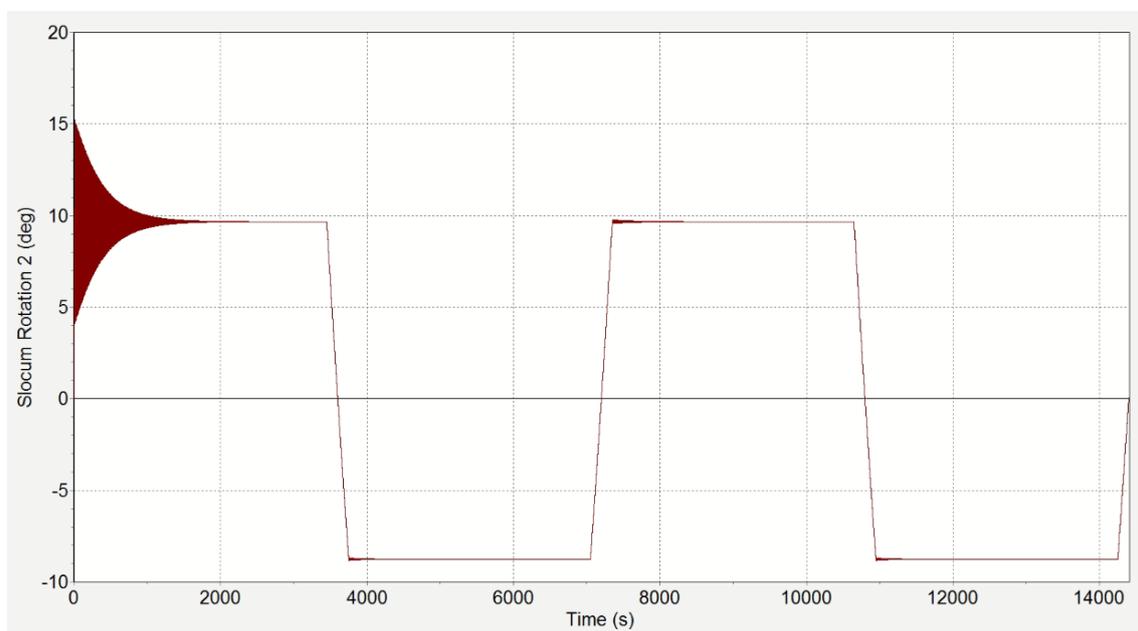
Gráficos de posição nas direções x e z, de rotação na direção y e de velocidade total em função do tempo, obtidos a partir da aplicação dessa 'lei de controle' podem ser encontrados no Apêndice C.

Gráfico 8 – Trajetória obtida em simulação, para a 2ª Lei de controle. Parâmetros: $A_e=10N$; $d=0,01m$; $P=7200s$; $\varphi=180^\circ$.



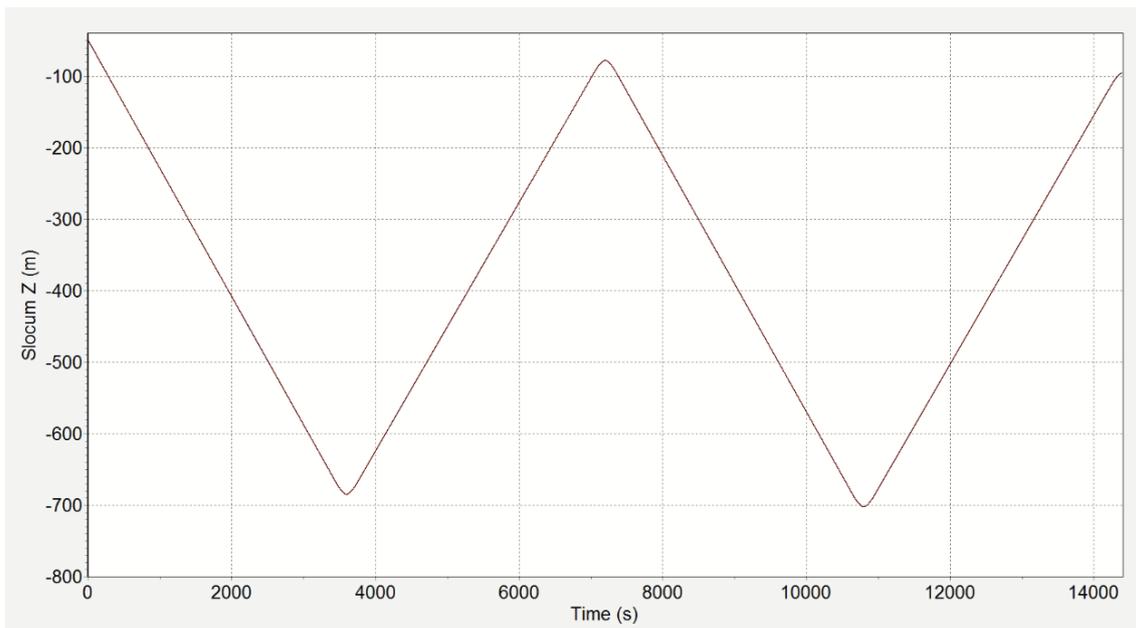
A trajetória resultante demonstra a eficácia da 'lei de controle' proposta para a geração de uma trajetória em 'dente de serra'. Como na 'lei de controle' anterior, estudos dos gráficos de rotação e de empuxo mostram que a inversão de direção do movimento ocorre exatamente nos momentos em que a orientação do *glider* é horizontal. Verifica-se uma forte oscilação angular no início de todas as simulações, não presente na aplicação da 'lei de controle' senoidal.

Gráfico 9 – Rotação do *glider*, em função do tempo, para a segunda 'lei de controle'. Parâmetros: $A_e=100N$; $d=0,005m$; $P=7200s$; $\varphi=180^\circ$.



Tal variação poderá ser reduzida com a incorporação ao modelo de termos de amortecimento proporcionais à velocidade de rotação.

Gráfico 10 – Cota de mergulho z do *glider*, em função do tempo, para a segunda ‘lei de controle’.
Parâmetros: $A_e=100\text{N}$; $d=0,005\text{m}$; $P=7200\text{s}$; $\varphi=180^\circ$.



A comparação de resultados obtidos através das duas ‘leis de controle’, para um mesmo conjunto de parâmetros aplicados, mostra, como esperado, que a movimentação linear da trajetória em ‘dente de serra’ permite que sejam atingidas maiores velocidades e proporciona um maior deslocamento na direção x , como pode ser verificado nos gráficos 11 e 12. Para as duas ‘leis de controle’ aplicadas, percebe-se que a componente de velocidade na horizontal tem média maior durante a fase de mergulho, quando comparada à fase de emersão.

Gráfico 11 – Avanço do *glider* na direção x , em função do tempo, para a segunda ‘lei de controle’.
Parâmetros: $A_e=100\text{N}$; $d=0,005\text{m}$; $P=7200\text{s}$; $\varphi=180^\circ$.

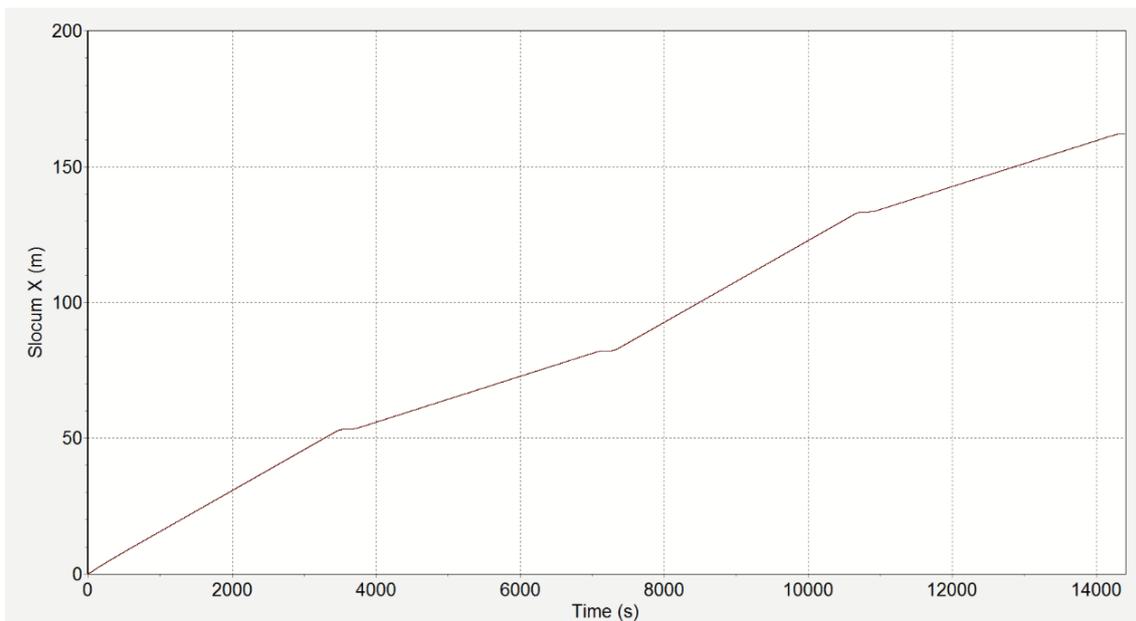
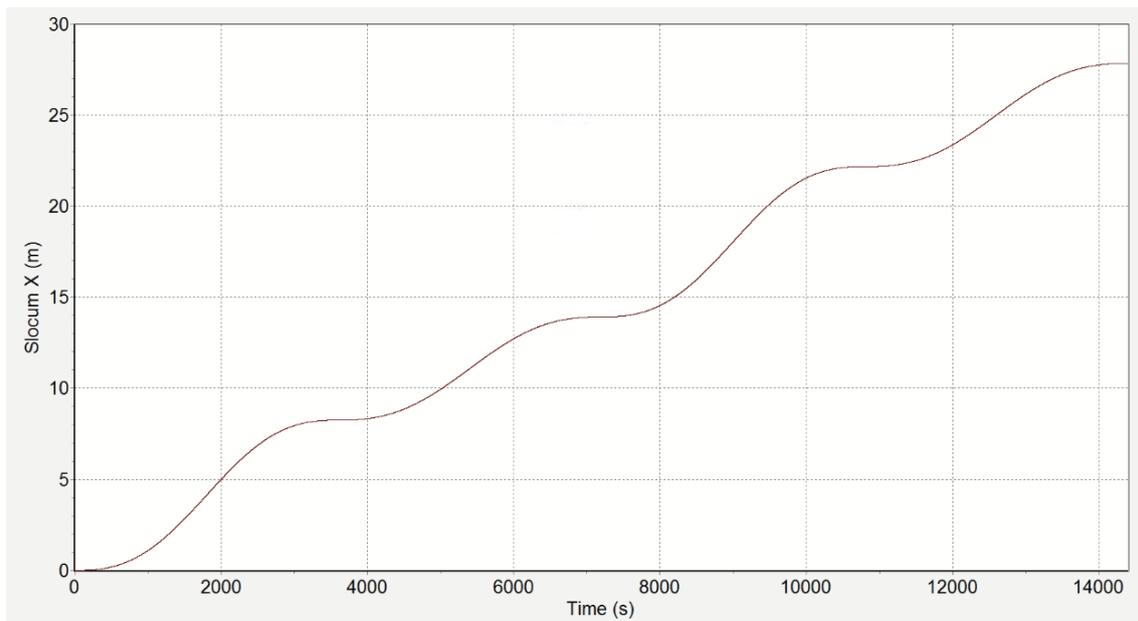


Gráfico 12 – Avanço do *glider* na direção x, em função do tempo, para a ‘lei de controle’ senoidal.
Parâmetros: $A_e=100\text{N}$; $d=0,005\text{m}$; $P=7200\text{s}$; $\varphi=180^\circ$.



