

## UM PROCEDIMENTO NUMÉRICO EXPEDITO PARA REPRESENTAÇÃO DE TURRETS NA ANÁLISE ACOPLADA DE MOVIMENTOS DE SISTEMAS FLUTUANTES OFFSHORE

Fabrizio Nogueira Corrêa<sup>a</sup>, Breno Pinheiro Jacob<sup>b</sup>, Carl Horst Albrecht<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Centro de Tecnologia, UFRJ, Cidade Universitaria, Ilha do Fundao – RJ, Bloco I, Sala 120 Subsolo, Cep 21949900, Caixa Postal 68506, Brasil, [fabrizio@lamcso.coppe.ufrj.br](mailto:fabrizio@lamcso.coppe.ufrj.br), <http://www.lamcso.coppe.ufrj.br>

<sup>b</sup>Centro de Tecnologia, UFRJ, Cidade Universitaria, Ilha do Fundao – RJ, Bloco I, Sala 120 Subsolo, Cep 21949900, Caixa Postal 68506, Brasil, [breno@lamcso.coppe.ufrj.br](mailto:breno@lamcso.coppe.ufrj.br), <http://www.lamcso.coppe.ufrj.br>

<sup>c</sup>Centro de Tecnologia, UFRJ, Cidade Universitaria, Ilha do Fundao – RJ, Bloco I, Sala 120 Subsolo, Cep 21949900, Caixa Postal 68506, Brasil, [carl@deg.ee.ufrj.br](mailto:carl@deg.ee.ufrj.br), <http://www.lamcso.coppe.ufrj.br>

**Keywords:** Sistemas Offshore, Turret, Análise Acoplada.

**Abstract.** This work presents an expedite and efficient numerical tool to model turret-based mooring systems. Such systems are employed in oil production offshore platforms, known as FPSO (Floating Production, Storage and Offloading units). The turret allows aligning the ship with the wind, wave and current resultant force components, decreasing the horizontal displacement of the hull and consequently the tensions of the mooring systems.

Nowadays, traditional simulation programs for offshore systems are not prepared to consider appropriately the purpose of the turrets; the numerical models are usually built to consider the center of the turret as a unique connection to the ship, in which all the anchor lines and risers are connected. This allow the yaw motion to not twist the lines, keeping the turret function, but on the other hand does not consider strictly the actual position of the top connection (disposed in a polar way, with radii that can exceed 5m). That means that the moments evaluated by the top tension of the lines with the longitudinal and transversal axes of the ship cannot be correct. Besides, with the top connections in a single point the numerical coupled model does not ensure that the configuration of the lines represents accurately that ones installed in the oil production field, decreasing the quality of the mooring design. The coupled numerical tool presented in this work is prepared to deal adequately with the turret system, allowing considering the real coordinates of the top line connections, helping to improve the quality of the mooring designs. This work shows the numerical formulation implemented, and compares these two modeling procedures in a case study of FPSO turret system submitted to environmental conditions.

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas *offshore* compreendem unidades marinhas de exploração, produção e/ou armazenamento de petróleo. Eles podem ser fixos, tais como: jaquetas; plataformas auto-elevatórias; torre estaiada; torre Gamma; torre Roseau; torre Delta; ou flutuantes, tais como: Plataforma semi-submersível, plataforma de pernas tensionadas (TLP), e navios ancorados. A descrição de cada tipo de plataforma pode ser encontrada em (Chakrabarti, 1987).

O uso de unidades flutuantes é cada vez mais freqüente. O posicionamento destas unidades é garantido através de um sistema de ancoragem. As linhas de ancoragem podem ter uma composição homogênea ou heterogênea, podendo incluir amarras, cabos de aço e cabos sintéticos (poliéster). Existem vários modelos de configuração de linhas possíveis para a utilização em ancoragem de estruturas *offshore*. De acordo com a geometria da linha, podem ser encontradas ancoragens em catenária convencional, tipo *tautleg* (retesada) e ancoragem vertical (utilizando tendões). O critério de escolha do tipo de ancoragem dependerá principalmente do tipo da embarcação, lâmina d'água, número de *risers*, tipo de operação e custo.

De acordo com o arranjo das linhas em torno da plataforma, podem ser definidos dois tipos de sistemas de ancoragem: em ponto único SPM (*Single Point Mooring*) e com quadro de ancoragem SM (*Spread Mooring*). O sistema *Turret*, que é o foco de atenção deste trabalho, é um exemplo de SPM, podendo ser aplicado a navios FPSOs (Floating Production Storage and Offloading).

O *turret* (Figura 1) pode ser entendido com um grande eixo vertical localizado na proa do navio, sendo responsável pela ligação do casco ao sistema de ancoragem e interligação das linhas de produção (*risers*) com a planta de processo. Este sistema permite um giro livre do navio para mantê-lo sempre aporado de acordo com a resultante das componentes de força de onda, vento e corrente, diminuindo assim o carregamento ambiental sobre o casco da embarcação.

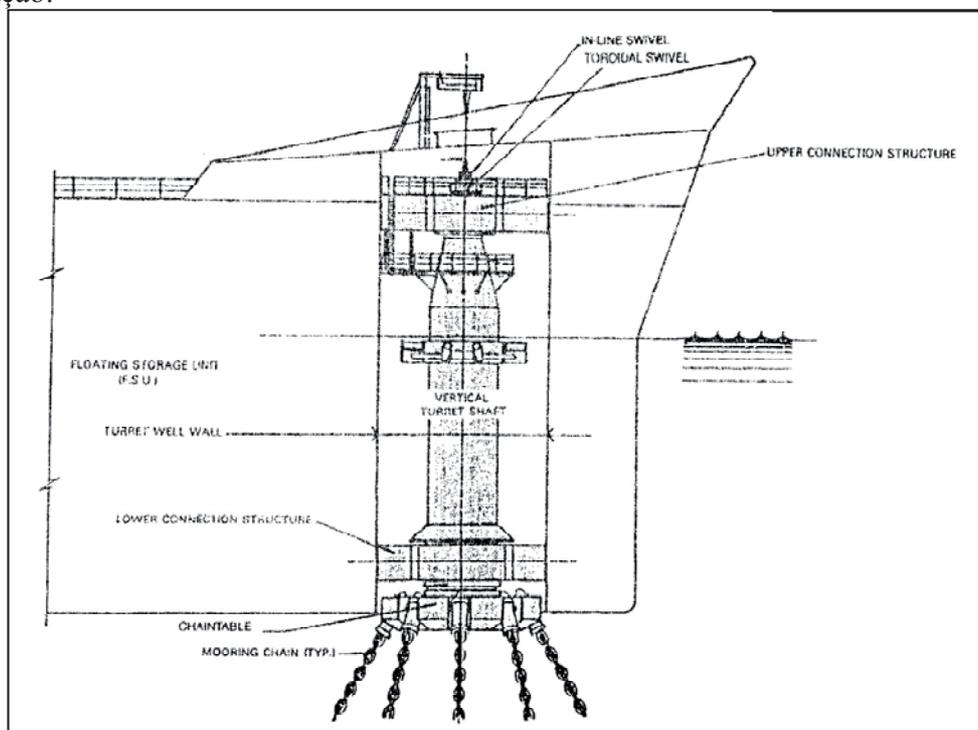


Figura 1: Turret

## 2 SIMULADOR ACOPLADO PARA ANÁLISE DINÂMICA DE SISTEMAS FLUTUANTES OFFSHORE

No contexto de ferramentas computacionais para análise dinâmica de sistemas flutuantes offshore, um simulador com acoplamento dinâmico é aquele capaz de resolver no domínio do tempo a interação física e hidrodinâmica entre o casco, representado por um corpo rígido com três graus de liberdade de translação (surge, sway, heave) e três de rotação (roll, pitch e yaw), e as linhas, modeladas usualmente por Elementos Finitos de treliça ou pórtico.

Este acoplamento pode ser feito com ou sem partição de domínio. No primeiro caso, com partição de domínio, o acoplamento também é dito fraco (weakly coupled) (Senra, 2004; Bahiense, 2007, Corrêa, 2008) onde no domínio do casco as linhas são representadas como força pelo lado direito de seu sistema de equação de movimento, e no domínio da linha, o movimento do casco é representado como movimento prescrito nos graus de liberdade de seus nós topo. Este acoplamento ocorre a cada intervalo de integração dinâmica do sistema, no qual se inicia primeiro o processo de integração do casco e depois das linhas. Usualmente, neste tipo de partição, as equações de movimento do casco são solucionadas por um algoritmo explícito, como método de Runge-Kutta de 4ª ordem, e as linhas, por um algoritmo implícito, como o método alfa-B de Newmark.

No segundo caso, o acoplamento é realizado em um único domínio, também denominado de acoplamento forte (fully coupled). Neste domínio, tanto o casco quanto as linhas compõem um único sistema efetivo de equações solucionado por um único algoritmo de integração, como o alfa-B de Newmark. Ali, as equações de movimento de corpo rígido do casco estão acrescidas ao sistema efetivo de equações do modelo de elementos finitos das linhas (Bahiense, 2007).

Embora este segundo tipo de acoplamento seja mais rigoroso, o primeiro, com partição de domínio, é mais usual, principalmente por garantir resultados tão precisos quanto o Fully Coupled (Lima, 2006) quando se trata de problemas de caráter inercial, e por apresentar menor custo computacional (Bahiense, 2007).

## 3 ESTADO DA ARTE DE MODELAGEM DE SISTEMAS TURRETS

Embora o sistema turret seja um tipo de sistema SPM (Single Point Mooring), as disposições reais das conexões na mesa de amarra e risers são afastadas na ordem de 5m em relação ao centro do turret. Por isto, as ferramentas computacionais acopladas tradicionais (fully coupled ou weakly coupled) para análise de movimento de sistemas offshore não costumam tratar adequadamente o funcionamento deste tipo de sistema. O tratamento numérico de sistemas turret é muitas vezes realizado simplificadaamente através da modelagem de todas as linhas chegando a um único ponto do casco, a fim de evitar que os movimentos de corpo rígido de yaw da unidade flutuante torçam as linhas, representando assim simplificadaamente o funcionamento do turret.

Quando as linhas são modeladas por elementos finitos de pórtico (usualmente aplicados a SCRs, risers flexíveis e umbilicais), outro artifício de modelagem precisa ser levado em conta: deve-se liberar as rotações verticais dos nós de topo a fim de evitar que o movimento de yaw do navio gere esforços de momento de torção nestes tipos de elemento.

