Construção de um canal de testes para estudo de interação fluido estrutura

Jairo Fernando de Lima Coelho[1], Waldir Terra Pinto[2], Sebastião Cícero Pinheiro Gomes[3], Vagner Santos da Rosa[4], Vitor Irigon Gervini[5], André Luís Rodeghiero Rosa[6], Dino Pinheiro Cassel[7] & Eduardo Hartmann[8]

[1] Mestrando do Curso de Engenharia Oceânica – FURG, Rio Grande, RS – jairocoelho@gmail.com

[2] Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS – waldir.pinto@gmail.com

[3] Departamento de Matemática – FURG, Rio Grande, RS – scpgomes@terra.com.br

[4] Departamento de Matemática – FURG, Rio Grande, RS – vsrosa@inf.ufrgs.br

[5] Departamento de Física – FURG, Rio Grande, RS – gervini@gmail.com

[6] Graduando do Curso de Eng. de Computação – FURG, Rio Grande, RS – andrerodeghiero@yahoo.com.br

[7] Graduando do Curso de Eng. de Computação – FURG, Rio Grande, RS – dinocassel@yahoo.com.br

[8] Graduando do Curso de Eng. de Computação – FURG, Rio Grande, RS – eduardohart@gmail.com

RESUMO: Este trabalho apresenta uma descrição da construção de uma instalação para análise experimental de vibrações estruturais induzidas pelo escoamento sobre cilindros. As instalações são compostas por um canal, uma plataforma de reboque e sistemas de controle, de aquisição de dados e imagens. O canal é construído em vidro e apoiado sobre uma estrutura metálica projetada de modo a permitir a visualização do escoamento por todos os lados. A plataforma de reboque é dotada de um sistema que permite o movimento de translação dos cilindros além de ser capaz de induzir vibrações forçadas independentes em dois cilindros. A geração desses movimentos é feita por meio de quatro atuadores controlados por um sistema de controle malha fechada. Informações do escoamento são obtidas através da medição da pressão e da visualização de linhas de emissão geradas mediante a injeção de contraste a partir da estrutura

PALAVRAS-CHAVE: estudo experimental, canal, vibrações, cilindros.

ABSTRACT: This work presents the description of the construction of an experimental facility designed for the investigation of flow induced vibration on cylinders. The facility consists basically of a channel, a towing platform with controlled motions and systems for data and image acquisition. The channel is made of glass and is supported for a steel structure specially designed to allow visualization through the bottom as well as trough both sides of the channel. The towing platform is able to apply forced oscillatory motion in up to two cylinders in addition to longitudinal motion. These motions are controlled by closed loop system of the four actuators. The facility allows the acquisition of pressure, velocity, strain, acceleration and images.

KEYWORDS: experimental study, channel, vibration, cylinders.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento sobre estruturas cilíndricas é um dos problemas mais estudados no âmbito da interação fluido-estrutura. Para valores altos do número de Reynolds, ocorre o descolamento da camada limite, o que pode levar à formação de vórtices e turbulência. Este problema não possui solução analítica e a solução numérica apresenta uma demanda de processamento muito superior à oferecida pelos computadores disponíveis atualmente. Conseqüentemente, estudos experimentais são ferramentas imprescindíveis na busca do entendimento e de soluções para o problema. Um fenômeno importante que ocorre no escoamento sobre estruturas cilíndricas é a sincronização da freqüência de formação de vórtices com a freqüência de vibração da estrutura, seja ela natural ou forçada. Esse fenômeno é freqüentemente chamado na literatura de "lock in".

Em geral, o estudo experimental é feito com a utilização de instalações que disponham da capacidade de produzir movimento relativo entre o fluido e a estrutura. Isso pode ser atingido ou pelo movimento do fluido, mantendo a estrutura em repouso ou apenas com movimento oscilatório, ou com o movimento da estrutura, mantendo o fluido em repouso. No caso do estudo de vibrações induzidas pelo escoamento a estrutura pode ser flexível com freqüência natural próxima da faixa de freqüência de Strouhal ou a estrutura pode ser rígida podendo-se induzir vibração forçada na estrutura.

Este trabalho dedica-se à construção de uma instalação para análise experimental de vibrações estruturais induzidas pelo escoamento em cilindros. Estas instalações são compostas por um canal, uma plataforma de reboque e sistemas de aquisição de dados e imagens. O movimento relativo é produzido pela translação da estrutura no fluido em repouso. O canal é construído em vidro e apoiado sobre uma estrutura metálica projetada de modo a permitir a visualização do escoamento por todos os lados. A plataforma de reboque é dotada de um sistema que permite o movimento de translação dos cilindros além de ser capaz de induzir vibrações forçadas independentes em dois cilindros. A geração desses movimentos é feita por meio de quatro atuadores controlados por um sistema de controle em malha fechada. As informações sobre o escoamento são obtidas através da medição da pressão e da visualização de linhas de emissão geradas a partir da injeção de contraste.