5 Análise paramétrica

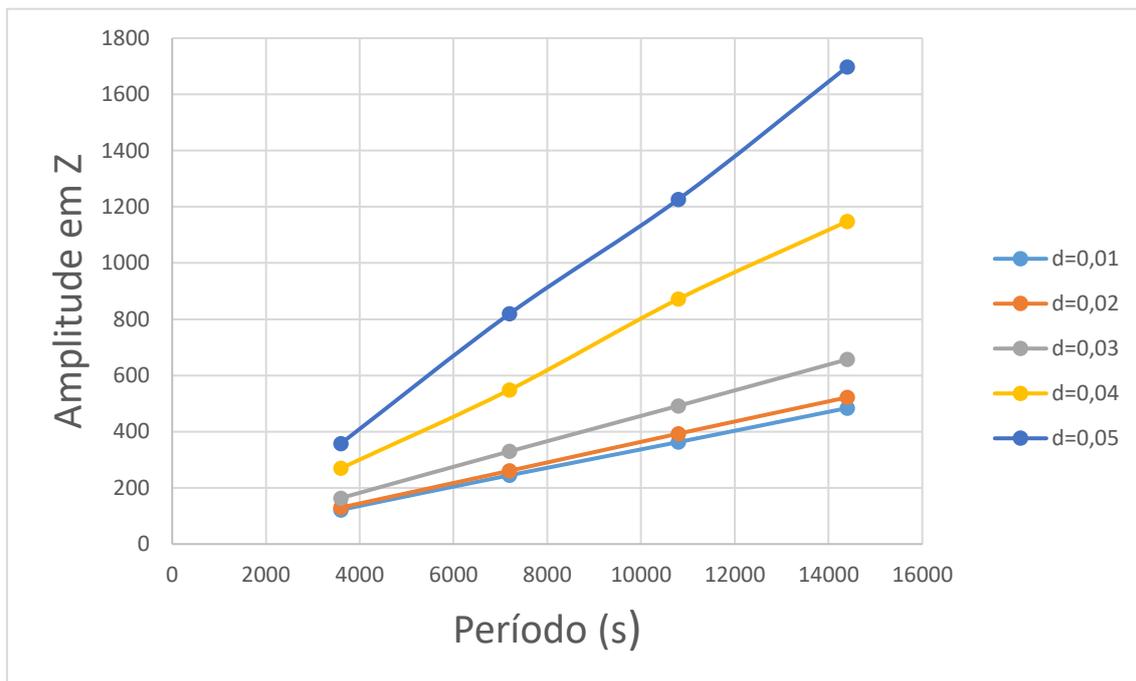
Um melhor entendimento da dinâmica do *glider* pode ser obtido ao se realizar uma análise paramétrica. Essa análise consiste na variação sistemática de um parâmetro da ‘lei de controle’, mantendo-se os demais fixos, de forma a entender melhor a influência desse parâmetro na dinâmica do veículo.

Os parâmetros estudados serão: a amplitude da força de empuxo aplicada (A_e); o deslocamento do contrapeso (d); o período de oscilação da manobra (P); e o ângulo de fase entre as forças aplicadas (φ). Nessa análise, apenas a primeira ‘lei de controle’ é considerada.

5.1 Período de oscilação

A análise do período de oscilação foi feita para uma fase relativa de 180° , entre as forças de empuxo e de binário aplicadas. Verifica-se que a amplitude do mergulho aumenta linearmente com o período. No entanto, a variação do período de oscilação não afeta a velocidade máxima atingida pelo veículo, nem a posição angular do *glider* ao longo da trajetória ou seu avanço total na direção x.

Gráfico 13 – Cotas de mergulho z (amplitude de mergulho), em função do período de acionamento, para diferentes deslocamentos do contrapeso, para a primeira ‘lei de controle’. Parâmetros: $A_e=10N$; d =variável; P =variável; $\varphi=180^\circ$.



Como ilustrado no Gráfico 13, a relação linear entre o período de acionamento e a amplitude de mergulho da manobra é mantida para diferentes deslocamentos máximos do contrapeso. A inclinação das retas obtidas é variável, no entanto. O mesmo resultado pode ser verificado para variação da amplitude de empuxo aplicado.

Fisicamente, é esperado que as velocidades-limite atingidas pelo *glider* em mergulhos com ângulo de ataque pequeno sejam muito semelhantes, posto que dependem do arrasto hidrodinâmico, que nesse caso apresenta pouca variação, por depender quadraticamente desse ângulo em torno do valor nulo. Desta forma, faz sentido que para um período maior de manobra o veículo seja capaz de realizar mergulhos mais profundos.

A movimentação do contrapeso define o momento total aplicado ao sistema e o ângulo de mergulho do *glider*. Diferentes ângulos de mergulho significam diferentes relações entre a distância percorrida nas direções x e z, o que provoca variação na inclinação das retas obtidas.

5.2 Amplitude de empuxo

Como verificado, a profundidade de mergulho varia linearmente com o período de oscilação da ‘lei de controle’, que será fixado em 7200 segundos para esta análise. Serão apresentados apenas os gráficos mais relevantes obtidos durante a análise paramétrica. Gráficos adicionais obtidos da análise paramétrica da amplitude de empuxo estão disponíveis no Apêndice D.

Analisando fisicamente o sistema, sabe-se que, como o centro de empuxo está posicionado acima do centro de massa, a atuação da força de empuxo variável cria também um braço de momento. De fato, verifica-se que o ângulo de rotação máximo obtido durante a trajetória cresce linearmente com o aumento da amplitude de empuxo, como mostrado no Gráfico 14. Como a posição do centro de empuxo é a mesma para todas as simulações, a inclinação das retas é bastante semelhante, considerando a variação do parâmetro d , que estabelece a amplitude de movimento relativo do contrapeso.

Gráfico 14 – Curvas de rotação máxima em γ , em função da amplitude de empuxo, para diferentes deslocamentos do contrapeso, para a primeira ‘lei de controle’. Parâmetros: A_e =variável; d =variável; $P=7200s$; $\varphi=180^\circ$.

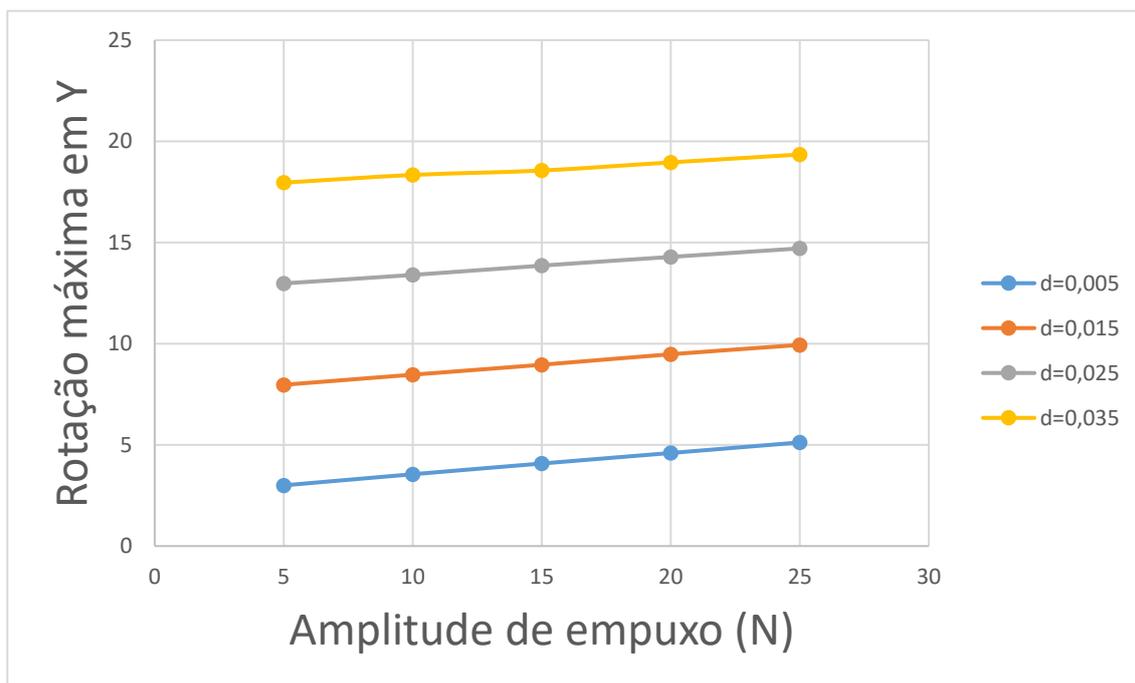
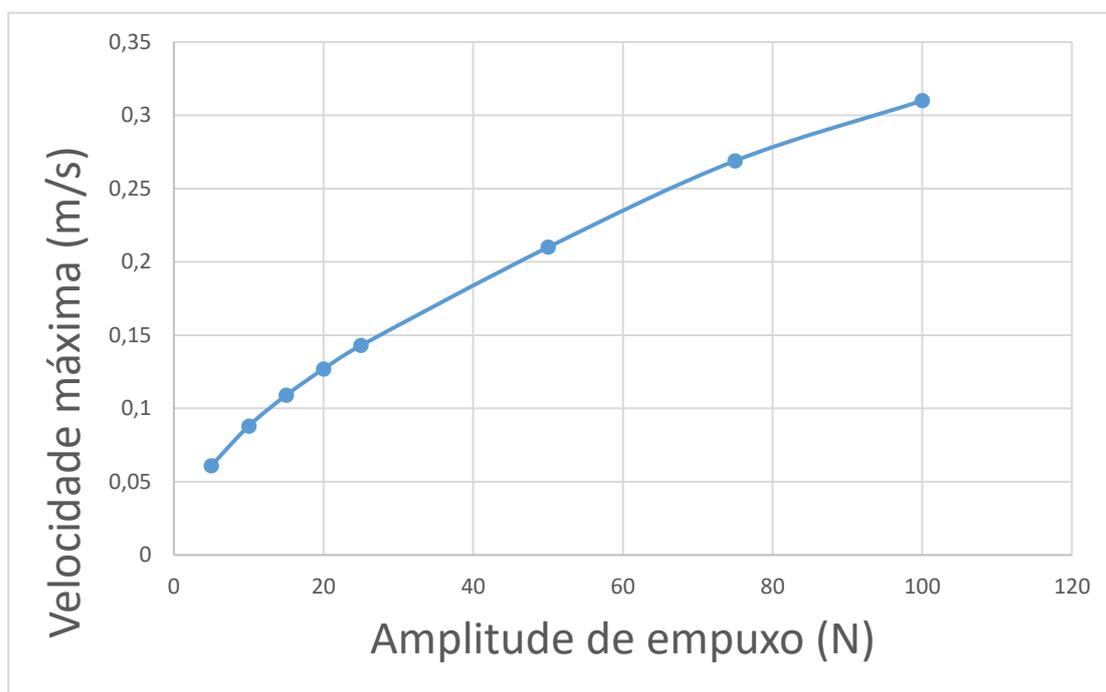


Gráfico 15 – Velocidade máxima atingida, para diferentes amplitudes de empuxo, para a primeira ‘lei de controle’. Parâmetros: A_e =variável; $d=0,005m$; $P=7200s$; $\varphi=180^\circ$.



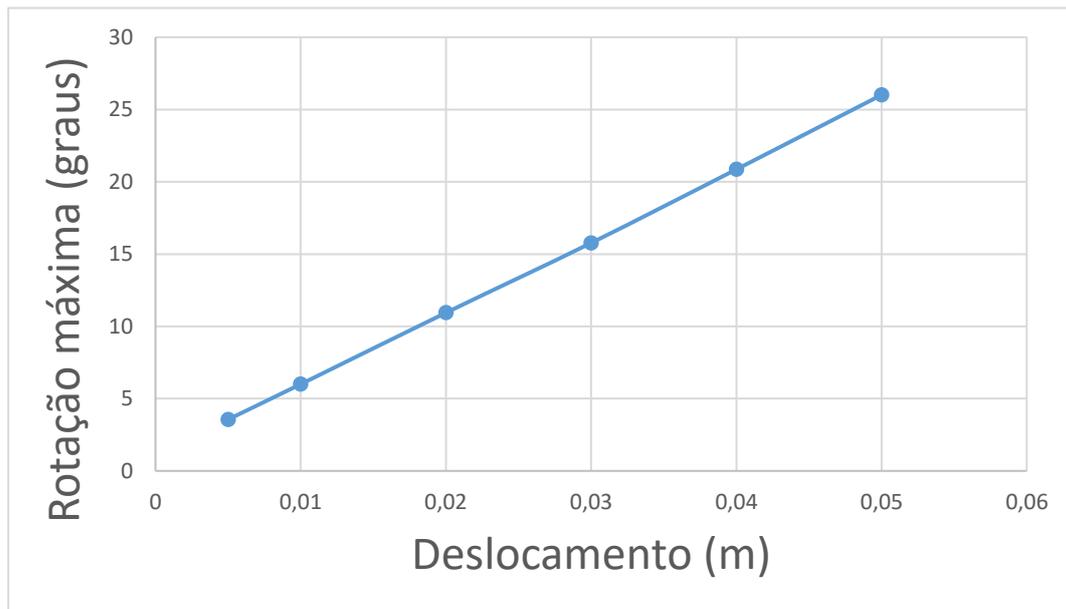
Naturalmente, a aplicação de maiores amplitudes de força e de binário faz com que o *glider* atinja velocidades-limite maiores. No entanto, as forças de arrasto hidrodinâmico são resistivas, crescendo com o quadrado da velocidade, de forma que a relação entre amplitude de empuxo aplicado e velocidade máxima não é linear, como apresentado no Gráfico 15. Observa-se que as velocidades-limite são inferiores a 0,35m/s, para os casos simulados, na ausência de correnteza marítima. De fato, *gliders* são veículos lentos e o efeito da correnteza marítima pode ser significativo, tema que deve ser abordado no futuro.

5.3 Deslocamento do contrapeso

Para esta análise, o período de oscilação foi mantido em 7200 segundos e o ângulo de fase foi mantido em 180° . Serão mostrados apenas os gráficos mais relevantes, estando os demais disponíveis no Apêndice E.