As desvantagens destas simplificações de modelagem recaem na precisão dos resultados. Por exemplo, a conexão das linhas em um ponto único no casco impede que suas configurações geométricas correspondam com rigor àquelas instaladas em campo, diminuindo de certa forma a qualidade do projeto de ancoragem, principalmente quando as ancoragens são do tipo tautleg (ou semi- tautleg), uma vez que diferenças na ordem de metros (ordem de grandeza do raio das conexões no turret) são capazes de alterar sensivelmente suas trações.

Outra consequência relacionada a este tipo de artifício de modelagem simplificada pode recair sobre o cálculo dos momentos que as linhas exercem sobre os graus de liberdade de roll e pitch da plataforma; ao modelar todas as linhas chegando a um único ponto no casco, ignora-se o braço real das conexões com relação ao centro do turet e conseqüentemente a informação da contribuição da rigidez angular que as linhas exercem, por exemplo, no roll da unidade flutuante. Isto, no entanto, ainda não é motivo de preocupação para as unidades FPSO atuais, baseadas em navios de 320m de comprimento, visto que suas matrizes de rigidez hidrostática são muito elevadas, tornando a contribuição de rigidez das linhas de sistemas turrets tradicionais (com linhas em catenárias convencionais) pouco significativa, menores que 1% da rigidez hidrostática em roll, por exemplo. Esta relação pode aumentar em sistemas turrets com amarração em tautleg e em navios de menores dimensões.

## 4 PROCEDIMENTO NUMÉRICO EXPEDITO DE TURRETS

Para contornar estas desvantagens, este trabalho apresenta um novo procedimento expedito para representar sistemas de ancoragem do tipo turet. Consiste em permitir que o modelo numérico acoplado (weakly coupled) considere as posições reais de suas conexões. Para tal, este procedimento baseia-se basicamente em, no movimento de corpo rígido do casco, impedir que o giro de yaw seja transmitido as linhas e que o turet trabalhe como uma grande rótula no grau de liberdade de yaw e, no cálculo das forças das linhas, avalie corretamente os esforços de momento resultante que as linhas transferem para o casco.

Antes de descrever este procedimento, será revisto primeiramente o procedimento geral de transferência de movimento de corpo rígido para pontos fixos em um corpo, sendo apresentado pelos principais sistemas de coordenadas utilizados para o cálculo de movimento de sistemas flutuantes. Em seguida, apresenta-se a equação de movimento tradicional para cálculo dos movimentos de translação e rotação de unidades flutuantes (Jacob, 2001).

Por fim, apresenta-se o novo procedimento numérico que deve ser considerado para representação expedita de turrets.

Todo o procedimento expedito para tratamento de turrets foi implementado no programa SITUA-Prosím da Petrobras (Jacob, 2001).

### 4.1 Sistema de Coordenadas

Basicamente são necessários quatro sistemas para descrever a equação de movimento de uma unidade flutuante (outros sistemas de referência (Jacob, 2001) são necessários para descrever as equações de onda, da correnteza e do vento, mas não fazem parte deste trabalho): Sistema Global Geral, Sistema Inicial Fixo, Sistema Móvel Translacional e Sistema Móvel Atualizado, para cálculo de componentes angulares.

#### 4.1.1 Sistema Global Geral (Constante, “inercial”)

Inicialmente, define-se o sistema de coordenadas **global geral** (x,y,z) primário, único, ao qual estarão referenciados todos os demais sistemas. Os eixos x e y deste sistema global estão contidos em um plano horizontal, e o eixo z corresponde à direção vertical, orientado de baixo para cima. Em princípio, a origem deste sistema de referência global geral é contida no plano da superfície média da água.

As coordenadas dos nós da malha de elementos finitos que representam as linhas são expressas neste sistema global geral (eventualmente também referido como o sistema “inercial”).

#### 4.1.2 Sistemas Locais das Plataformas

Definem-se três sistemas de coordenadas para descrever as posições e movimentos das plataformas: um *Sistema Inicial SI*, um *Sistema Móvel* para componentes *Translacionais*

**SMT**, e um *Sistema Móvel* para componentes *Angulares SMA*. Estes três sistemas (descritos adiante), todos com origem no centro de gravidade (CG) da plataforma, são os empregados internamente pelo programa na formulação e solução das equações de movimento de uma plataforma. Observa-se que além destes três sistemas existe também um quarto sistema – o *Sistema Estructural SE*, que é empregado externamente pelo usuário na interface gráfica do programa SITUA para fornecer os dados que definem a geometria de cada unidade flutuante: coordenadas de pontos da plataforma reticulada, conexões, etc. Os eixos deste “sistema estrutural” são paralelos aos do *Sistema Inicial SI* descrito a seguir, porém a origem é localizada em um ponto de referência mais conveniente, definido pelo usuário (mais geralmente, a “quilha à meia nau” no caso de navios). A referência entre o **SE** e o **SI** é definida pelas coordenadas do CG em relação ao ponto de referência escolhido.

### *Sistema Inicial SI (Constante, Considerando Aproamento)*

Para cada plataforma, define-se um sistema de coordenadas **inicial SI** ( $X_{SI}, Y_{SI}, Z_{SI}$ ). A origem deste sistema está localizada na posição inicial do centro de gravidade (CG) da plataforma. Os eixos têm orientação semelhante à do sistema global geral ( $x, y, z$ ), ou seja, o plano  $X_{SI}Y_{SI}$  está contido em um plano horizontal e o eixo  $Z_{SI}$  é vertical, orientado de baixo para cima. Para navios, o eixo  $X_{SI}$  coincide com a direção popa-proa. As componentes translacionais das equações de movimento do corpo, apresentadas mais adiante, são descritas neste sistema

A relação entre este sistema estrutural inicial **SI** e o sistema global geral ( $x, y, z$ ) é feita através de três coordenadas que definem a distância de sua origem (o CG) até a origem do sistema de global geral, e de um quarto valor que representa o ângulo de aproamento da unidade flutuante (medido no plano horizontal, entre o eixo x-global geral e o eixo  $X_{SI}$  da unidade). Em casos particulares onde a plataforma está aproada a 0 (zero) graus, os eixos do sistema **SI** serão paralelos aos do sistema global.

### *Sistema Móvel Translacional SMT*

Define-se também um sistema de coordenadas móvel **SMT** ( $X_{SMT}, Y_{SMT}, Z_{SMT}$ ) que acompanha todas as componentes de movimento translacional, mas não acompanha todas as componentes de rotação: apenas o giro de *yaw*, o que leva a uma variação do aproamento ao longo do tempo mas mantém o plano  $X_{SMT}, Y_{SMT}$  contido em um plano horizontal, e o eixo  $Z_{SMT}$  na vertical.

Algumas das componentes translacionais de carga incluídas nas equações de movimento do corpo são calculadas neste sistema: por exemplo, as forças de deriva média e lenta, as forças de primeira ordem em navios, e as forças de arraste/correnteza em navios. Todas essas parcelas de carga são calculadas em termos de coeficientes hidrodinâmicos fornecidos em relação a um sistema de coordenadas local, fixo no navio, e portanto o mais natural é calculá-las em um sistema móvel, para evitar a necessidade de efetuar transformações dos coeficientes para o sistema inicial a cada intervalo de tempo. Como a variação dos coeficientes com a mudança do aproamento devido ao giro de yaw é a mais significativa (principalmente para navios), é razoável portanto calcular as cargas em um sistema que leve em conta a variação do aproamento, sem considerar a variação devida ao *pitch* e *roll*.

### *Sistema Móvel Angular SMA*

Para cada plataforma, define-se também um sistema de coordenadas **móvel SMA** ( $X_{SMA}, Y_{SMA}, Z_{SMA}$ ) que acompanha todas as componentes de movimento translacional e rotacional do corpo (daí também ser comum descrever este sistema como “fixo no corpo”). As componentes angulares das equações de movimento do corpo, apresentadas mais adiante, são descritas neste sistema.

Inicialmente, o **SMA** coincide com o sistema inicial **SI**. Em seguida, a origem do **SMA** acompanha os movimentos do centro de gravidade (CG) do corpo, sofrendo translações correspondentes aos movimentos translacionais do CG; as direções dos eixos do **SMA** também mudam, acompanhando as rotações do corpo.

## 4.2 Formulação das Equações de Movimento

O movimento do corpo pode ser expresso como o somatório de uma translação da origem do sistema móvel **SMT**, e uma rotação em torno de um eixo passando pela origem:

A **translação**  $\mathbf{u}(t)$  é expressa pela variação da origem do sistema móvel **SMT**  $(X_{SMT}, Y_{SMT}, Z_{SMT})$ , ou seja, a variação da posição do centro de gravidade (CG), medida em relação ao sistema **SI**  $(X_{SMT}, Y_{SMT}, Z_{SMT})$ . As componentes de  $\mathbf{u}(t)$  no sistema **SI** são  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $u_3(t)$ .

De forma similar, o movimento de **rotação** é a variação angular dos eixos do sistema móvel **SMA** em relação ao sistema global. Para expressar a posição relativa rotacional desses dois sistemas de referência, empregam-se os ângulos de Euler, denominados  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ . A seqüência de rotações que define estes ângulos é descrita a seguir e ilustrada na Figura 2.

1. Assume-se que originalmente o sistema móvel **SMA**  $(X_{SMA}, Y_{SMA}, Z_{SMA})$  e o sistema **SI**  $(X_{SI}, Y_{SI}, Z_{SI})$  são coincidentes;
2. Inicialmente, a plataforma gira em torno do seu eixo-  $Z_{SI}$  através do ângulo de *yaw*,  $\gamma$ ;
3. Em seguida, a partir da posição resultante gira em torno do eixo-  $Y_{SI}$  através do ângulo de *pitch*  $\beta$ ;
4. Finalmente, a partir desta última posição, gira em torno do eixo-  $X_{SI}$  através do ângulo de *roll*  $\alpha$ .