Estas instalações permitem a realização de pesquisas que vão resultar em contribuições significativas para o desenvolvimento cientifico e tecnológico em vários ramos da engenharia.

2. MOTIVACAO E APLICAÇÕES NA ENGENHARIA OCEÂNICA

A principal motivação para a criação da infra-estrutura para ensaios de vibrações induzidas pelo escoamento em estruturas cilíndricas é a aplicação das pesquisas em estruturas oceânicas esbeltas. Estruturas cilíndricas esbeltas são amplamente utilizadas como componentes de sistemas oceânicos para fins de transmissão de força e/ou sinais e para fins de transferência de massa. Como exemplo pode-se citar cabos e umbilicais submarinos, amarras, risers e dutos submarinos. Essas estruturas são altamente flexíveis, pois seus comprimentos são bem maiores do que a dimensão característica das suas seções transversais, sobretudo em águas profundas, conforme ref.[4].

O comportamento mecânico de estruturas esbeltas é ditado pelo nível de tração a que a estrutura é submetida. Estruturas com alta tração apresentam rigidez geométrica e podem ser analisadas segundo uma abordagem quasi-estática. Nesta abordagem, primeiro determina-se a configuração de equilíbrio hidrostático e após determina-se a configuração de equilíbrio dinâmico usando a hipótese de pequenos deslocamentos em torno da configuração hidrostática. Já as estruturas com baixa tração sofrem grandes deslocamentos ainda que para cargas muito pequenas. Nestas circunstâncias, a análise hidrostática é irrelevante, devendo ser

feita tão somente a análise dinâmica. Deve-se notar que via de regra a análise estrutural é não-linear tanto para cabos com alta tração quanto para cabos com baixa tração. Cabo aqui tem a conotação de estruturas esbeltas em geral conforme ref.[6].

Um outro fator complicador na análise de cabos submarinos está na determinação do carregamento hidrodinâmico resultante da complexa interação do movimento relativo entre a estrutura e o fluido. O movimento do fluido é resultante da superposição de correntes e ondas oceânicas enquanto que o movimento da estrutura pode ser dividido numa componente devida ao movimento forçado induzido pelo movimento da instalação de topo e noutra componente resultante da própria interação fluido-estrutura. Em geral, o carregamento hidrodinâmico é determinado pela fórmula de Morison, que considera uma componente de carga proporcional ao quadrado da velocidade relativa (arrasto e sustentação) e outra proporcional à aceleração (forças de inércia), conforme ref.[1]. Na fórmula de Morison, todas as incertezas são consideradas através dos coeficientes de arrasto, sustentação e inércia. Esses coeficientes devem ser determinados experimentalmente. Evidentemente que esta fórmula é uma simplificação do problema. A interação-fluido estrutura é bem mais complexa, pois envolve troca de energia entre o fluido e a estrutura o que causar instabilidade da mesma. Uma outra peculiaridade de estruturas cilíndricas é o descolamento da camada limite, o que leva a formação de vórtices numa freqüência determinada pelo número de Strouhal, conforme ref.[11]. Porém, quando a estrutura vibra numa freqüência próxima à freqüência de Strouhal, ocorre um fenômeno chamado de sincronização de vórtices que se caracteriza pela coincidência da freqüência de formação dos vórtices com a freqüência da estrutura o que pode causar vibrações com amplitudes significativas. Esse problema é chamado de vibração induzida por vórtice.

O problema da análise da interação fluido-estrutura pode ser resumido da seguinte forma: Tem-se uma estrutura altamente flexível, sujeita a grandes deslocamentos, a uma vibração forçada (induzida pela instalação de topo), a um escoamento não-uniforme e dependente do tempo com ângulo de ataque que pode variar de 0 a 90 graus. O número de Reynolds baseado na componente normal da velocidade relativa indica a existência de regimes turbulentos e de transição para a turbulência e, evidentemente, a separação da camada limite, conforme ref.[1]. Portanto, a determinação da força axial baseada na integração das tensões viscosas não é válida. Além disso, muitas vezes essas estruturas são arranjadas em grupos de modo que existe a interferência entre as esteiras de escoamento. Outra região importante a ser analisada é a vizinhança do fundo onde o regime de escoamento pode ser alterado de forma significativa. Essas ocorrências acarretam mudanças significativas em termos de freqüência e amplitude do movimento da estrutura.