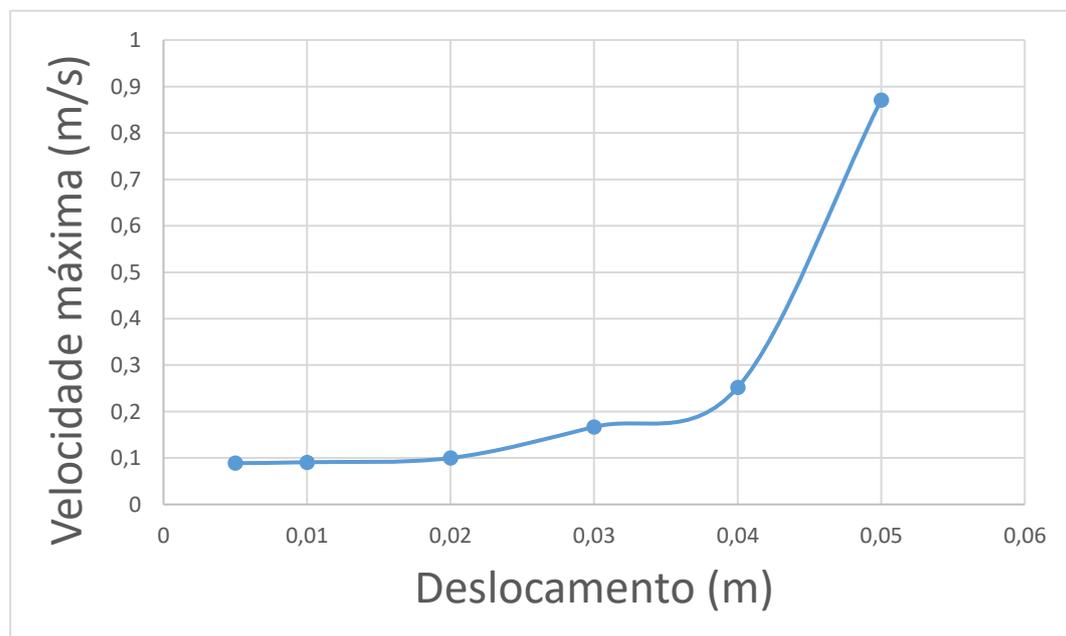
Pela forma da equação do binário aplicado M_0 , é esperado que a relação entre o deslocamento do contrapeso e a rotação máxima (ângulo de mergulho) atingida seja linear, como apresentado no Gráfico 16. A variação da amplitude de empuxo não afeta a inclinação da reta, mas a variação do ângulo de mergulho médio $\bar{\alpha}$ afeta.

Gráfico 16 – Rotação máxima atingida na direção y, para diferentes deslocamentos do contrapeso. Parâmetros: $A_e=10\text{N}$; $d=\text{variável}$; $P=7200\text{s}$; $\varphi=180^\circ$.



Os resultados das simulações indicam que a velocidade máxima atingida pelo *glider* durante a trajetória aumenta para deslocamentos maiores do contrapeso, como apresentado no Gráfico 17.

Gráfico 17 – Velocidade máxima atingida, para diferentes deslocamentos do contrapeso. Parâmetros: $A_e=10\text{N}$; $d=\text{variável}$; $P=7200\text{s}$; $\varphi=180^\circ$.



As velocidades muito baixas obtidas para deslocamentos pequenos do contrapeso, no entanto, devem ser vistas com ressalvas. Quando o contrapeso é pouco deslocado, o ângulo de mergulho do *glider* é pequeno, mas a intensidade das forças na direção vertical permanece a mesma, contribuindo para uma trajetória com maiores ângulos de ataque efetivo. Faz sentido físico que, para a geometria do *glider*, um aumento do ângulo de ataque resulte em forças resistivas de arrasto maiores e, portanto, velocidades totais menores. Deve ser lembrado, no entanto, que as equações de coeficientes hidrodinâmicos que foram utilizadas na presente análise são válidas apenas para ângulos de ataque pequenos. Portanto, seu uso com extrapolação para ângulos de ataque mais altos deve ser visto com critério. Na realidade, modelos de escoamento cruzado (*'cross-flow'*), válidos para ângulos de ataque próximos de noventa graus, podem ser utilizados, como forma de guiar possível extrapolação das curvas de coeficientes hidrodinâmicos.

6 Curvas de Operação

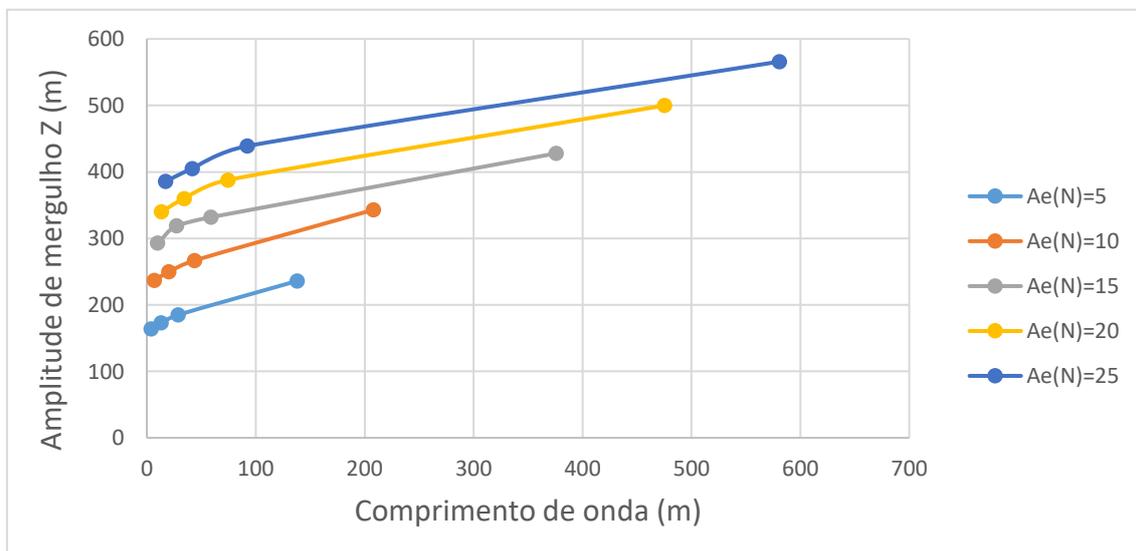
Embora a realização de uma análise paramétrica seja muito útil para o entendimento do comportamento dinâmico do *glider*, ela não é necessariamente de grande utilidade para o operador, que busca apenas controlar o *glider* de forma eficiente. Para o uso convencional do veículo, em manobras no plano vertical, os parâmetros operacionais de interesse são a amplitude de mergulho, o comprimento de onda (passo de avanço horizontal) e o período de retorno da trajetória.

Nesta seção, é apresentada uma curva de operação da qual é possível obter a relação entre comprimento de onda e amplitude de mergulho, para diferentes amplitudes de empuxo utilizadas na primeira 'lei de controle'. Dessa forma, conhecidos o comprimento de onda e a profundidade de mergulho desejados, o operador é capaz de obter a amplitude de empuxo que deve ser utilizada, através da interpolação entre as curvas. Para isso, está subentendido que é variável o deslocamento máximo do contrapeso. O resultado, para um período P igual a 7200 segundos, é apresentado no Gráfico 18.

Visto que variações do período de oscilação afetam a profundidade do mergulho, as curvas apresentadas no Gráfico 13, que já foram discutidas na análise paramétrica, servem como complemento para as curvas de operação, permitindo seu ajuste caso outros períodos de oscilação queiram ser utilizados.

É importante ressaltar que os pontos escolhidos para a construção das curvas de operação apresentadas no Gráfico 18 não são arbitrários. Para comprimentos de onda pouco acima do último ponto apresentado em cada curva, a trajetória do mergulho mostrou-se deteriorada.

Gráfico 18 – Cota de mergulho z (amplitude de mergulho), em função do comprimento de onda (passo de avanço), para diferentes amplitudes de empuxo aplicadas, para a primeira 'lei de controle'. Parâmetros: A_e =variável; d =variável; $P=7200$ s; $\varphi=180^\circ$.



Verifica-se que a aplicação de amplitudes de empuxo maiores permite que avanços periódicos maiores sejam atingidos antes que a trajetória se deteriore. Esse resultado é condizente com o que se sabe do projeto do *Slocum*, no qual a variação de posição do centro de massa tem como objetivo fazer os ajustes finos na manobra.

7 Síntese

O software OrcaFlex mostrou-se ferramenta capaz para estudo do comportamento de *gliders* submarinos e para simulações de manobras no plano vertical. A maioria dos resultados obtidos, a partir das simulações de trajetória, estão de acordo com aquilo que é fisicamente esperado e são úteis no entendimento de características menos evidentes da dinâmica desse tipo de veículo, como por exemplo a relação entre o movimento do contrapeso, a variação do empuxo e a estabilidade da manobra executada.

A impossibilidade de aplicação de uma ‘lei de controle’ em malha fechada através do software, entretanto, mostrou-se um fator limitante do modelo. Em especial, para o estudo de trajetórias com uma frequência relativamente alta ou com altas velocidades pois, dependendo dos parâmetros aplicados, a trajetória simulada pode se afastar em demasia daquela que fora projetada, em longos tempos de simulação.

Os resultados para a aplicação da ‘lei de controle’ (sem realimentação de estado) para trajetórias em ‘dente de serra’ mostraram-se satisfatórios. A obtenção, através do modelo OrcaFlex, do mesmo perfil de trajetória já obtido em outros trabalhos científicos (GRAVER, 2005), nos quais foram aplicados a mesma ‘lei de controle’ e um modelo dinâmico mais detalhado, que leve em consideração os efeitos inerciais ligados à movimentação do contrapeso e à expulsão de água na bexiga, é um bom indicativo da eficácia do modelo aplicado.

Próximos passos nesta linha de pesquisa seriam a realização de experimentos laboratoriais para determinação do posicionamento dos centros de massa e do empuxo do veículo, de forma a tornar os parâmetros de simulação os mais precisos possíveis. Também pode ser desenvolvido um modelo mais preciso para a dinâmica do *glider*, que leve em conta efeitos inerciais do deslocamento do contrapeso e do acionamento da bexiga, assim como pode-se fazer a expansão dos modelos para permitir o estudo de trajetória do *glider* no espaço tridimensional.

Os resultados das simulações no programa OrcaFlex e no novo modelo devem então ser comparados com dados coletados através de testes em campo com o veículo. Dessa forma, seria possível quantificar o erro associado à aplicação de cada modelo, para diferentes condições de operação, validando-os e avaliando sua aplicabilidade.

Em que pesem alguns bons resultados alcançados, este estudo preliminar mostrou claramente a necessidade da utilização de modelos dinâmicos com maior grau de sofisticação e da aplicação de ‘leis de controle’ com realimentação de estado.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, I. H.; VON DOENHOFF, A. E. Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil Data (Dover Books on Aeronautical Engineering). Dover Publications, 1959, 704 páginas.
- ARANHA, J. A. P. Estabilidade direcional e empenagem. Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009, 15 páginas.
- ASSI, G.; BRINATI, H.; et al. Applied Topics in Marine Hydrodynamics. São Paulo, Escola Politécnica da USP (EPUSP), 2016, 320 páginas.
- CHEN, Y.; CHEN, H.; et al. Hydrodynamic analyses of typical underwater gliders. Journal of Hydrodynamics, volume 27, 2015, pp. 556-561.
- DHANAK, M. R.; XIROS, N. I. (Editors). Handbook of Ocean Engineering. Springer International Publishing, 2016, 1345 páginas.
- DRELA, Mark. Flight Vehicle Aerodynamics. The MIT Press, 2014, 304 páginas.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; et al. Feedback Control of Dynamic Systems. Addison-Wesley Series in Electrical and Computer Engineering. Control Engineering. 3ª edição, Addison-Wesley, 1993, 778 páginas.
- GRAVER, J. G. Underwater Gliders: Dynamics, Control and Design. Department of Mechanical and Aerospace Engineering. Princeton University. 2005.
- HAMILL, Patrick. A Student's Guide to Lagrangians and Hamiltonians. New York, N.Y., Cambridge University Press, 2014, 186 páginas.
- HOERNER, S. F. Fluid-Dynamic Drag: Theoretical, experimental and statistical information. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2ª edição, Hoerner Fluid Dynamics, 1965, 500 páginas.
- IRSCHIK, H.; BELYAEV, A. K. (Editors). Dynamics of Mechanical Systems with Variable Mass. Part of the CISM International Centre for Mechanical Sciences book series (CISM, volume 557). Springer-Verlag Wien, 2014, 266 páginas.
- KAHN, P. B. Mathematical Methods for Scientists and Engineers: Linear and Nonlinear Systems. New York, N.Y., John Wiley and Sons, 1990, 470 páginas.
- KATZ, J.; PLOTKIN, A. Low-Speed Aerodynamics. Cambridge Aerospace Series (Book 13). 2ª edição, Cambridge University Press, 2001, 630 páginas.
- KOROTKIN, A. I. Added Masses of Ship Structures. Fluid Mechanics and Its Applications book series (FMIA, volume 88). Springer, Dordrecht, 2008, 401 páginas.
- LEWANDOWSKY, E. M. The Dynamics of Marine Craft: Maneuvering and Seakeeping. Advanced Series on Ocean Engineering (Book 22). 1ª edição, World Scientific Pub Co Inc, 2004, 411 páginas.
- LUST, Ethan; STEVENS, John. Autonomous Vehicle for Gathering Oceanographic Data in Littoral Regions. Engineering Design I. Preliminary Design Review Report. Chesapeake Baywatch, 2015, 81 páginas.
- MEIROVITCH, Leonard. Methods of Analytical Dynamics. Dover Civil and Mechanical Engineering Series. 29852ª edição, New York, N.Y., Dover Publications, 2010, 544 páginas.
- NEWMAN, J. N. Marine Hydrodynamics. The MIT Press, 1977, 432 páginas.
- OGATA, Katsuhiko. Engenharia de controle moderno. 5ª edição, São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2010, 822 páginas.
- ORCINA. OrcaFlex Software Documentation. Rev. May 2018.