### 4.2.1 Transformação de Coordenadas

Após o movimento do corpo, as coordenadas de um ponto expressas no sistema móvel **SMA**  $\mathbf{X} = (X_{SMA}, Y_{SMA}, Z_{SMA})$  podem ser relacionadas às coordenadas do mesmo ponto expressas no sistema **SI**  $\mathbf{x} = (X_{SI}, Y_{SI}, Z_{SI})$ , pela seguinte expressão:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} (\mathbf{x} - \mathbf{u}) \quad (1)$$

ou seja, a transformação de coordenadas que relaciona o sistema **SI** com o sistema móvel **SMA** é função do movimento de translação  $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$  e do movimento de rotação, que é definido pela matriz de *rotação* ou de *transformação de coordenadas*  $\mathbf{A}$ , cujos coeficientes são compostos por senos e cossenos dos ângulos de Euler  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ . Escrevendo  $s\beta = \text{sen}(\beta)$ ,  $c\beta = \text{cos}(\beta)$ , e assim por diante, e expandindo a expressão (1), obtém-se:

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c\beta c\alpha & s\beta c\alpha & -s\alpha \\ -s\beta c\gamma + c\beta s\alpha s\gamma & c\beta c\gamma + s\beta s\alpha s\gamma & c\alpha s\gamma \\ s\beta s\gamma + c\beta s\alpha c\gamma & -c\beta s\gamma + s\beta s\alpha c\gamma & c\alpha c\gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x - u_1 \\ y - u_2 \\ z - u_3 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

A matriz  $\mathbf{A}$  é uma matriz ortonormal, de modo que sua inversa é igual à sua transposta; com isto, a transformação inversa (que exprime as coordenadas do ponto no sistema **SI** como a soma das componentes de movimento translacional  $\mathbf{u}$  e rotacional  $\mathbf{A}$ ) é dada por:

$$\mathbf{x} = \mathbf{u} + \mathbf{A}^T \mathbf{X} \quad (3)$$

A Figura 2 ilustra os ângulos de Euler  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  entre o sistema **SI** e **SMA**.

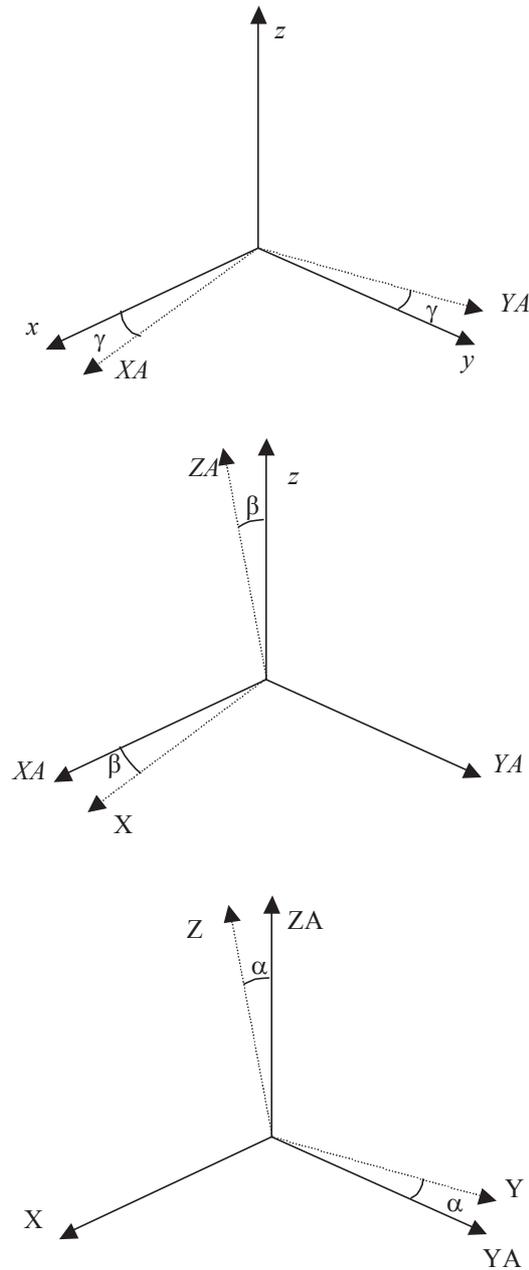


Figura 2: Ângulos de Euler

#### 4.2.2 Transformação de Velocidades

Uma outra expressão de transformação pode ser definida, relacionando as velocidades angulares  $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ , expressas no sistema **SI** ( $X_{SI}, Y_{SI}, Z_{SI}$ ), com as derivadas no tempo dos ângulos de Euler  $\boldsymbol{\theta} = (\gamma, \beta, \alpha)$  (entendidas como velocidades angulares expressas no sistema móvel **SMA**). Esta expressão é dada por

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{B} \frac{d\boldsymbol{\theta}}{dt} \tag{4}$$

onde **B** é dado por

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\text{sen } \alpha \\ 0 & \cos \gamma & \text{sen } \gamma \cdot \cos \alpha \\ 0 & -\text{sen } \gamma & \cos \gamma \cdot \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

Em geral  $\mathbf{B}$  é uma matriz quadrada e não singular, portanto a sua inversa existe e assim a transformação inversa de (4) pode ser escrita como:

$$\frac{d\boldsymbol{\theta}}{dt} = \mathbf{B}^{-1} \boldsymbol{\omega} \quad (6)$$

#### 4.2.3 Segunda Lei de Newton

A segunda lei de Newton para movimentos translacionais e rotacionais pode ser escrita respectivamente como:

$$\mathbf{f} = \frac{d}{dt}(\mathbf{M} \mathbf{v}) \quad (7a)$$

$$\mathbf{m} = \frac{d}{dt}(\mathbf{I} \boldsymbol{\omega}) \quad (7b)$$

onde  $\mathbf{f}$  e  $\mathbf{m}$  são os vetores de forças externas e momentos;  $\mathbf{M}$  e  $\mathbf{I}$  são matrizes 3x3 compostas pela massa  $m$  do corpo e seus momentos e produtos de inércia  $I_{ii}$  e  $J_{ij} = J_{ji}$  como definido a seguir:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{11} & -J_{12} & -J_{13} \\ -J_{21} & I_{22} & -J_{23} \\ -J_{31} & -J_{32} & I_{33} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

onde:

$$I_{ii} = \int (x_j^2 + x_k^2) dm \quad j, k \neq i$$

$$J_{ij} = \int x_i x_j dm \quad i \neq j$$

Alternativamente, os momentos e produtos de inércia  $I_{ii}$  e  $J_{ij}$  podem ser relacionados aos valores dos raios de giração  $r_{ii}$  e  $r_{ij}$  pelas seguintes expressões:

$$r_{ii} = \sqrt{\frac{I_{ii}}{m}} \quad (10)$$

$$r_{ij} = \text{sinal}(J_{ij}) \sqrt{\frac{|J_{ij}|}{m}}$$

O lado direito das equações (7) representam as derivadas no tempo da quantidade de movimento translacional e angular, respectivamente. Considerando que a velocidade translacional  $\mathbf{v}$  do centro de gravidade do corpo e o vetor de forças  $\mathbf{f}$  são expressos no sistema  $\mathbf{SI}$  ( $X_{SI}, Y_{SI}, Z_{SI}$ ), e que a matriz de massa é constante, a equação (7a) torna-se:

$$\mathbf{f} = \mathbf{M} \frac{d\mathbf{v}}{dt}, \quad (11)$$

e

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{x}}{dt}, \quad (12)$$

Quanto à equação (7b) relacionando momentos à derivada no tempo da quantidade de movimento angular, seria conveniente reescrevê-la de uma forma que a matriz de inércia  $\mathbf{I}$  também fosse constante. Para tanto pode-se avaliar os momentos  $\mathbf{m}$  não no sistema  $\mathbf{SI}$ , mas no sistema móvel  $\mathbf{SMA}$  solidário ao corpo, no qual  $\mathbf{I}$  é constante. Para permitir que a quantidade de movimento angular possa ser avaliada num sistema de coordenadas que está girando, a equação (7b) é reescrita da seguinte forma:

$$\mathbf{m} = \mathbf{I} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega}) \quad (13)$$

#### 4.2.4 Equações de Movimento – Forma Inicial

Rearranjando as equações (11) e (13), e agrupando-as com as equações (12) e (6), obtemos o seguinte sistema de equações:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f}, \quad (14a)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mathbf{I}^{-1} [\mathbf{m} - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega})] \quad (14b)$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{v}, \quad (14c)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\theta}}{dt} = \mathbf{B}^{-1} \boldsymbol{\omega} \quad (14d)$$

As equações (14) podem ser vistas como um sistema de doze equações de primeira ordem nas variáveis  $\mathbf{v}(t)$ ,  $\mathbf{x}(t)$  (respectivamente velocidades translacionais e posição do corpo, expressas no sistema global),  $\boldsymbol{\omega}(t)$  e  $\boldsymbol{\theta}(t)$ , (respectivamente velocidades angulares expressas no sistema global, e os ângulos de Euler).

É interessante observar que, apesar de a matriz de inércia  $\mathbf{I}$  e os momentos  $\mathbf{m}$  serem avaliados no sistema móvel  $\mathbf{SMA}$  (o que é conveniente já que neste caso a matriz  $\mathbf{I}$  é constante), as incógnitas associadas à equação (14b) são as velocidades angulares  $\boldsymbol{\omega}$  no sistema  $\mathbf{SI}$ .

É importante ressaltar dois tipos de não linearidade que ocorrem nas equações (14):

- Os vetores de força e momento,  $\mathbf{f}$  e  $\mathbf{m}$ , são funções não lineares da posição do corpo e do estado de movimento.
- O produto vetorial  $\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\omega})$  e a matriz de transformação  $\mathbf{B}^{-1}$  contêm termos não lineares envolvendo, respectivamente, produtos e potências das velocidades angulares, e funções trigonométricas dos ângulos de Euler.

Neste ponto, formulações simplificadas poderiam assumir pequenas amplitudes de movimento e desprezar termos de ordem superior contendo produtos ou potências de quantidades de menor ordem de grandeza. No entanto, como mencionado anteriormente, a presente formulação mantém todos os termos não-lineares e portanto é válida para grandes amplitudes de movimento; isto será possível já que a integração das equações é feita no domínio do tempo.

#### 4.2.5 Equações de Movimento – Forma Final

Para a integração no tempo das equações de movimento, pode ser empregado, por exemplo, o método de Runge-Kutta de quarta ordem. Este método pode operar sobre um sistema de equações diferenciais acopladas da forma  $\frac{dy}{dt} = f(y,t)$ , que, como pode ser visto, é similar às equações (14). Trata-se de um método baseado em extrapolações polinomiais da variável principal no intervalo de tempo seguinte, e na determinação dos coeficientes do polinômio a partir de valores estimados das derivadas em instantes ao longo do intervalo de tempo.