Esse cenário altamente complexo inviabiliza tanto a solução analítica quanto a solução numérica das equações de Navier-Stokes para a quase totalidade dos casos práticos de estruturas oceânicas esbeltas. A alternativa viável da engenharia é a utilização de modelos que podem ser chamados de híbridos, segundo os quais parte da solução é obtida por meios analíticos ou numéricos e outra parte obtida experimentalmente. Um outro aspecto importante da análise experimental é a possibilidade de validação de modelos baseados na solução das equações de Navier-Stokes (DNS). Esses modelos são factíveis para números de Reynolds muito abaixo dos encontrados em aplicações práticas.

3. PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DAS INSTALAÇÕES

Os parâmetros importantes para a análise de vibrações induzidas pelo escoamento são o número de Reynolds, o número de Strouhal, a freqüência e a amplitude da vibração. Essas grandezas estão associadas às características das instalações do laboratório. No caso em questão, as características importantes são o comprimento do canal, a velocidade de

deslocamento da plataforma de reboque e o diâmetro do cilindro. Essas características determinam o tempo disponível para realização do ensaio e, como conseqüência, o número máximo de períodos que podem ser medidos durante o ensaio. O intervalo de tempo total disponível para a realização do ensaio pode ser calculado pela Equação 1:

$$\Delta t = \frac{L}{U} \tag{1}$$

onde Δt é o intervalo de tempo L é o comprimento útil do canal e U é a velocidade da plataforma de reboque. O número de Strouhal pode ser considerado como 0,2 [11], ou seja, a freqüência de desprendimento de vórtice pode ser aproximada pela Equação 2:

$$f_s = \frac{S_t U}{D} \approx \frac{U}{5D} \tag{2}$$

onde f_s é a freqüência de desprendimento de vórtices, S_t é o número de Strouhal e D é o diâmetro do cilindro.

Com a análise de vibrações induzidas pelo escoamento, freqüentemente tem-se interesse na determinação da possibilidade de sincronização do desprendimento de vórtices com freqüências múltiplas da freqüência fundamental. Em termos do número de períodos medidos, a situação critica ocorre para as menores freqüências, conseqüentemente maiores períodos. Admitindo-se que a faixa de freqüência a ser estudada varie entre a quinta sub-harmônica e a quinta super-harmônica da freqüência de Strouhal, o maior período a ser medido é portanto dado pela Equação 3:

$$T_{max} = \frac{5}{f_s} \approx \frac{25D}{U} \tag{3}$$

onde T_{max} é o maior período presente no processo. Nestas condições, o número de períodos n dos dados a serem aquisitados é dado pela Equação 4:

$$n = \frac{U\Delta t}{25D} = \frac{L}{25D} \tag{4}$$

Portanto, o número máximo de períodos que pode ser aquisitado durante o ensaio depende do comprimento do canal e do diâmetro do cilindro. Considerando que o canal tem 16 metros de comprimento, o seu comprimento útil pode ser considerado de 15 metros de comprimento e um cilindro de 40 milímetros de diâmetro, tem-se que o número de períodos é igual a 15. O aumento no número de períodos pode ser obtido através do aumento do comprimento do canal ou através da redução do diâmetro do cilindro.

O número de Reynolds pode ser então obtido pela Equação 5:

$$R_e = \frac{UD}{\nu} \tag{5}$$

onde R_e é o número de Reynolds e ν é o coeficiente de viscosidade cinemática. Para a situação acima e para uma velocidade máxima de 0,5 m/s, tem-se um Reynolds máximo da ordem de 20.000. Mas se quisermos analisar a quinta super-harmônica, a freqüência máxima fica em 12,5 Hz. Porém, a aplicação de uma freqüência tão alta pode provocar vibrações no fluido. Uma possível solução para a investigação da quinta super-harmônica seria considerar valores mais baixos para a velocidade e, por conseqüência, valores mais baixos para o número de Reynolds. Por exemplo, para o caso em análise se a velocidade de for de 0,2 m/s a freqüência da quinta super-harmônica será de 5 Hz, o que é compatível com o sistema mecânico a ser implementado.

Um último parâmetro importante é a amplitude da oscilação forçada. Pode-se mostrar facilmente que a amplitude máxima de vibrações induzidas por vórtices está em torno de um diâmetro do cilindro. Porém, neste caso o número de Reynolds da análise fica em torno de 8.000.