PEDLOSKY, Joseph. Geophysical Fluid Dynamics. 2ª edição, Springer-Verlag New York, 1987, 710 páginas.

PESCE, C. P. Dinâmica dos Corpos Rígidos. Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009, 174 páginas.

PESCE, C. P.; CASTRO FILHO, B. M.; et al. Desenvolvimento de um glider nacional. Proposta de Projeto de P&D. EP/IO-USP/MB, 2017.

SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY. University of California San Diego. Spray Underwater Glider Description. Disponível em: <https://spray.ucsd.edu/pub/rel/info/spray_description.php>. Acesso em: 31 de maio de 2019.

SEQUOIA SCIENTIFIC. A LISST for gliders is in development. Disponível em: <<http://www.sequoiasci.com/about/news/lisst-glider-development/>>. Acesso em: 31 de maio de 2019.

TELEDYNE MARINE. Slocum G3 Glider. Disponível em: <<http://www.teledynemarine.com/slocum-glider>>. Acesso em: 31 de maio de 2019.

TELEDYNE WEBB RESEARCH. Slocum G2 Glider Operators Manual. P/N 4343, Rev. B. East Falmouth, MA, 2012, 184 páginas.

WHITE, Frank. Fluid Mechanics. 8ª edição, McGraw-Hill Education, 2015, 864 páginas.

WHOI UNDERWATER GLIDER OPERATIONS. Slocum. Disponível em: <<http://gliders.who.edu/instrumentation/slocum/>>. Acesso em: 31 de maio de 2019.

WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION PAGE. Disponível em: <<https://www.who.edu/>>. Acesso em: 31 de maio de 2019.

Title – A study of *glider* dynamics – underwater vehicle for oceanographic monitoring

Abstract – This article aims to explore the construction of a computational model for the representation of the dynamics of an underwater *glider*, using the software OrcaFlex. Through the obtained results, it is discussed the model validity and its advantages and limitations as a tool for *glider* project development.

Keywords – Glider; Dynamics; Simulation

Bruno de Barros Feitosa, estudante de engenharia mecatrônica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), teve apoio como bolsista FAPESP no desenvolvimento de seu projeto de pesquisa.

APÊNDICE A – TESTES INICIAIS

Exemplo 1:Posição do centro de massa: $X_{cg} = 0,02$ e $Z_{cg} = -0,005$;Posição do centro de empuxo: $X_e = 0,02$ e $Z_e = 0,015$.

Gráfico 19 – Rotação em y.

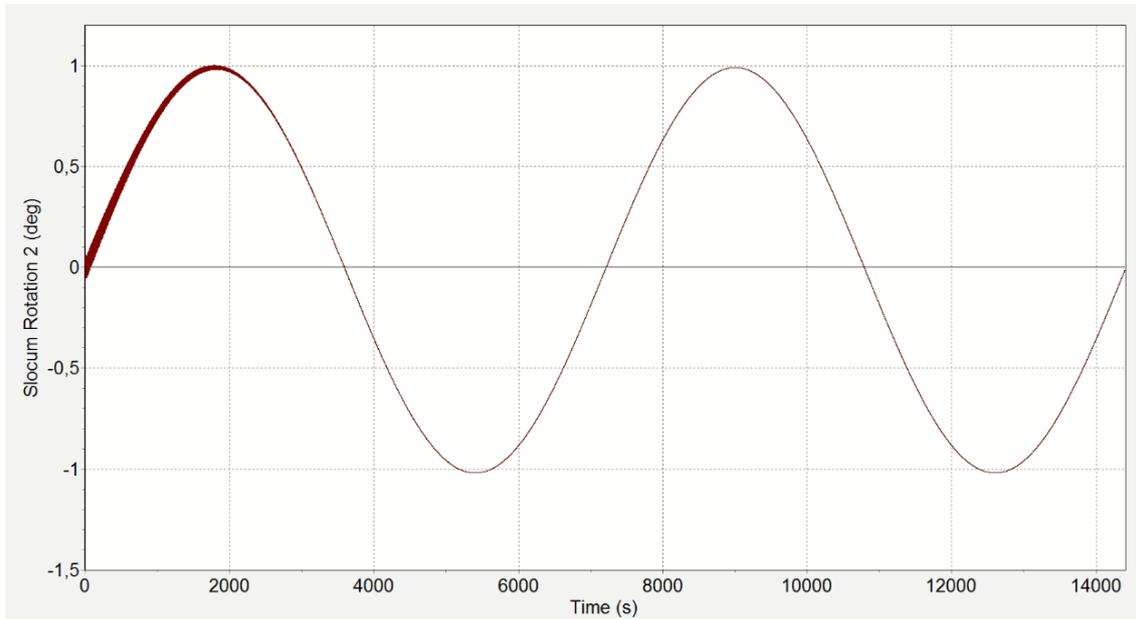


Gráfico 20 – Posição em x.

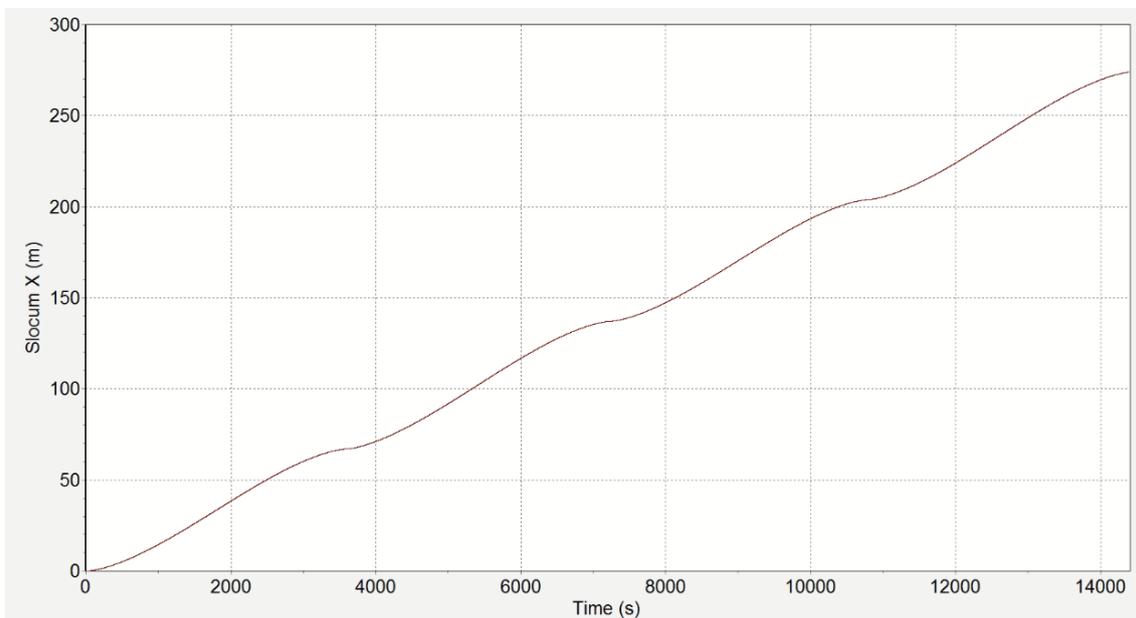


Gráfico 21 – Posição em z.

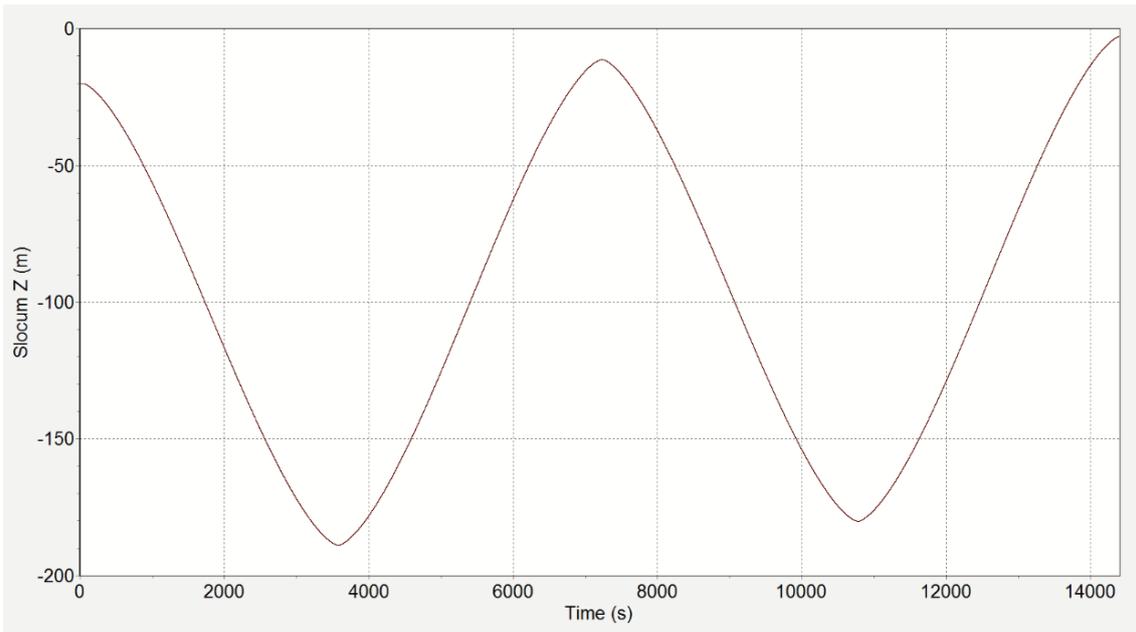
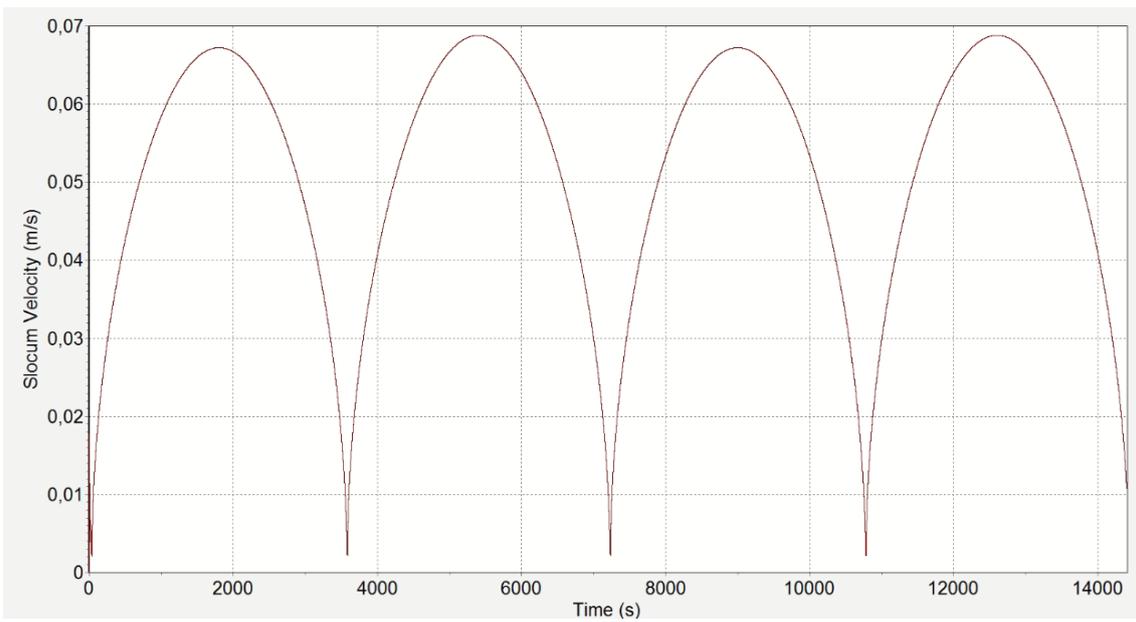


Gráfico 22 – Velocidade.



Exemplo 2:Posição do centro de massa: $X_{cg} = 0$ e $Z_{cg} = -0,005$;Posição do centro de empuxo: $X_e = 0$ e $Z_e = 0,015$.