Mais adiante, será demonstrado que os vetores de força e momento,  $\mathbf{f}$  e  $\mathbf{m}$ , têm componentes que são proporcionais às acelerações do corpo (as parcelas de inércia da fórmula de Morison). Estas componentes irão gerar termos de massa adicionada, que variam ao longo do tempo. Separando as parcelas de  $\mathbf{f}$  e  $\mathbf{m}$  que dependem das acelerações, e que são afetados por termos de massa adicionada, pode-se rearranjar as equações (14a) e (14b) da seguinte forma:

$$\mathbf{M} \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\mathbf{A} \frac{d\mathbf{v}}{dt} - \mathbf{B} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + \mathbf{f}_l \quad (15)$$

$$\mathbf{I} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = -\mathbf{C} \frac{d\mathbf{v}}{dt} - \mathbf{D} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + \mathbf{m}_l - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega})$$

Nestas expressões,  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{D}$  são as matrizes de massa adicionada avaliadas em cada instante de tempo;  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{C}$  são os termos cruzados de massa adicionada;  $\mathbf{f}_l$  e  $\mathbf{m}_l$  são as parcelas dos termos de força e momento que dependem da posição, velocidade e tempo, mas são independentes da aceleração.

Neste caso, para permitir a utilização do método de Runge-Kutta, transferem-se os termos com derivadas das incógnitas básicas para o lado esquerdo. As equações (15) são então novamente re-arranjadas transformando-se em:

$$(\mathbf{M}+\mathbf{A}) \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \mathbf{B} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mathbf{f}_l \quad (16)$$

$$\mathbf{C} \frac{d\mathbf{v}}{dt} + (\mathbf{I}+\mathbf{D}) \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mathbf{m}_l - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega})$$

ou, em forma matricial,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} + \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{I} + \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\mathbf{v}}{dt} \\ \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_l \\ \mathbf{m}_l - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega}) \end{Bmatrix} \quad (17)$$

onde a matriz de massa global é dada por:

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} + \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{I} + \mathbf{D} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Pode-se demonstrar que  $\bar{\mathbf{A}}$  é uma matriz simétrica e, em geral, não singular, de modo que sua inversa pode ser expressa, numa forma particionada, como:

$$\bar{\mathbf{A}}^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}}_{11} & \bar{\mathbf{A}}_{12} \\ \bar{\mathbf{A}}_{21} & \bar{\mathbf{A}}_{22} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Pode-se agora pré-multiplicar os dois lados de (17) por  $\bar{\mathbf{A}}^{-1}$ , obtendo-se

$$\begin{Bmatrix} \frac{d\mathbf{v}}{dt} \\ \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \end{Bmatrix} = \bar{\mathbf{A}}^{-1} \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_l \\ \mathbf{m}_l - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega}) \end{Bmatrix} \quad (20)$$

ou, em forma particionada levando em conta a expressão de  $\bar{\mathbf{A}}^{-1}$ ,

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \bar{\mathbf{A}}_{11} \mathbf{f}_l + \bar{\mathbf{A}}_{12} [\mathbf{m}_l - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega})] \quad (21a)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \bar{\mathbf{A}}_{21} \mathbf{f}_l + \bar{\mathbf{A}}_{22} [\mathbf{m}_l - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega})] \quad (21b)$$

Estas equações encontram-se agora em uma forma apropriada para aplicação do algoritmo de integração no tempo, uma vez que o lado direito não possui termos com derivadas das incógnitas básicas.

### 4.3 Transferência de Movimento para Linhas Conectadas a um *Turret*

De maneira geral, as coordenadas atualizadas de uma conexão no sistema de referência global é expressa pela equação 3, ( $\mathbf{x} = \mathbf{u} + \mathbf{A}^T \mathbf{X}$ ), onde  $\mathbf{u}$  é agora a translação atualizada do CG no sistema **SI** e  $\mathbf{X}$  é a posição da conexão com relação ao CG no sistema local da unidade flutuante.

Naturalmente, seguindo esta expressão, se o topo das linhas de um sistema *turret* for considerado em sua posição real, este irá girar de acordo com os ângulos de rotação de Euler expressos pela matriz  $\mathbf{A}$ , obedecendo a um movimento de corpo rígido (solidário a unidade), ignorando o real funcionamento de um *turret*.

Para que as disposições reais das “conexões *turret*” sejam corretamente consideradas ao longo de uma simulação, primeiramente deve-se calcular a posição do centro do *turret* devido a translação e rotação do CG:

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{u} + \mathbf{A}^T \mathbf{X}_t \quad (22)$$

o movimento sofrido pelo *turret* é dado por:

$$\Delta \mathbf{x}_t = \mathbf{x}_t + \mathbf{X}_t \quad (23)$$

onde,  $\mathbf{x}_t$  e  $\mathbf{X}_t$  referem-se, respectivamente, as coordenadas do centro do *turret* no sistema **SI** e no sistema local **SMA** (que acompanha o movimento translacional e angular da unidade).

Em seguida deve-se atualizar a posição do ponto de conexão de cada linha devido à rotação do *turret*. Neste caso, deve-se ignorar o *yaw* da unidade para simular simplificadaamente o funcionamento do *turret*. Para tal, uma nova matriz de transformação pode ser aplicada, igual a  $\mathbf{A}$ , porém com rotação nula, ou seja, o termo (3,3) de  $\mathbf{A}$  deve ser unitário e os termos ( $i, 3$ ) e ( $3, i$ ),  $i = 1, 2$ , devem ser nulos. Esta nova matriz será denominada aqui de  $\mathbf{A}_t$ .

Assim, apenas o braço entre cada conexão e o centro do *turret* deve ser rotacionado, de forma que a nova posição das conexões no sistema **SI** seja expressa por:

$$\mathbf{x}_c = \Delta \mathbf{x}_t + \mathbf{A}_t^T (\mathbf{X}_c - \mathbf{X}_t) - \mathbf{X}_c \quad (24)$$

As rotações que devem ser transmitidas para o topo das linhas são expressas por:

$$\mathbf{r}_{xc} = \alpha \text{ (roll)}$$

$$\mathbf{r}_{yc} = \beta \text{ (pitch)}$$

$$\mathbf{r}_{zc} = 0.0 \text{ (não recebe rotação de yaw)}$$

Desta forma, por este procedimento expedito, finaliza-se o procedimento de transferência de movimentos de translação,  $\mathbf{x}_c$ , e rotação,  $\mathbf{r}_{xc}$ ,  $\mathbf{r}_{yc}$ ,  $\mathbf{r}_{zc}$ , que as conexões de um sistema *turret* devem receber no sistema **SI**.

#### 4.4 Transferência de Força de Linhas Conectadas a um *Turret* ao Sistema de Equações do Casco

As forças de momento em *roll* e *pitch* que cada linha gera no CG da unidade flutuante, devem ser calculadas de forma tradicional:

$$\mathbf{M}_x = \mathbf{M}_{cx} + \mathbf{X}_{cy}\mathbf{F}_{cz} - \mathbf{X}_{cz}\mathbf{F}_{cy} \quad (25)$$

$$\mathbf{M}_y = \mathbf{M}_{cy} + \mathbf{X}_{cz}\mathbf{F}_{cx} - \mathbf{X}_{cx}\mathbf{F}_{cz} \quad (26)$$

onde,  $\mathbf{M}_x$  e  $\mathbf{M}_y$  são, respectivamente, os momentos totais que uma linha exerce nos graus de liberdade de *roll* e *pitch* (**SMT**) da plataforma;  $\mathbf{M}_{cx}$  e  $\mathbf{M}_{cy}$  são os momentos no topo de uma linha nestes mesmos graus de liberdade;  $\mathbf{X}_{cx}$ ,  $\mathbf{X}_{cy}$ ,  $\mathbf{X}_{cz}$  e  $\mathbf{F}_{cx}$ ,  $\mathbf{F}_{cy}$ ,  $\mathbf{F}_{cz}$ , são as coordenadas das conexões (com relação ao CG) e as forças, respectivamente, na direção dos três graus de liberdade de translação da unidade flutuante no **SMT**.

Já o momento total  $\mathbf{M}_z$  em *z* (*yaw*) que uma linha exerce sobre a plataforma deve ser tal que apenas o eixo central do *turret* seja responsável por criar este esforço. Ou seja, o *turret*, neste modelo expedito é tratado como uma grande rótula em torno da direção  $Z_{SI}$ , de forma que a força de cada linha seja trasladada ao centro do *turret* e, a partir daí, o momento em  $Z_{SI}$ ,  $\mathbf{M}_z$ , seja proporcional a ação do braço desta força trasladada com relação ao CG da plataforma. De maneira geral:

$$\mathbf{M}_z = \mathbf{M}_{cz} + \mathbf{X}_{tx}\mathbf{F}_{cy} - \mathbf{X}_{ty}\mathbf{F}_{cx} \quad (27)$$

onde,  $\mathbf{M}_{cz}$  é a força de momento em  $Z_{SI}$  do topo de uma linha;  $\mathbf{X}_{tx}$  e  $\mathbf{X}_{ty}$  são as coordenadas na direção *x* e *y* do *turret* no **SI**; e  $\mathbf{F}_{cx}$ ,  $\mathbf{F}_{cy}$  são as forças de topo de uma linha no eixo  $X_{SMT}$  e  $Y_{SMT}$ .

## 5 ESTUDO DE CASO: PLATAFORMA SEMI-SUBMERSÍVEL

### 5.1 Introdução

A partir de agora será apresentado um estudo de caso de um sistema *turret* avaliado por três modelos distintos. O primeiro corresponde ao procedimento tradicional de sistemas *turrets*, que significa fazer a conexão de topo de todas as linhas coincidir com a coordenada do centro do *turret*, conforme mencionado na seção 3.

O segundo corresponde a modelagem das conexões de topo das linhas em suas coordenadas reais, porém ignorando a presença do *turret*. O objetivo deste modelo é apenas esclarecer quanto ao tipo de resultado esperado, focando na torção sofrida pelas linhas e na inconsistência deste tipo de configuração em um sistema *turret*, impedindo, por exemplo, que a unidade se alinhe corretamente com a resultante ambiental.

Por fim, o terceiro modelo corresponde ao novo procedimento numérico para representação de *turrets* apresentado neste trabalho, implementado no programa SITUA-Prosím da Petrobras. Neste modelo as conexões de topo das linhas são posicionadas nas coordenadas reais de projeto e o funcionamento do *turret* é considerado. Será apresentado para este último procedimento, resultados provenientes de simulações sem e com ação de

ondas extremas com o objetivo de validar os sistemas de transformação de coordenadas apresentados nas seções 4.3 e 4.4 para grandes rotações.

Neste trabalho, os primeiros resultados são apresentados por figuras capturadas de simulações dinâmicas acopladas no programa SITUA-Prosim, que se limitam em destacar de maneira visual os resultados esperados pelo uso dos três diferentes modelos mencionados no parágrafo anterior. Em seguida, apresentam-se os resultados de movimento angular de *roll* e *pitch* do navio obtidos pelo procedimento de modelagem tradicional de *turrets* e através do procedimento numérico expedito apresentado neste trabalho.

## 5.2 Descrição do Sistema

O sistema estudado corresponde a uma plataforma FPSO com sistema de amarração e produção em *turret*. O centro do *turret* está posicionado na proa, a 137m da seção central do navio de 320m de comprimento.

O sistema, situado em uma LDA de 850m, está ancorado por 8 linhas em catenária convencional e possui 27 *risers*. As ancoragens são modeladas por elementos finitos de treliça e os *risers*, de pórtico.

O aproamento inicial da unidade é para Leste (antes de agir a combinação ambiental), e as combinações ambientais de vento, onda e correnteza estudadas aqui são alinhadas para Sudoeste, de forma que o sistema *turret* permita o giro de 135 graus (no sentido anti-horário) da unidade flutuante de produção.

As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, a vista superior e 3D deste modelo, que considera as conexões em suas coordenadas reais (de projeto) ao redor do centro do *turret*.

A descrição mais detalhada deste modelo, das características das linhas, do casco e das condições ambientais, não faz parte do escopo do presente estudo. Os resultados apresentados refletem os que seriam encontrados em qualquer sistema de produção SPM do tipo *turret*.

A partir da próxima seção, se inicia a apresentação dos resultados para os três tipos de modelo mencionados.

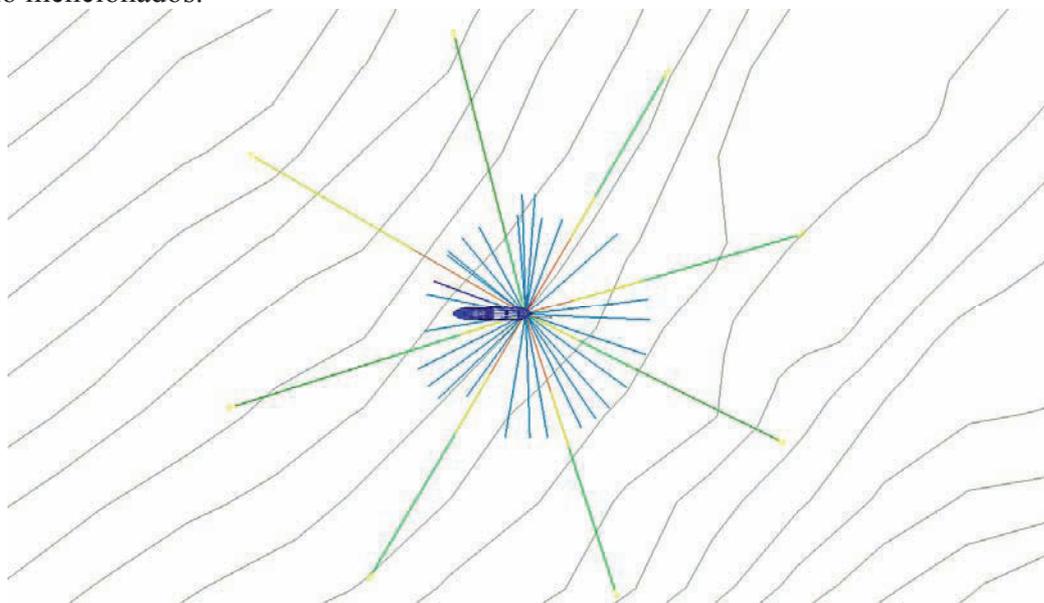


Figura 3: Posição Inicial do Sistema

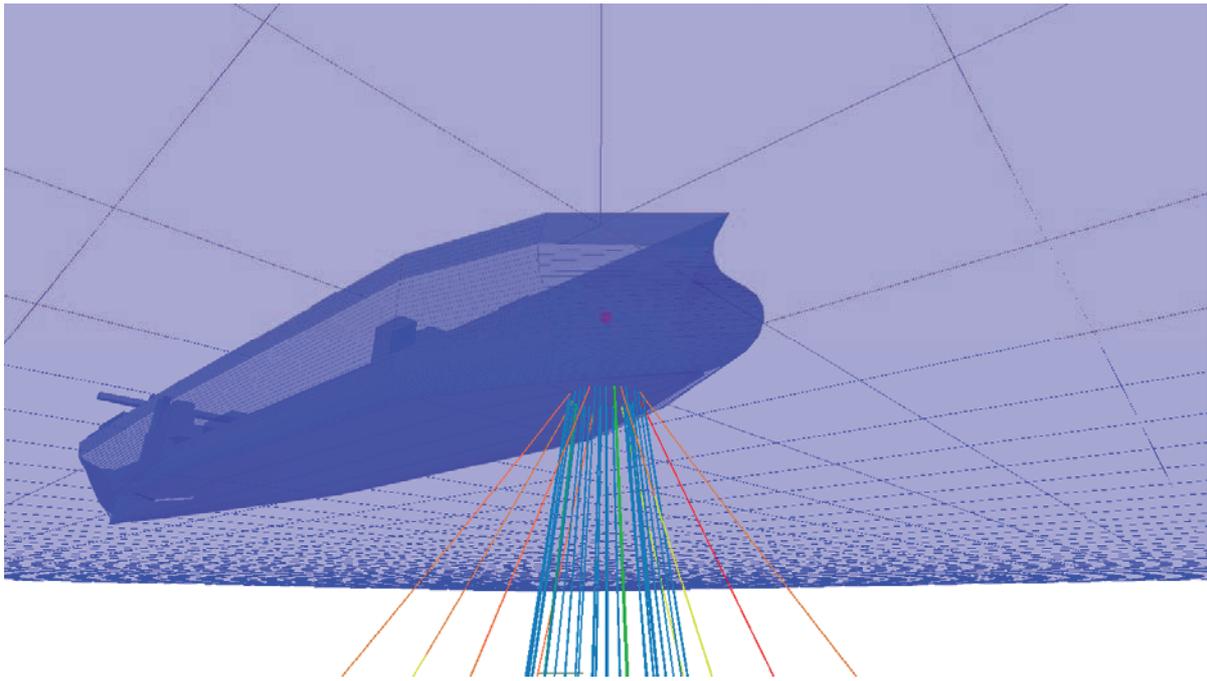


Figura 4: Vista 3D do Posicionamento das Linhas ao redor do centro do *Turret*

### 5.3 Primeiro Modelo – Modelagem Tradicional de Turrets em Único Ponto

Nesta seção, são apresentados os resultados do primeiro modelo estudado, em que todas as linhas do sistema são conectadas em um único ponto na unidade flutuante, que corresponde ao centro do *turret* (Figura 5). Este tipo de modelo, conforme mencionado na seção 3, é aplicado em projetos de ancoragens, nos quais o programa não está preparado para tratar o funcionamento de *turrets*. Neste tipo de modelo, deve-se ter o cuidado de que cada linha de ancoragem e *risers* seja lançada com a mesma resultante horizontal de topo do projeto, a fim de garantir que a rigidez horizontal do conjunto se assemelhe ao máximo a gerada em configuração de projeto.

Comparando a Figura 5 com a Figura 4, é possível notar significativa diferença na disposição geométrica das linhas, o que implicaria, por exemplo, que as posições das âncoras do modelo simplificado não correspondam com rigor àsquelas instaladas em campo, diminuindo de certa forma a qualidade do projeto de ancoragem.

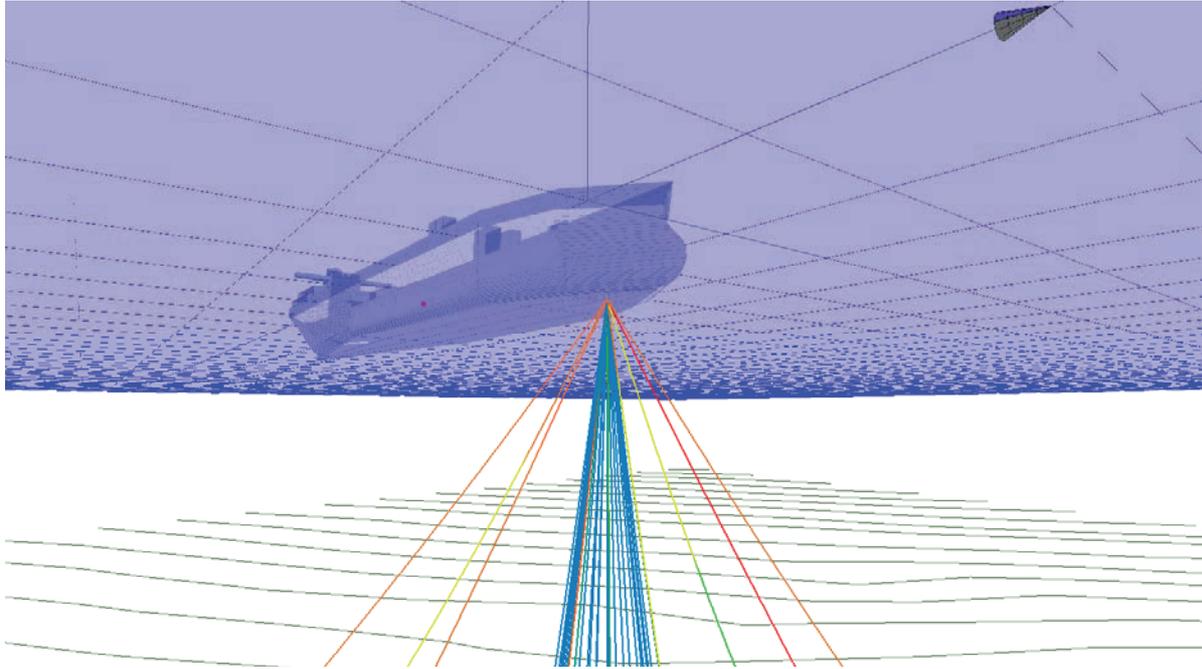


Figura 5: Vista 3D do Posicionamento das Linhas no centro do *Turret*

A Figura 6 apresenta a posição inicial e final de equilíbrio estático do navio devido à ação ambiental para Sudoeste. Apresenta também uma curva vermelha da trajetória do CG da unidade. Através dela, constata-se o correto alinhamento da unidade flutuante com a resultante ambiental, indicando que este tipo de modelagem simplificada é capaz de representar o movimento angular do sistema em torno do eixo  $Z$  do *turret*. No entanto, conforme já mencionado na seção 3, este tipo de artifício de modelagem simplificada diminui a precisão do cálculo dos momentos que as linhas exercem sobre os graus de liberdade de *roll* e *pitch* da plataforma, como será apresentado mais adiante.