Gráfico 23 – Rotação em y.

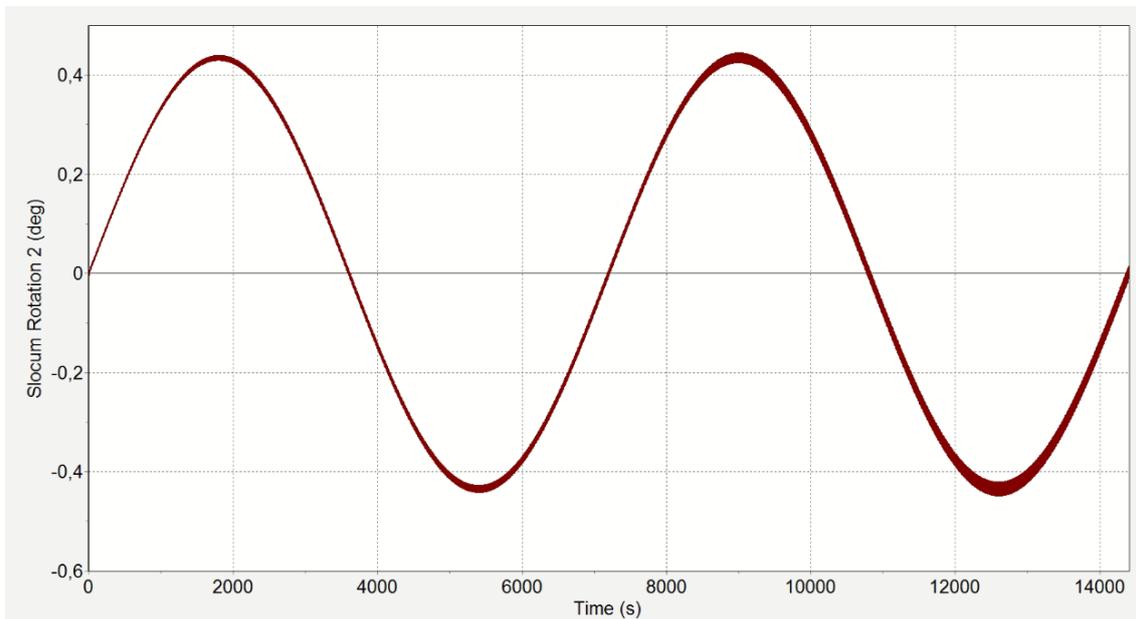


Gráfico 24 – Posição em x.

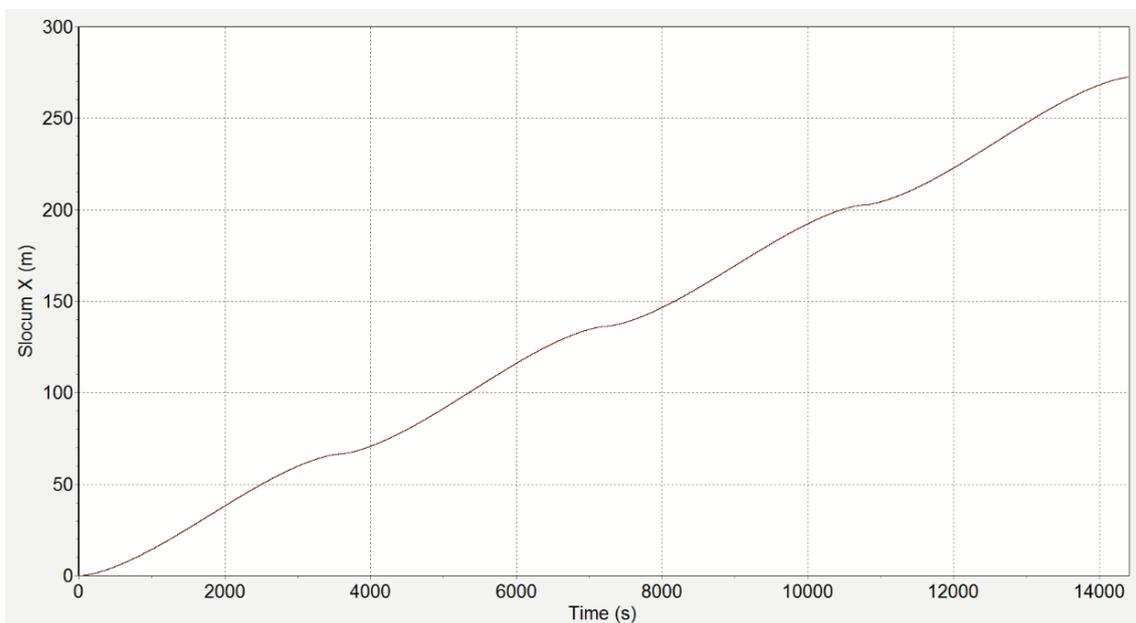


Gráfico 25 – Posição em z.

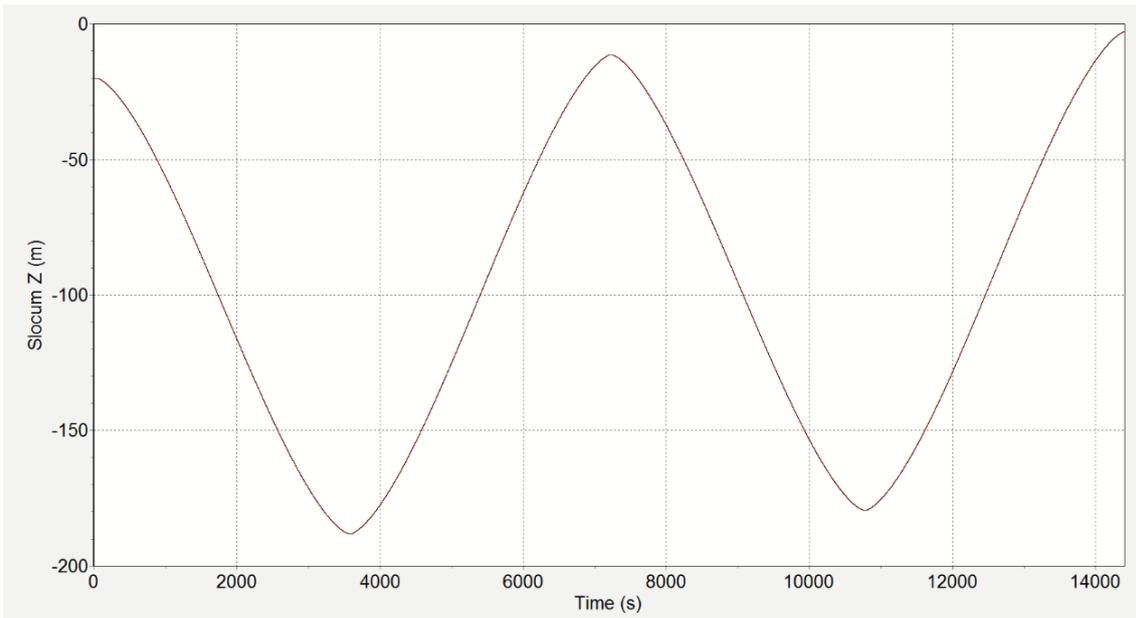
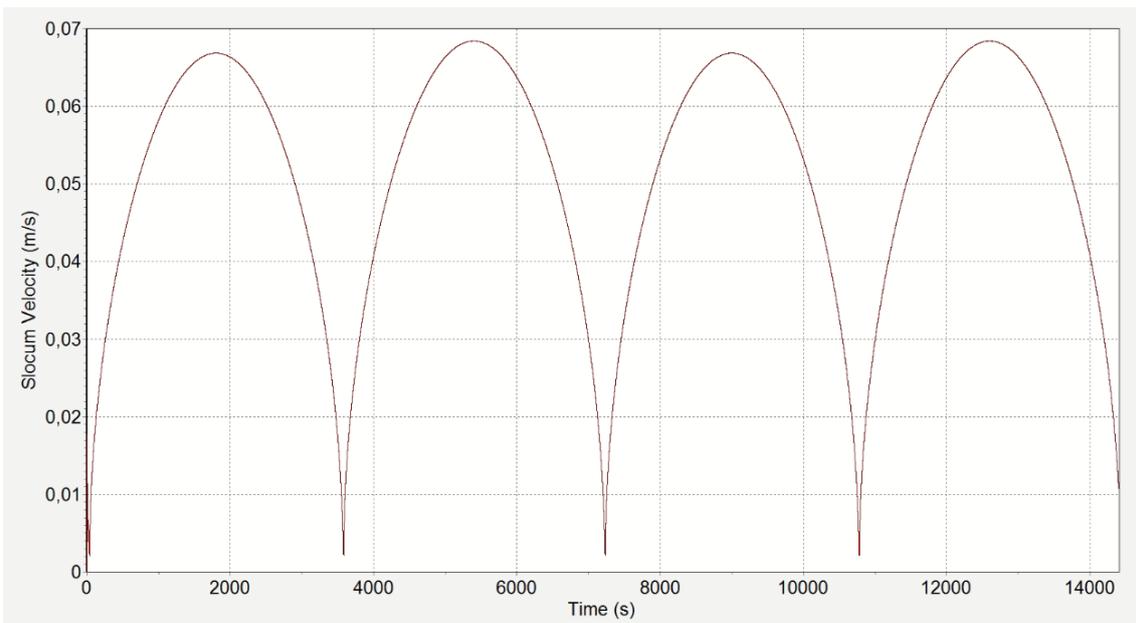


Gráfico 26 – Velocidade.



APÊNDICE B – 1ª LEI DE CONTROLE

Parâmetros: $A_e=10N$; $d=0,01m$; $P=7200s$; $\varphi=180^\circ$.

Gráfico 27 – Rotação em y.

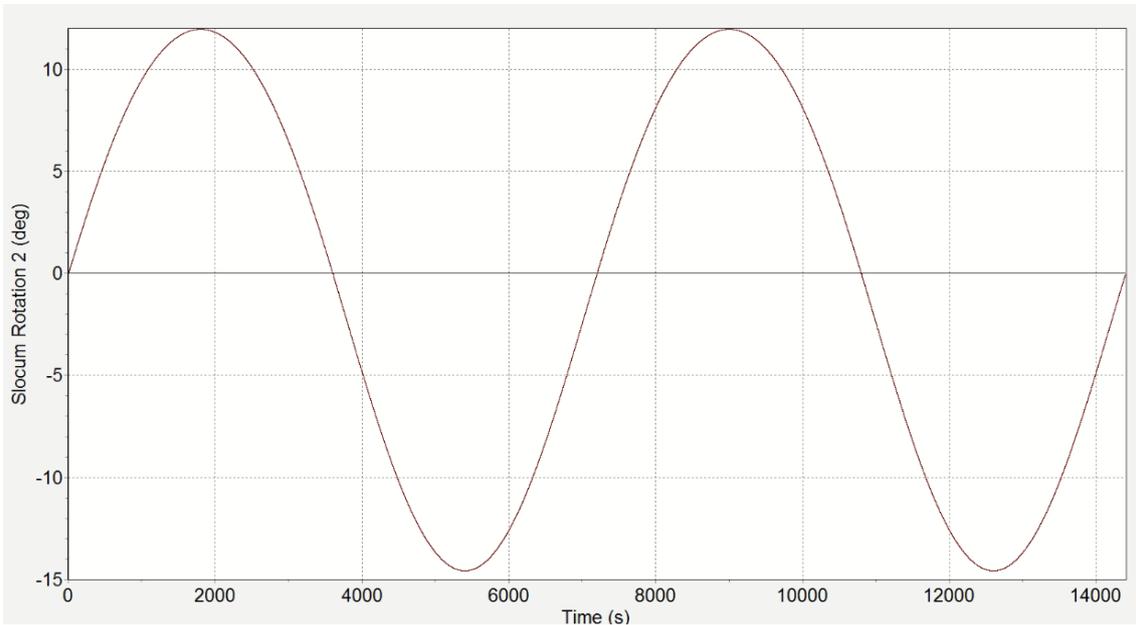


Gráfico 28 – Posição em x.