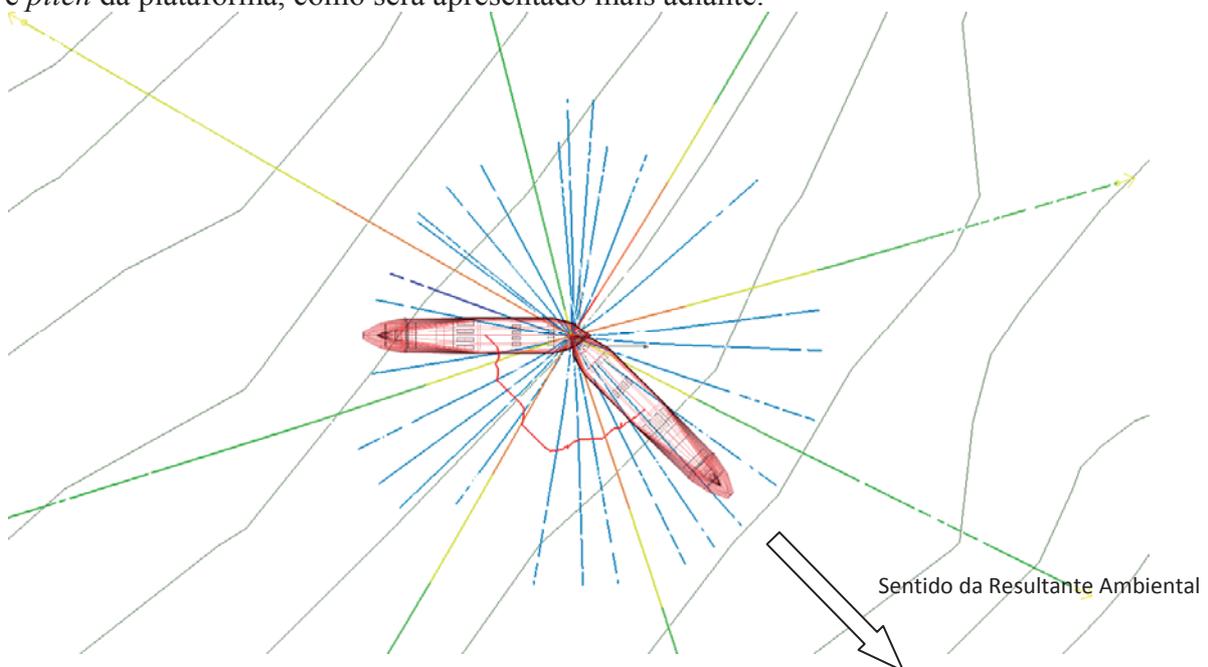


Figura 6: Vista Superior – Alinhamento correto do FPSO com a combinação ambiental SE

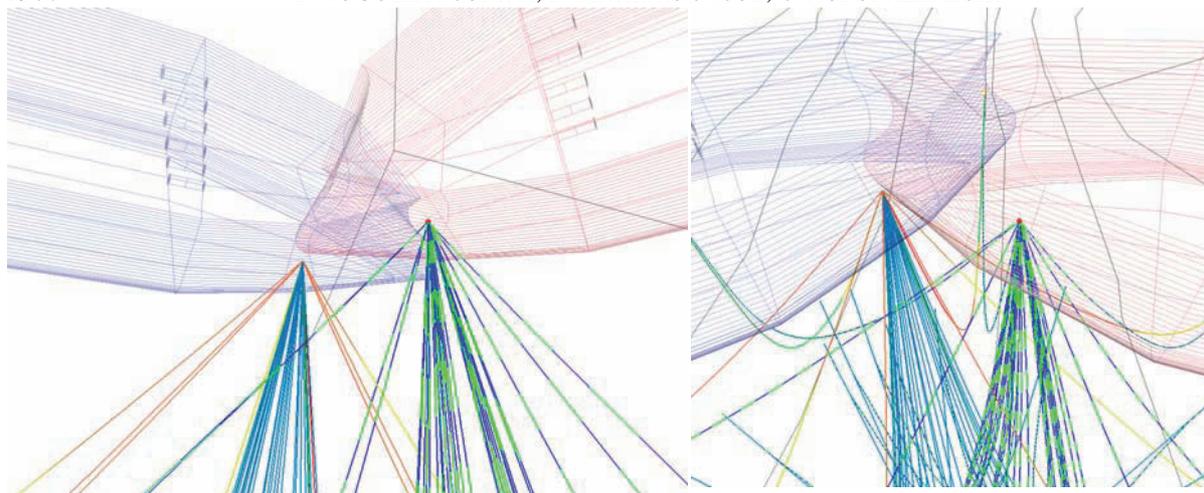


Figura 7 – Vistas 3D – Destaques do sistema de ancoragem e *risers* em ponto único para evitar torção do sistema de ancoragem e *risers*

Por fim, a Figura 7 apresenta vistas 3D do sistema *turret*; a esquerda o observador é posicionado abaixo do FPSO, e a direita o observador está acima do FPSO. Esta figura ilustra a configuração das linhas na posição antes (linha contínua) e depois (linha tracejada) do sistema atingir o equilíbrio estático, podendo-se observar que as mesmas não sofreram torção, atendendo a um dos objetivos deste modelo simplificado tradicional.

#### 5.4 Segundo Modelo – Modelagem das Conexões Reais do *Turret* solidário ao navio

Neste modelo, as coordenadas das conexões de projeto são respeitadas, mas o funcionamento do *turret* não, ou seja, ele é solidário ao movimento de corpo rígido da unidade flutuante. O objetivo dos resultados apresentados aqui é apenas reforçar a necessidade de um modelo apropriado para tratamento do funcionamento de *turrets* quando as coordenadas de projeto das conexões são consideradas.

A Figura 8 apresenta a vista superior da posição inicial e final de equilíbrio estático do navio devido a ação ambiental para Sudoeste (juntamente com a trajetória do CG durante o movimento da unidade flutuante). Nesta posição a unidade não se alinha com a resultante ambiental, indicando que este tipo de modelagem não é apropriado. O motivo deste desalinhamento é devido à rigidez de torção das linhas em torno do eixo do *turret*, gerando por sua vez um momento restaurador em  $Z$ .

Este fenômeno de torção das linhas é apresentado em destaque na Figura 9. De maneira análoga a Figura 7, destaca-se a configuração das linhas antes (linhas contínuas) e depois (linhas tracejadas) do sistema atingir a posição de equilíbrio estático. Para facilitar a visualização, as configurações geométricas de projeto dos *risers* não estão sendo apresentadas no desenho à direita, na Figura 9.

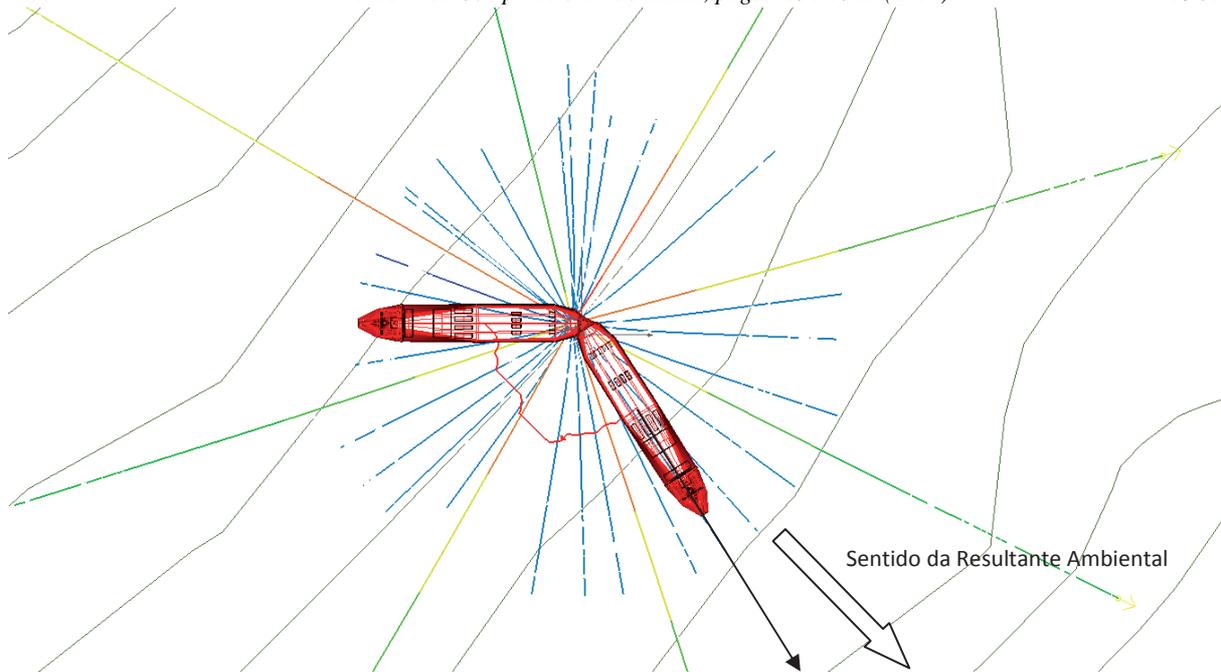


Figura 8 – Vista Superior – Alinhamento incorreto do FPSO a combinação ambiental para SE

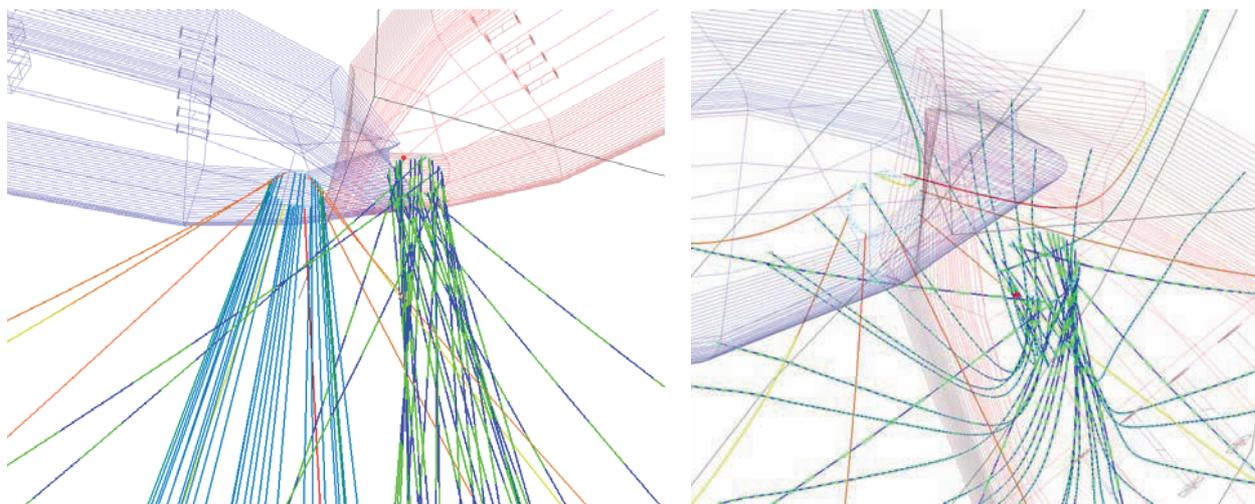


Figura 9 – Vistas 3D – Destaques da torção do sistema de ancoragem e risers pela ausência da modelagem de funcionamento do sistema turret

### 5.5 Terceiro Modelo – Modelagem das Conexões Reais com Turret

Nesta seção são apresentados os mesmos tipos de resultados das seções anteriores, porém relacionados ao novo procedimento numérico de representação de turrets. O modelo é idêntico ao da seção 5.4, porém agora levando em consideração o funcionamento do turret, de acordo com o exposto nas seções 4.3 e 4.4.