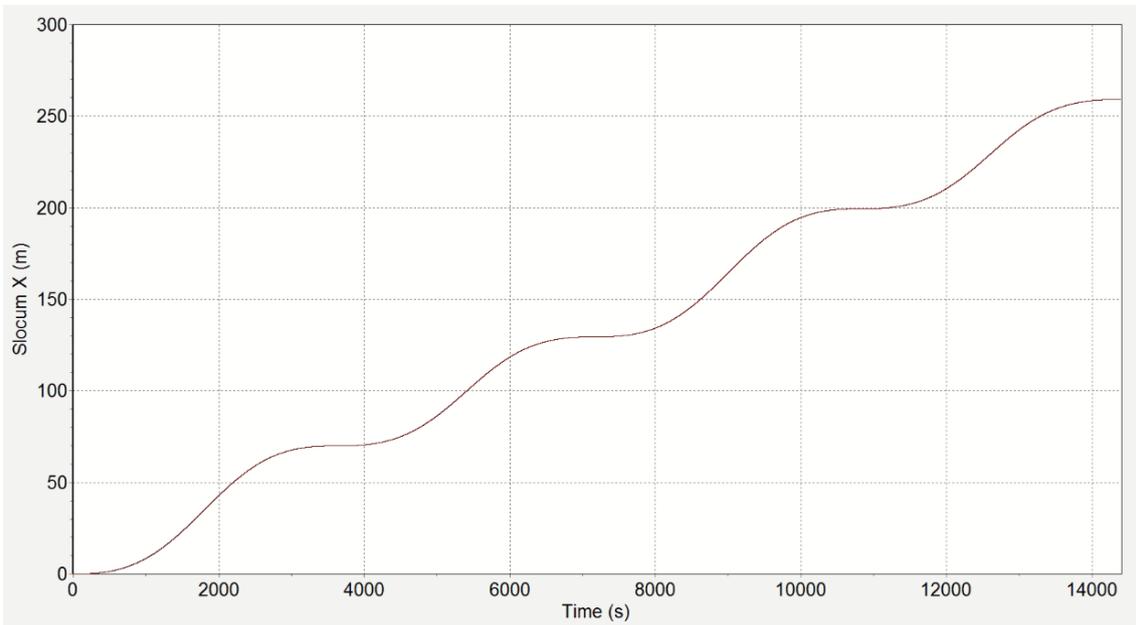


Gráfico 29 – Posição em z.

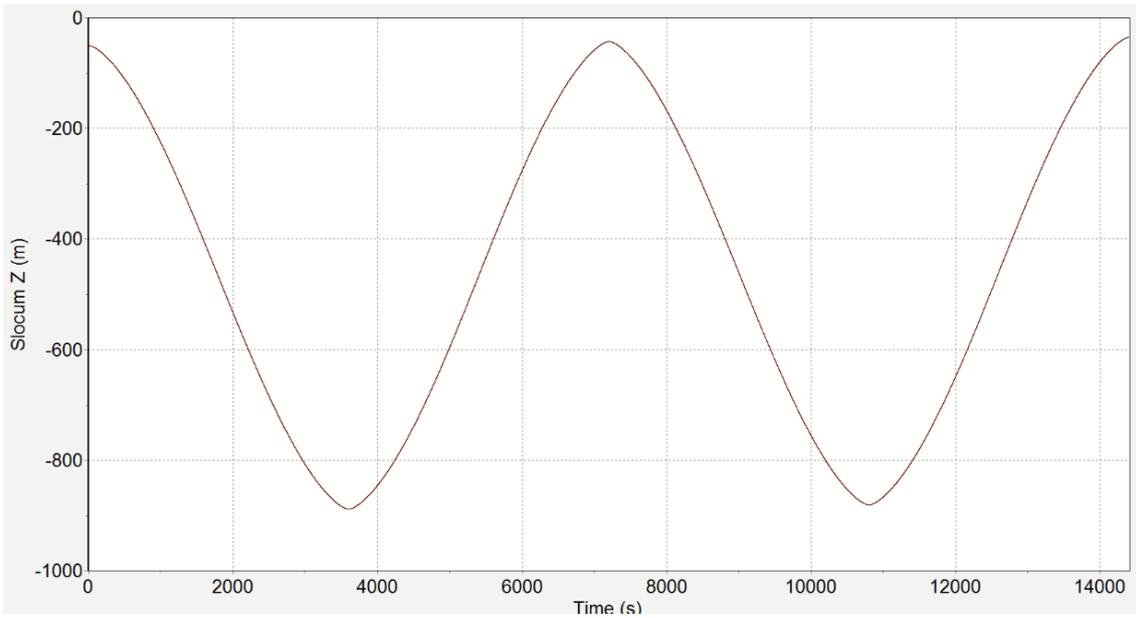
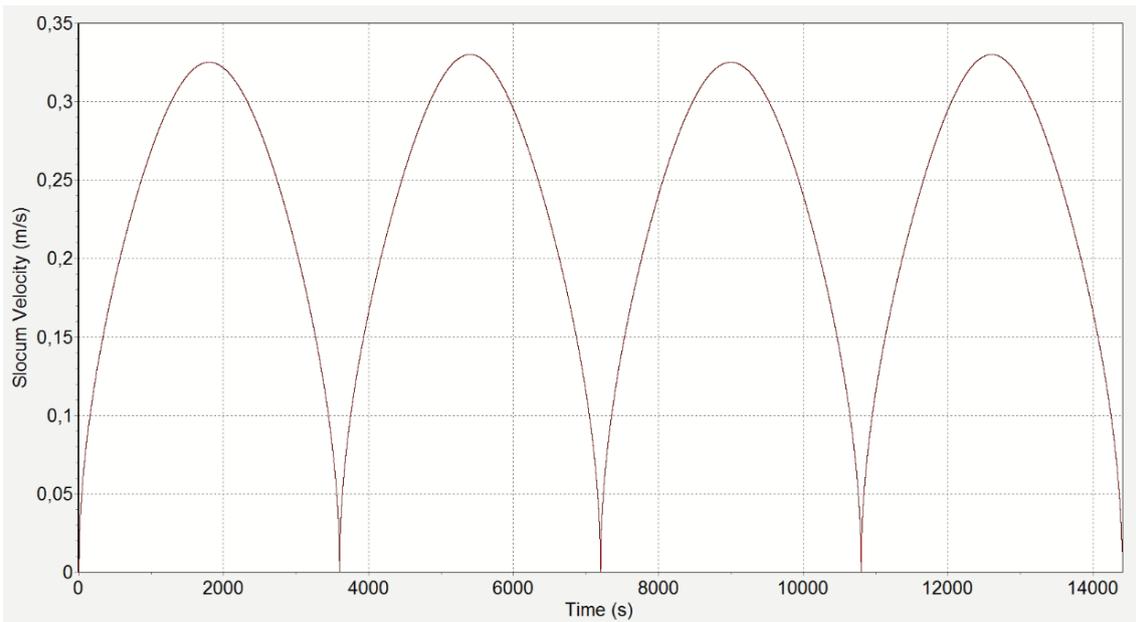


Gráfico 30 – Velocidade.



APÊNDICE C – 2ª LEI DE CONTROLE

Parâmetros: $A_e=10N$; $d=0,01m$; $P=7200s$; $\varphi=180^\circ$.

Gráfico 31 – Rotação em y.

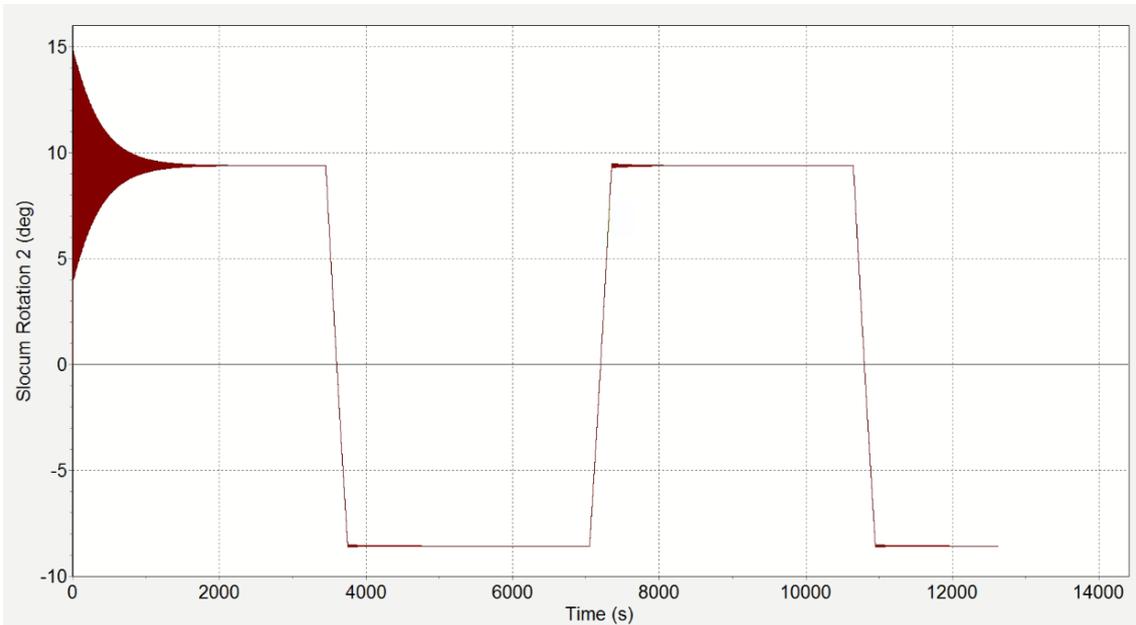


Gráfico 32 – Posição em x.

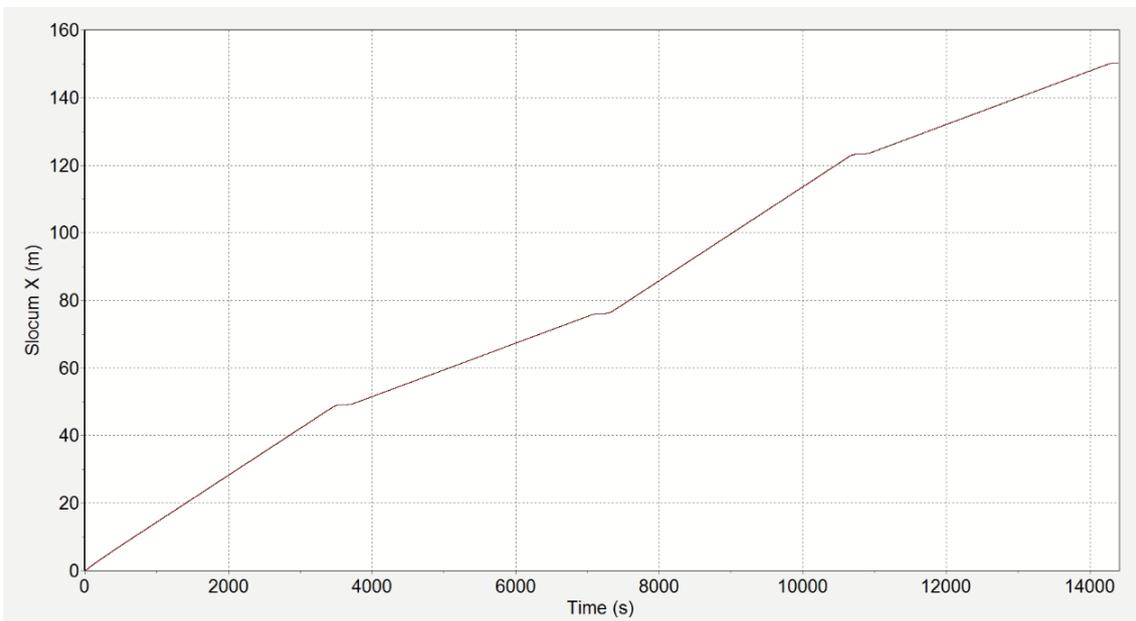


Gráfico 33 – Posição em z.

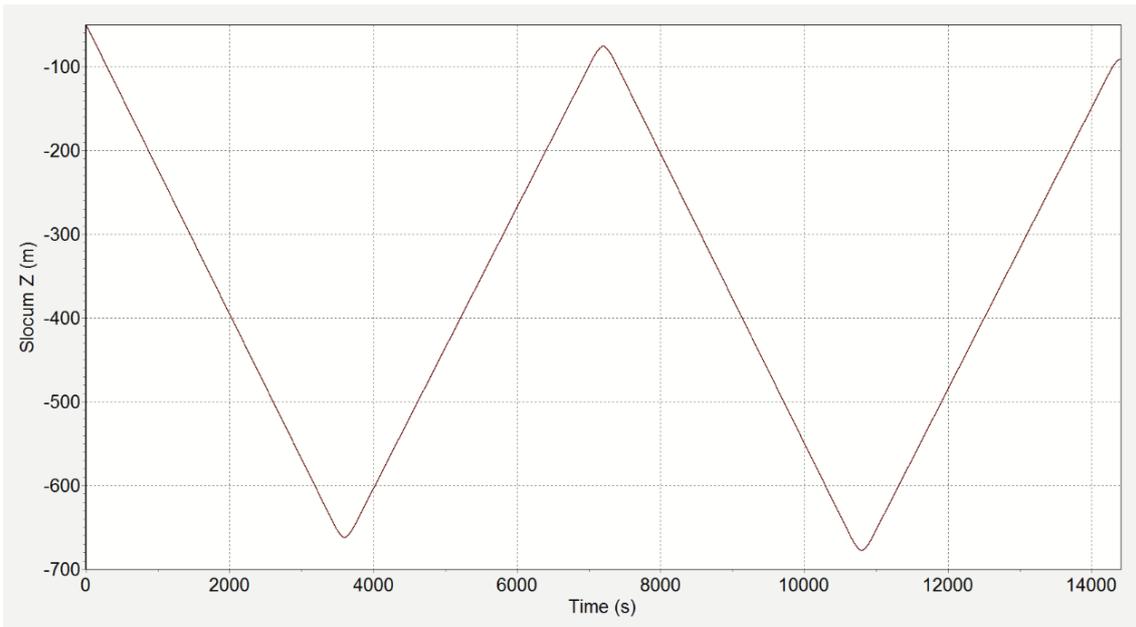
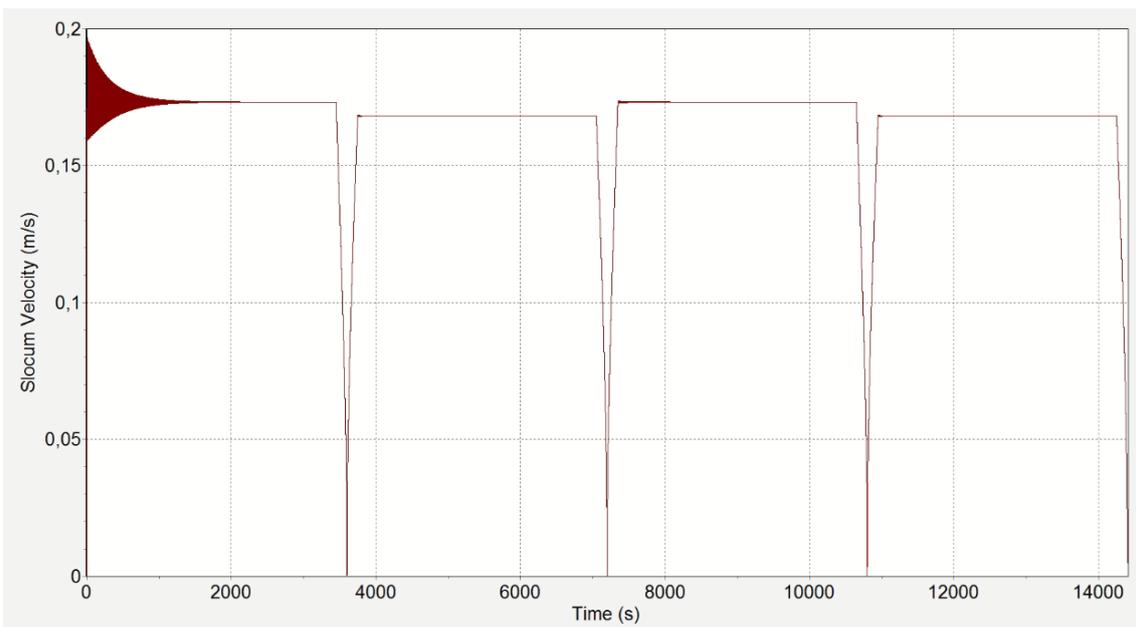


Gráfico 34 – Velocidade.



APÊNDICE D – AMPLITUDE DE EMPUXO

Gráfico 35 – Distância percorrida ao longo de x, por deslocamento máximo do contrapeso.

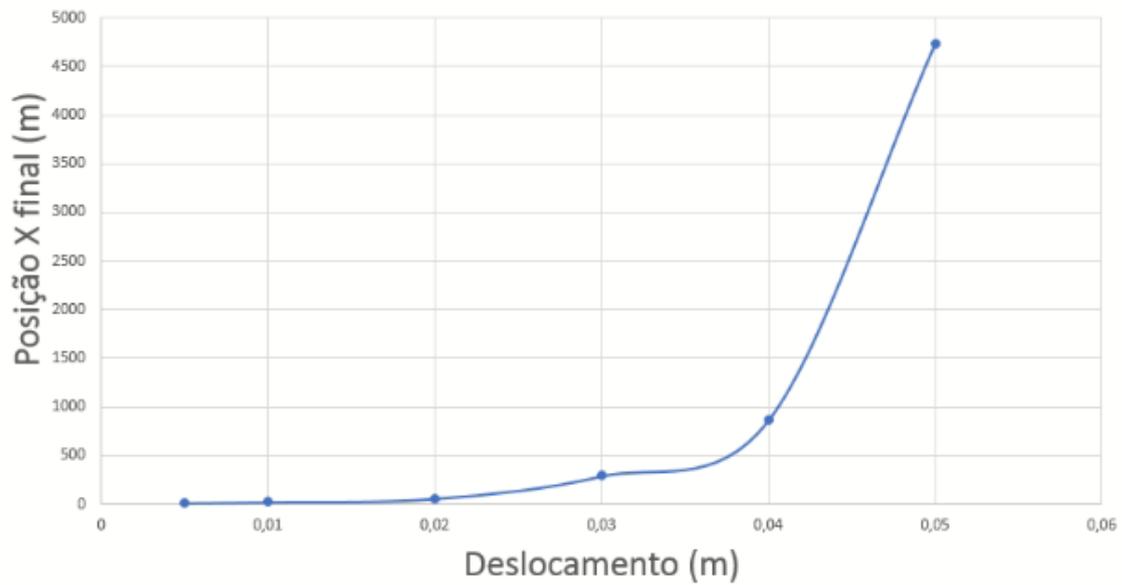
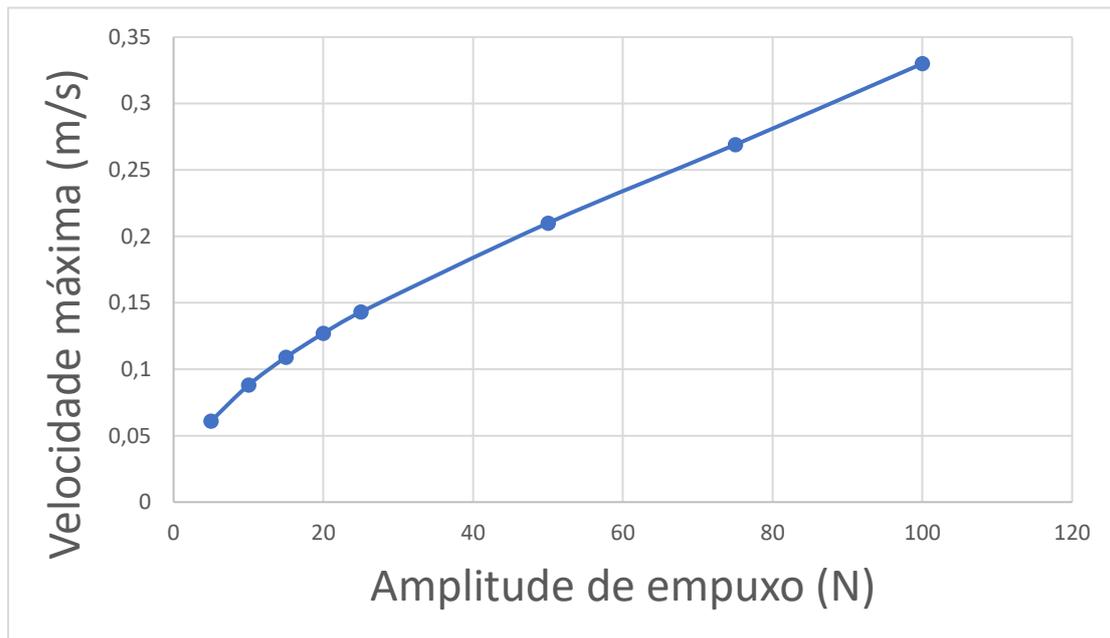


Gráfico 36 – Velocidade máxima atingida, por amplitude de empuxo aplicado.



APÊNDICE E – DESLOCAMENTO DO CONTRAPESO

Gráfico 37 – Rotação máxima em y, por deslocamento máximo do contrapeso.

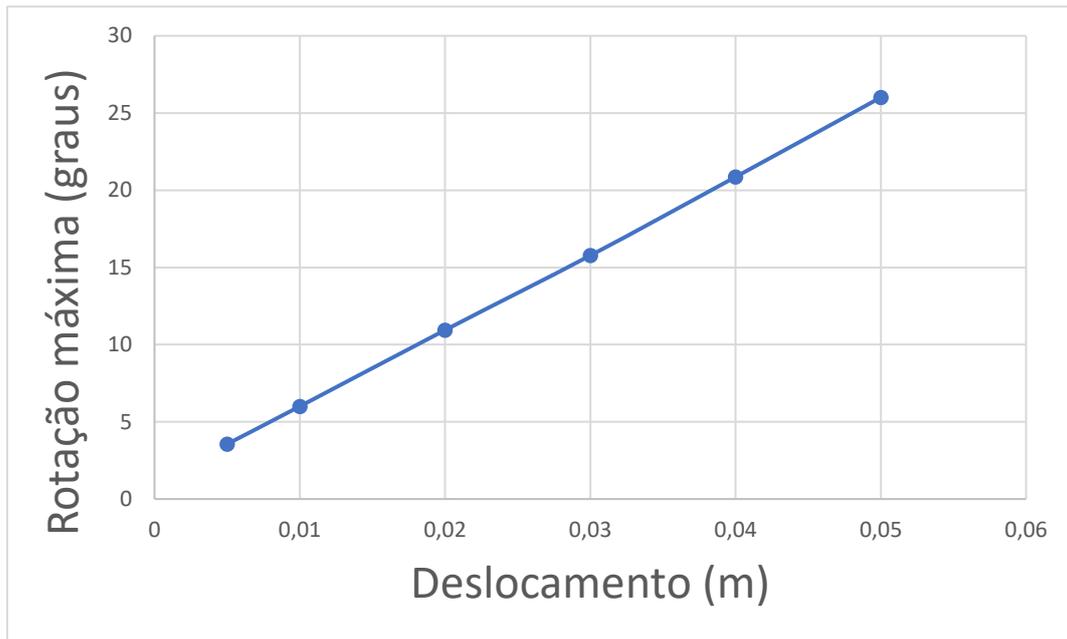
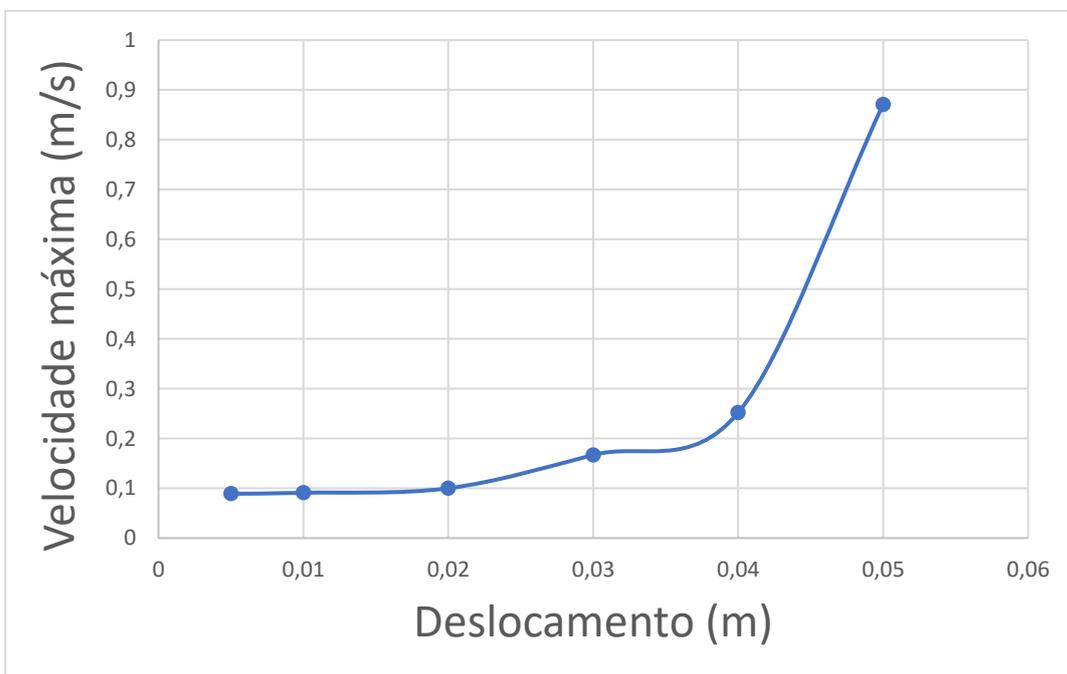


Gráfico 38 – Velocidade total máxima atingida, por deslocamento máximo do contrapeso.



APÊNDICE F – FASE

Gráfico 39 – Rotação máxima em y, por ângulo de fase entre forças aplicadas.