A Figura 10 apresenta a vista superior da configuração antes e após o sistema atingir a posição de equilíbrio estático com este novo procedimento numérico. Com esta nova ferramenta, o navio se alinha perfeitamente com a resultante ambiental. Recordando que aqui as conexões do modelo estão em suas coordenadas reais, de projeto, conforme Figura 4.

A Figura 11 apresenta também um destaque da configuração das linhas na posição antes (linhas contínuas) e depois (linhas tracejadas) do sistema atingir o equilíbrio estático, sendo observado que as mesmas não sofreram torção, atendendo a um dos objetivos deste novo

procedimento numérico. Para facilitar a visualização no desenho à direita desta mesma Figura, os *risers* não foram desenhados na configuração inicial de projeto.

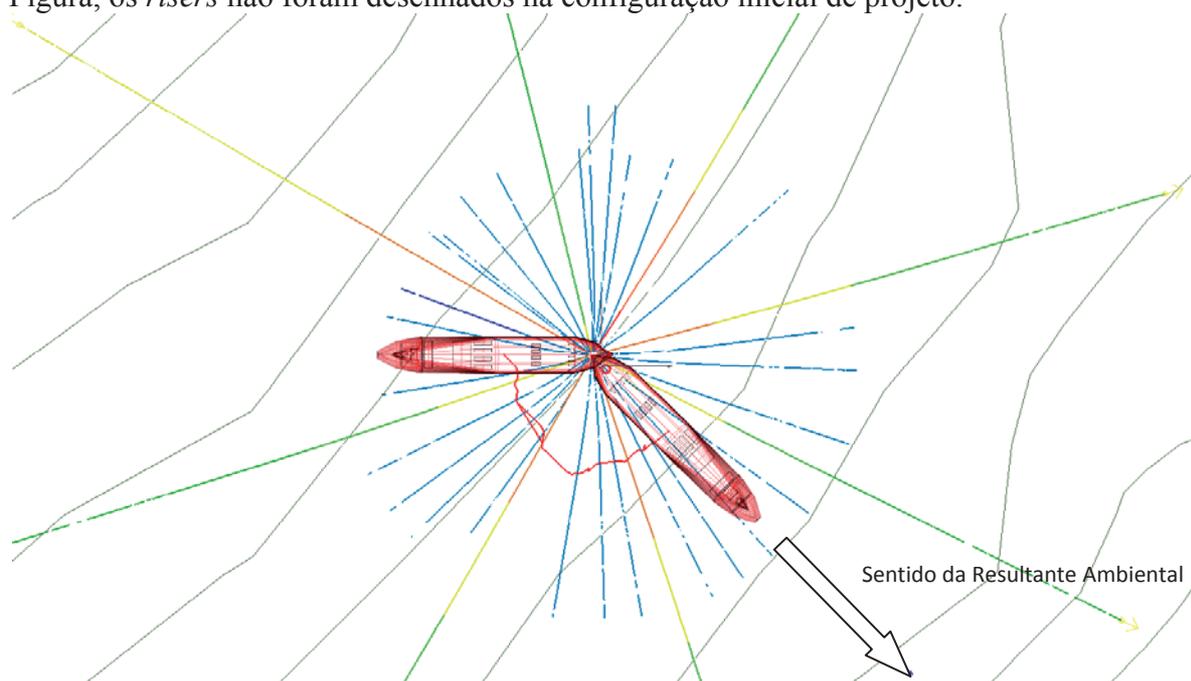


Figura 10 – Vista Superior – Alinhamento correto do FPSO a combinação ambiental para SE

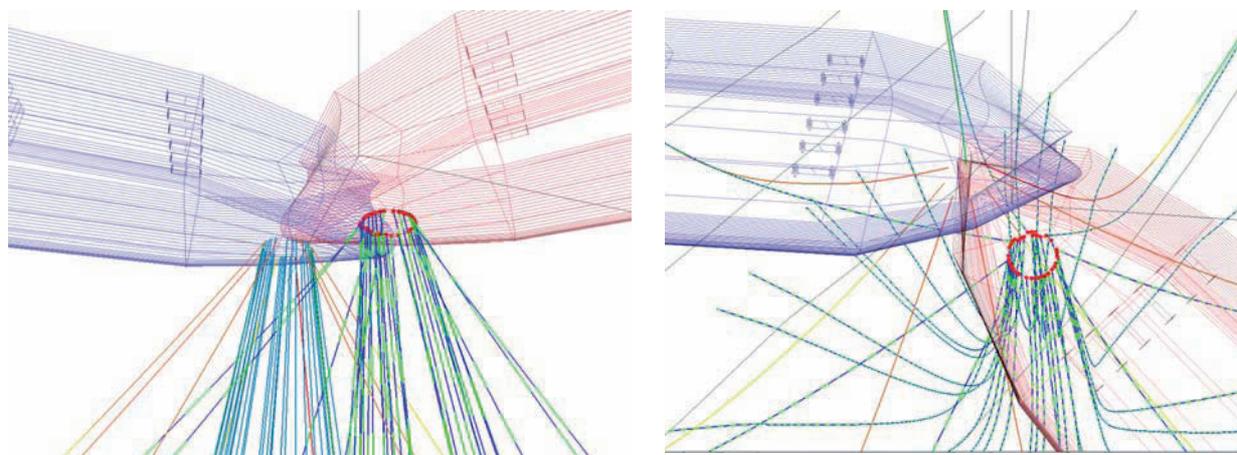


Figura 11: Vistas 3D – Destaques do sistema de ancoragem e *risers* sem torção considerando o novo procedimento numérico de representação de *turrets*

Adicionalmente, para este novo procedimento numérico será apresentado a seguir um quadro de figuras correspondentes a configuração do sistema para diferentes instantes de tempo de simulação dinâmica acoplada de forma a destacar que as conexões do *turret* se mantêm solidárias ao navio durante a movimentação angular de *roll* e *pitch* da unidade flutuante. Isto exemplifica que as expressões apontadas nas seções 4.3 e 4.4 são aplicáveis para grandes ângulos de *roll*, *pitch* e *yaw*.

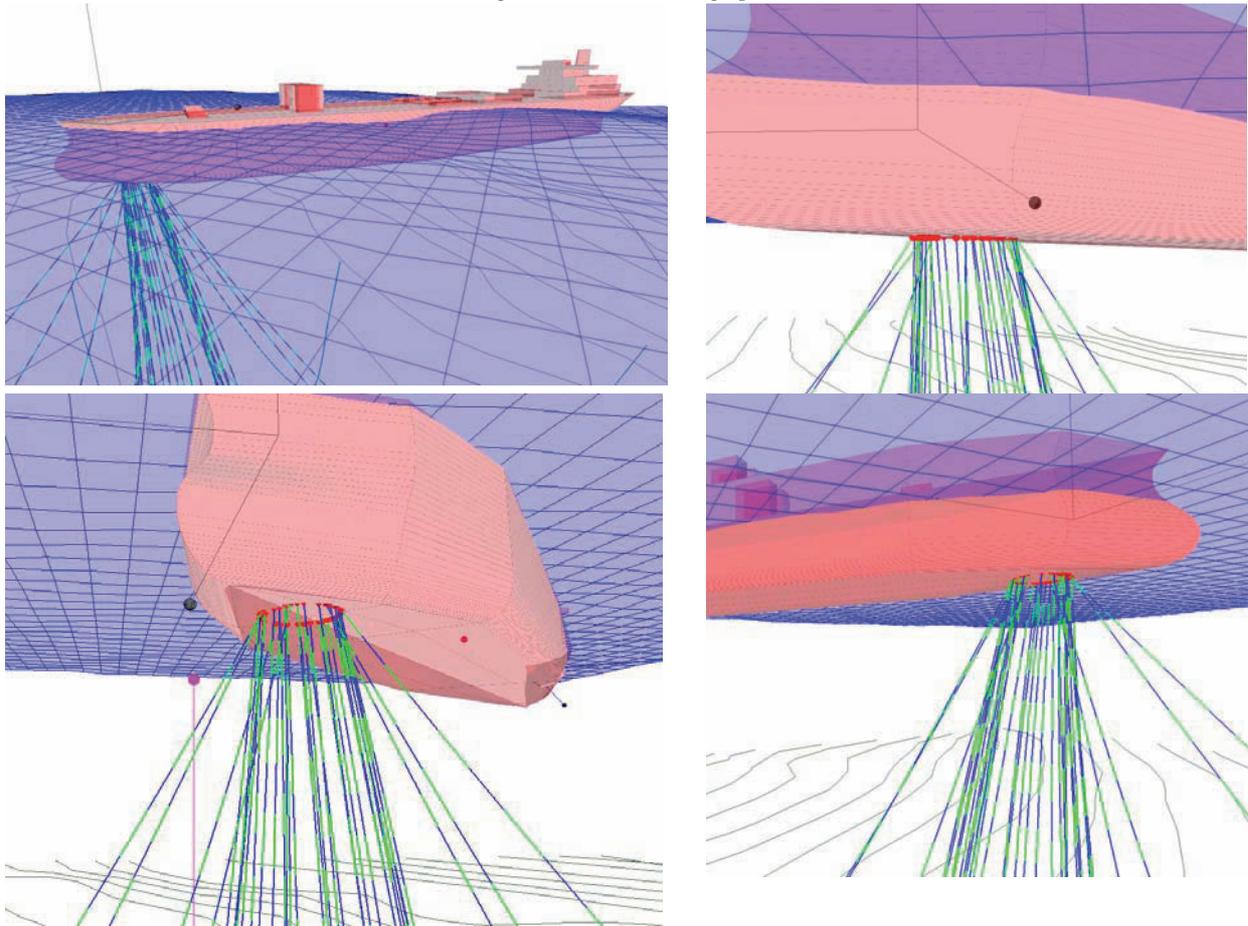


Figura 12: Vistas 3D – Comportamento dinâmico do sistema com uso do novo procedimento expedito

## 5.6 Comparação de Movimentos Angulares de *roll* e *pitch* entre o Primeiro e Terceiro Modelo

O objetivo desta seção é comparar através de gráficos os movimentos de *roll* e *pitch* da unidade flutuante obtidos com um mesmo caso de carregamento.

As Figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, os gráficos de *roll* e *pitch* do FPSO do sistema *turret* estudado, comparando o modelo simplificado (linhas conectadas no centro do *turret*) com o modelo, com suas conexões de projeto, que fazem uso do novo procedimento numérico expedito para representação de *turrets*.

Através destes gráficos, como era de se esperar, o tratamento do sistema *turret* pelo novo método expedito tende a contribuir, pela adição de rigidez, inércia e amortecimento das linhas, nos movimentos angulares de *roll*. O mesmo não pode ser percebido no movimento angular de *pitch*, uma vez que a distância do centro do *turret* ao CG da unidade (137m) é praticamente igual ao braço da resultante de forças verticais das linhas do sistema. Além disto, a rigidez hidrostática nesta direção é consideravelmente maior do que em *roll* (mais de cinquenta vezes), tornando a contribuição das linhas pouco significativa.

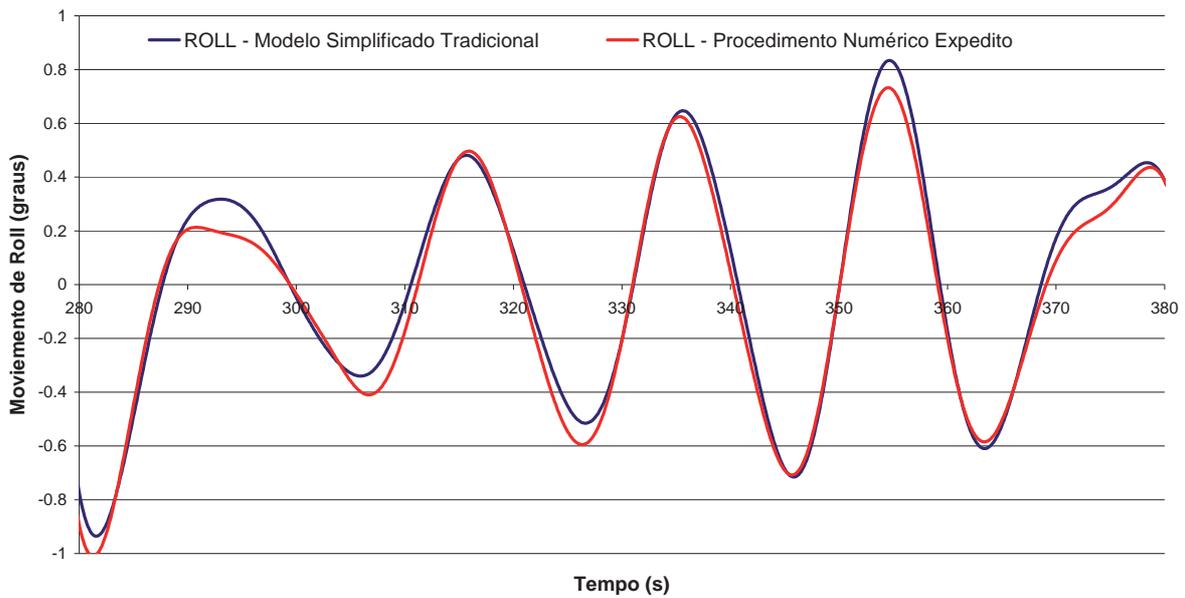
**Movimento de Roll**

Figura 13: Comparação entre o Movimento de Roll do Modelo Simplificado e com o uso do Procedimento Numérico Expedito

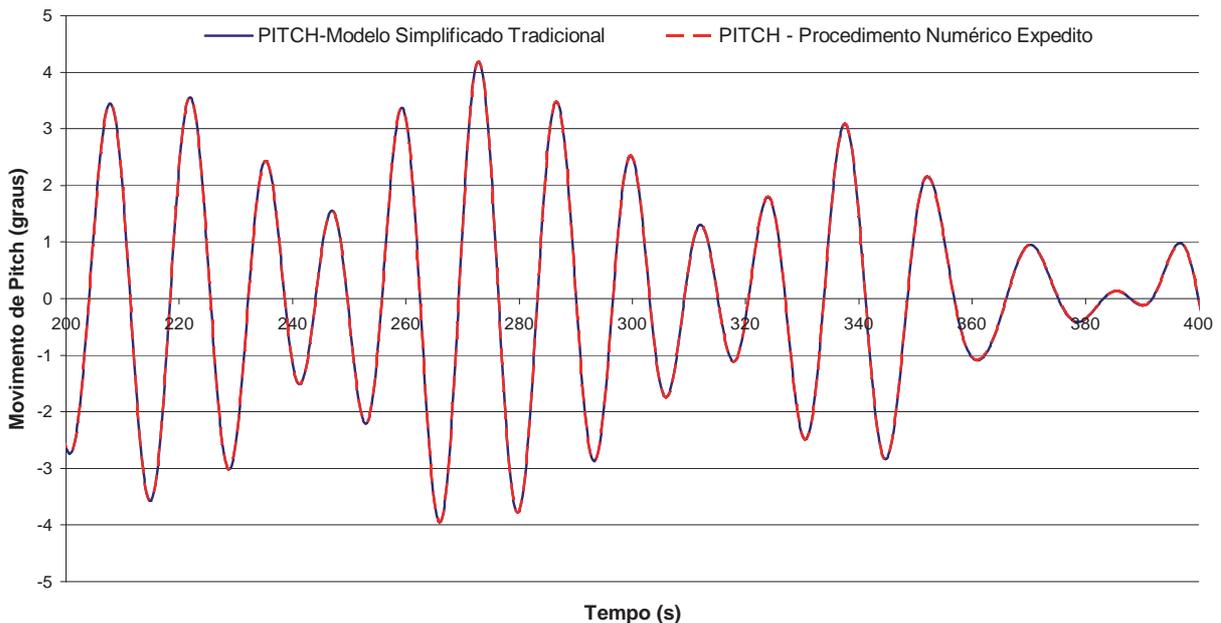
**Movimento de Pitch**

Figura 14: Comparação entre o Movimento de Pitch do Modelo Simplificado e com o uso do Procedimento Numérico Expedito

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme mencionado na introdução deste trabalho, embora o sistema *turret* seja um tipo de sistema SPM (*Single Point Mooring*), as disposições reais das conexões na mesa de amarra e *risers* são afastadas na ordem de 5m em relação ao centro do *turret*.

Apesar disto, as ferramentas computacionais acopladas tradicionais para análise de movimento de sistemas *offshore* não costumam tratar o funcionamento deste tipo de sistema. O tratamento numérico de sistemas *turret* é muitas vezes realizado simplificada através

da modelagem de todas as linhas chegando a um único ponto do casco (no centro do *turret*), a fim de evitar que os movimentos de corpo rígido de *yaw* da unidade flutuante torçam as linhas, representando assim, simplificada, o funcionamento do *turret*.

As desvantagens destas simplificações de modelagem recaem sobre a precisão dos resultados que pode diminuir a qualidade do projeto de ancoragem, principalmente quando as ancoragens são do tipo *tautleg* (ou semi- *tautleg*), conforme abordado na seção 3.

Diante disto, foi desenvolvido um novo procedimento numérico expedito para ser aplicado em programas de simulação acoplada casco-linhas de maneira a tratar de forma mais adequada modelos que compreendem sistemas *offshore* de produção do tipo *turret*.

Este novo procedimento é dito expedito porque ainda assume algumas aproximações ao comportamento do *turret*. Admite-se que o mesmo encontra-se, na configuração de projeto (posição inicial do modelo), com momento nulo em torno de seu eixo vertical. Além disto, o atrito de giro deste sistema bem como sua inércia de rotação não são considerados.

Ainda assim, este procedimento numérico apresenta ótimos resultados, muito superiores ao procedimento tradicional, pois baseia-se em:

- Pelo lado da iteração casco-linhas de um sistema dinâmico acoplado, não aplicar movimentos de rotação da unidade flutuante, em torno do eixo do *turret*, nas linhas, de forma a impedir que elas se torçam;
- E, pelo lado da iteração linhas-casco, calcular apropriadamente a contribuição de esforço de momento que o *turret* exerce sobre a unidade flutuante.

A implementação deste novo procedimento numérico foi realizada no programa SITUA-Prosím. Foi apresentado um estudo de casos com este programa em que se mostraram as vantagens da modelagem do novo procedimento numérico expedito sobre o procedimento de modelagem simplificada, tradicional, abordado na seção 3.

Pode-se concluir que o novo procedimento numérico apresentado neste trabalho é capaz de tornar os resultados das simulações acopladas de sistemas *turrets* mais precisos do que os obtidos através da modelagem simplificada de *turrets*. Tudo isto contribui para o ganho de qualidade e segurança nos projetos de sistemas *offshore* que envolvam simulações acopladas casco-linhas com *turret*.

## REFERÊNCIAS

- CHAKRABARTI, S.K., "Hydrodynamics of Offshore Structures". Computational Mechanics Publications/Springer-Verlag, 1987.
- SENRA, S.F., "Metodologias de Análise e Projeto Integrado de Sistemas Flutuantes para Exploração de Petróleo Offshore", Tese de D. Sc. , COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Abril de 2004.
- BAHIENSE, R.A., "Implementação e Avaliação de uma Metodologia Fortemente Acoplada para a Análise de Sistemas Flutuantes Offshore". Dissertação de M.Sc., PEC/COPPE/UFRJ, Dezembro de 2007
- CORRÊA, F.N., "Ferramentas Computacionais Para Análise Acoplada de Sistemas Offshore", Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Junho de 2008.
- LIMA, A.L., "Avaliação de Metodologias de Análise de Unidades Estacionárias de Produção de Petróleo Offshore". Dissertação de M.Sc., PEC/COPPE/UFRJ, Junho de 2006.
- JACOB, B.P., "Programa PROSIM: Simulação Numérica do Comportamento de Unidades Flutuantes Ancoradas, Versão 2.2a – Manual de Entrada de Dados", COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2001.
- JACOB, B.P., "Programa PROSIM: Simulação Numérica do Comportamento de Unidades Flutuantes Ancoradas, Versão 3.0a – Manual Teórico", COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2001.