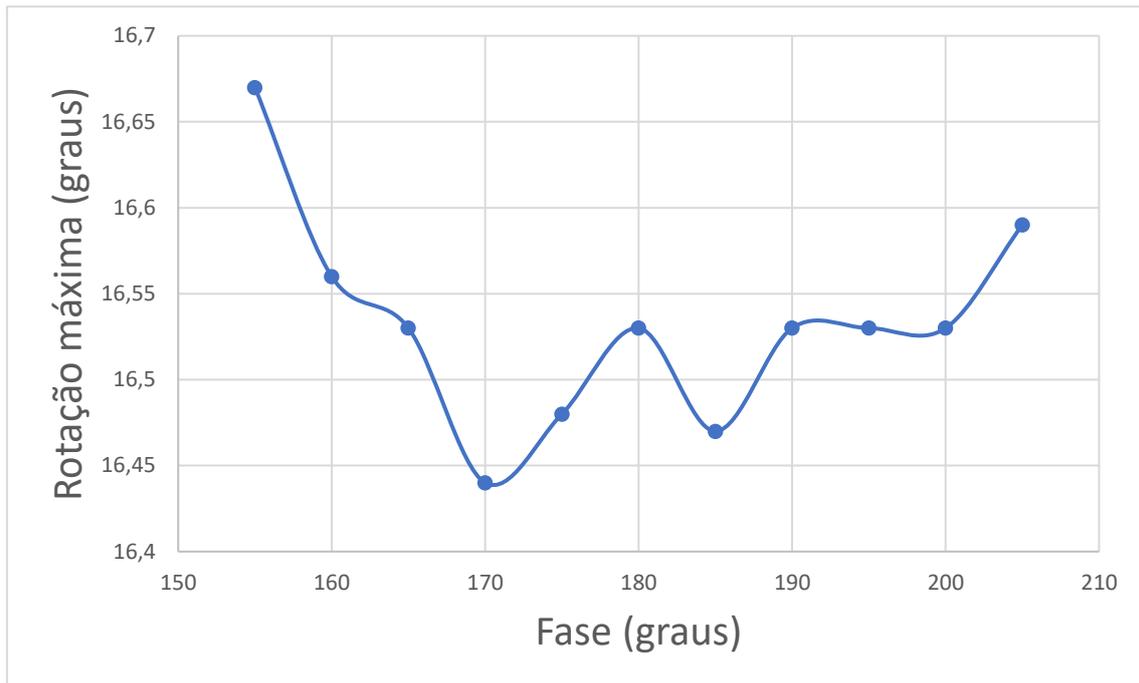


Gráfico 40 – Cotas de mergulho z (amplitude de mergulho), por ângulo de fase entre forças aplicadas

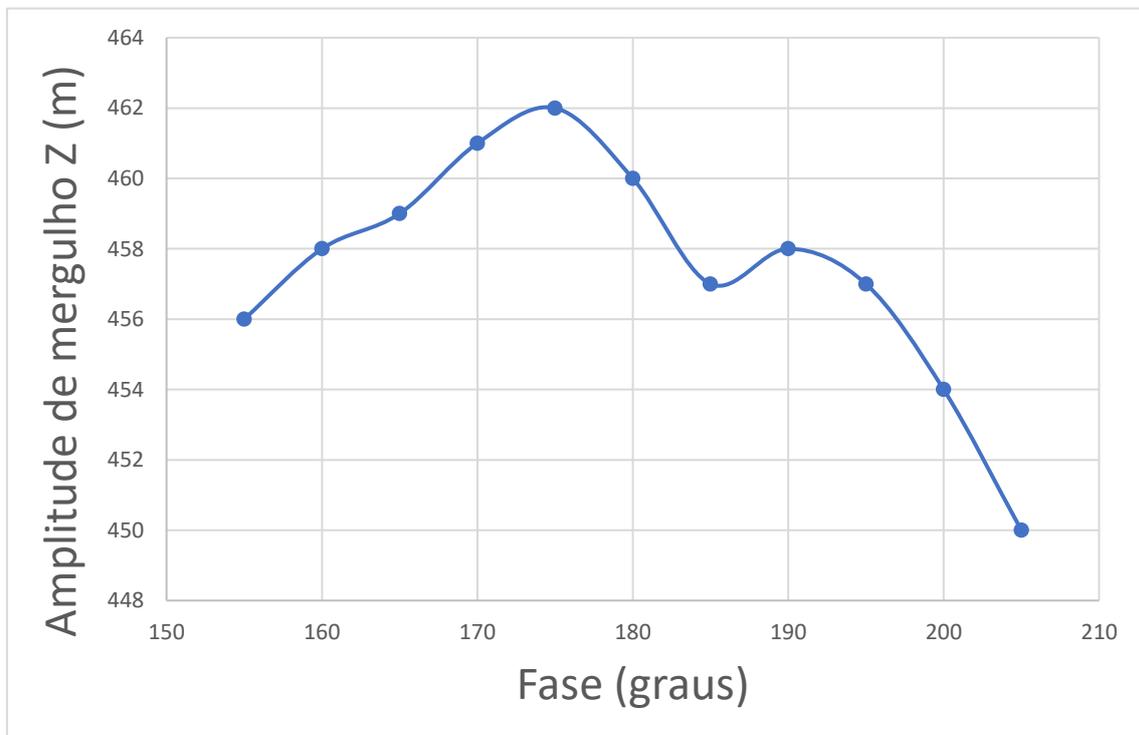


Gráfico 41 – Velocidade total máxima atingida, por ângulo de fase entre forças aplicadas.

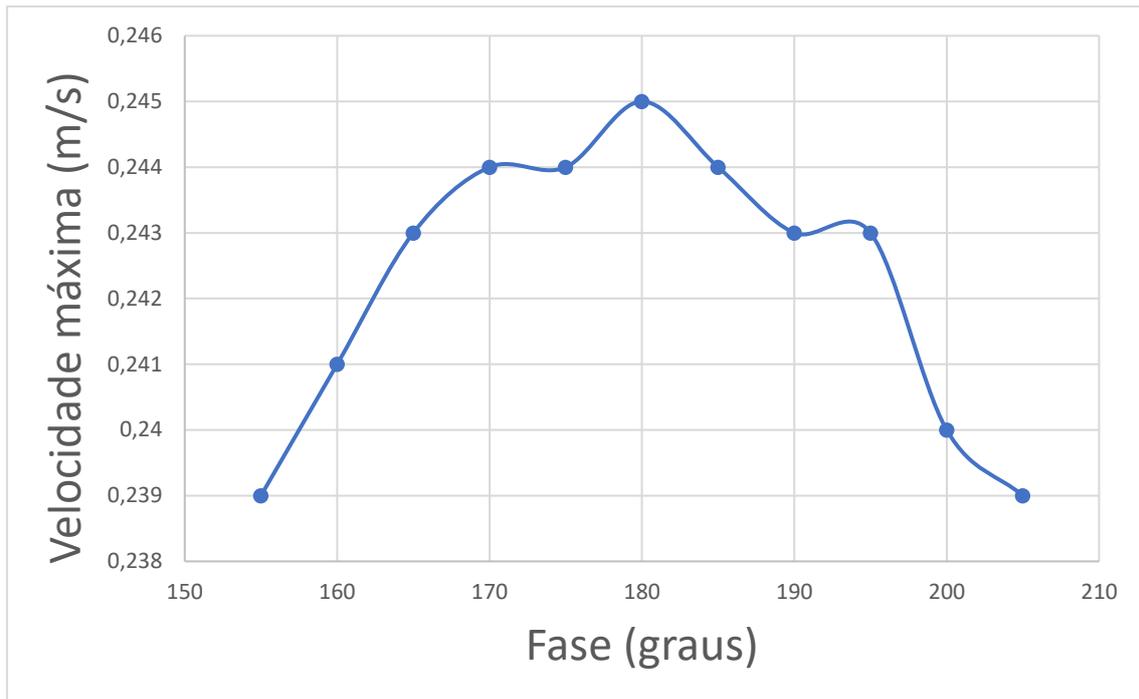
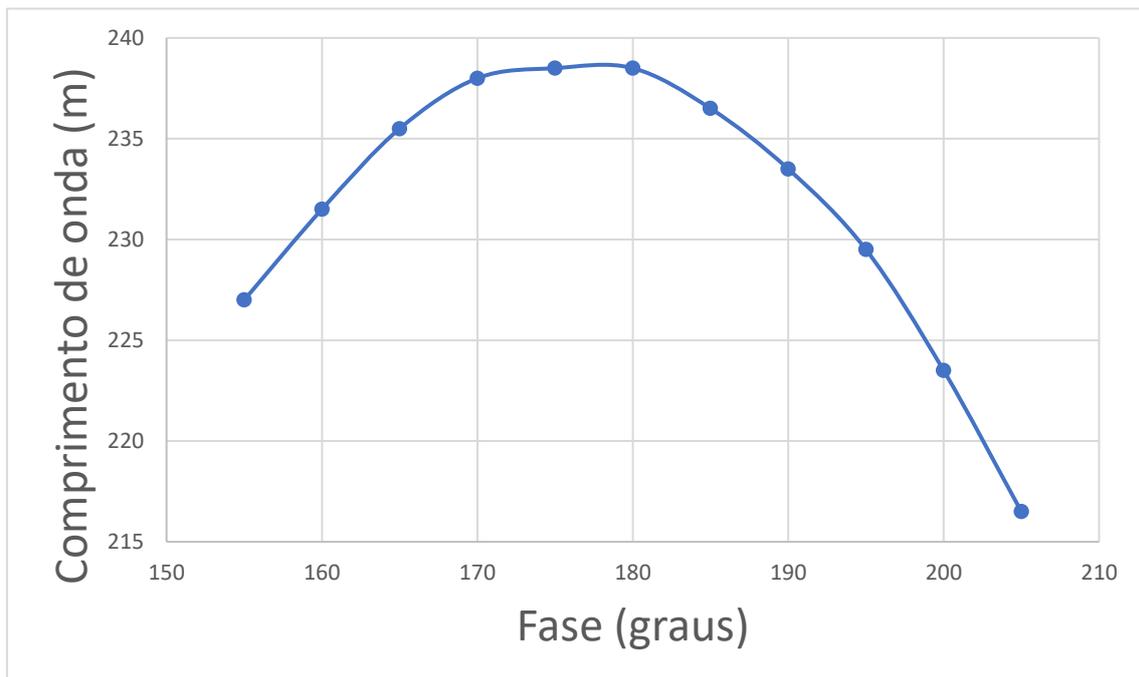


Gráfico 42 – Comprimento de onda do mergulho, por ângulo de fase entre forças aplicadas.



APÊNDICE G – EXEMPLOS DE SIMULAÇÕES INSTÁVEIS

Gráfico 43 – Exemplo para a primeira ‘lei de controle’. Parâmetros: $A_e=50N$; $d=0,05m$; $P=7200s$; $\varphi=180^\circ$.

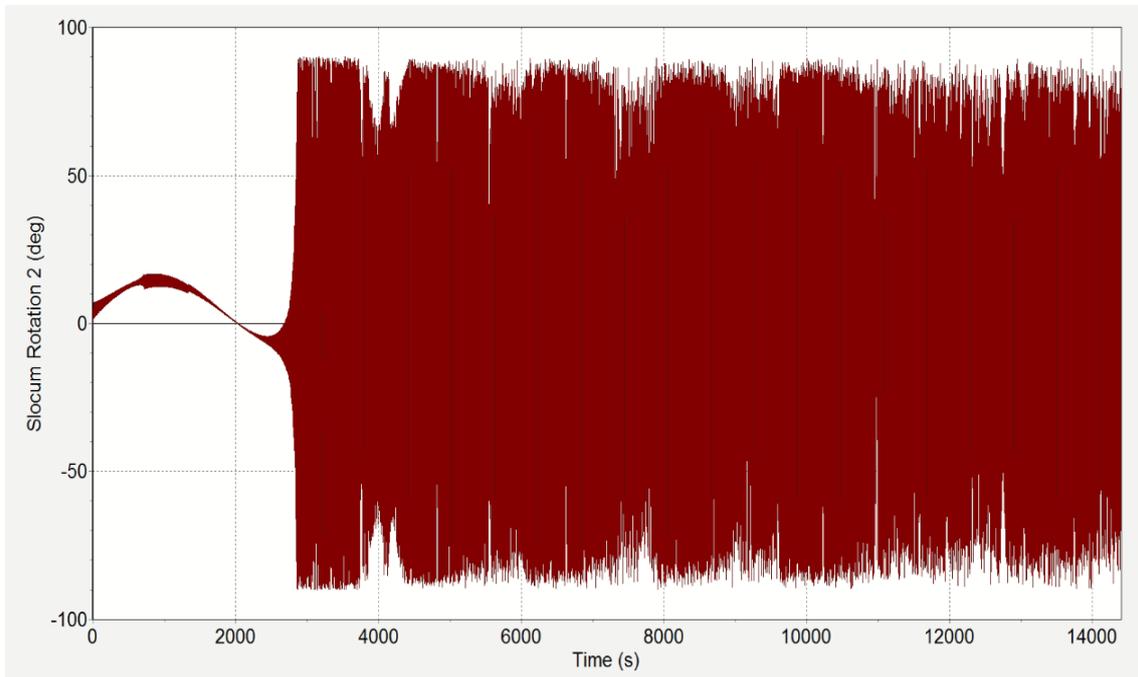


Gráfico 44 – Exemplo para a primeira ‘lei de controle’. Parâmetros: $A_e=10N$; $d=0,06m$; $P=7200s$; $\varphi=180^\circ$.