4. DESCRIÇÃO DO CANAL DE TESTES

A construção do canal de testes envolve cálculo estrutural e dimensionamento de vários componentes, a partir dos quais são definidos os demais, conforme ref.[4],[7],[9]e[10].

Primeiramente define-se o tamanho do canal e a partir deste, especificam-se suas demais dimensões. Para um melhor aproveitamento da chapa de vidro, o canal é formado por um cubo em vidro de 0,74 x 0,73 metros de seção transversal e comprimento de 9,60 metros, sendo utilizado, para obter este tamanho, três chapas de vidro de 19mm de espessura, além de dois pedaços de 0,74 x 0,73 metros para fazer o fechamento do canal nas extremidades. A espessura do vidro foi determinada de modo a suportar a pressão da água contida no seu interior, principalmente na parte inferior, que tem um vão ao longo do canal sem suporte e, também, foi escolhido um vidro comum, pois um vidro temperado, embora tenha mais resistência em espessuras mais finas, apresenta distorções de imagens, o que prejudicaria um dos atributos do canal que é permitir filmar vórtices formados durante o deslocamento da estrutura no interior do canal.

Para dar suporte a este canal, foi confeccionada uma base em metalon estruturado ao longo dos 16 metros. Cada módulo tem 3,20 metros. Nos pés da estrutura da base, tem-se um sistema de nivelamento da estrutura, conforme ref. [12], de modo a permitir deixar esta estrutura totalmente nivelada. A figura 6 mostra o desenho da base da estrutura.

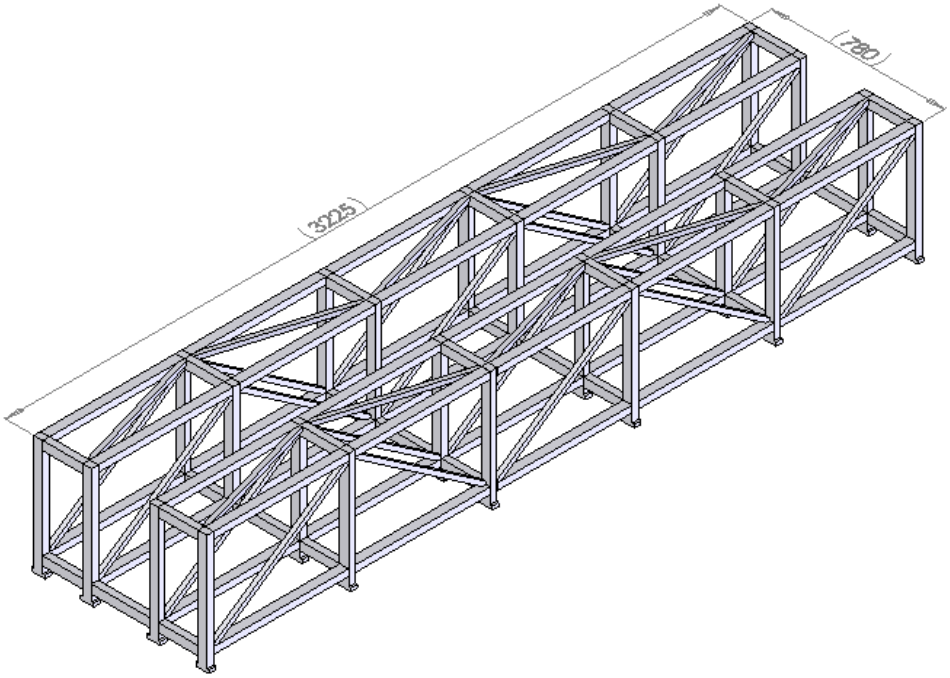

Figura 6 – Montagem da base da estrutura do canal

O canal é composto por 5 módulos, conforme pode ser visto na figura 9, sendo montados em seqüência e unidos por parafusos nas laterais de modo a dar a distância adequada para o encaixe do canal de vidro mais o material isolante, conforme ref. [2], que será utilizado entre o vidro e a estrutura.

Nas laterais destes módulos será fixada uma estrutura conforme figura 7, a qual servirá para suportar o esforço lateral, ao qual o vidro será submetido pela pressão da água. Terá entre o vidro e a estrutura o mesmo material isolante da base. Esta estrutura também é composta de seis módulos e será fixada à estrutura de apoio do canal e entre si por parafusos. Esta estrutura também tem um vão livre, que permitirá além de observar os experimentos, filmá-los.

A estrutura de suporte do vidro de fechamento lateral do canal, também tem vão livre e é fixada tanto à estrutura da base do canal como à estrutura lateral, conferindo desta maneira rigidez ao conjunto, conforme figura 8.

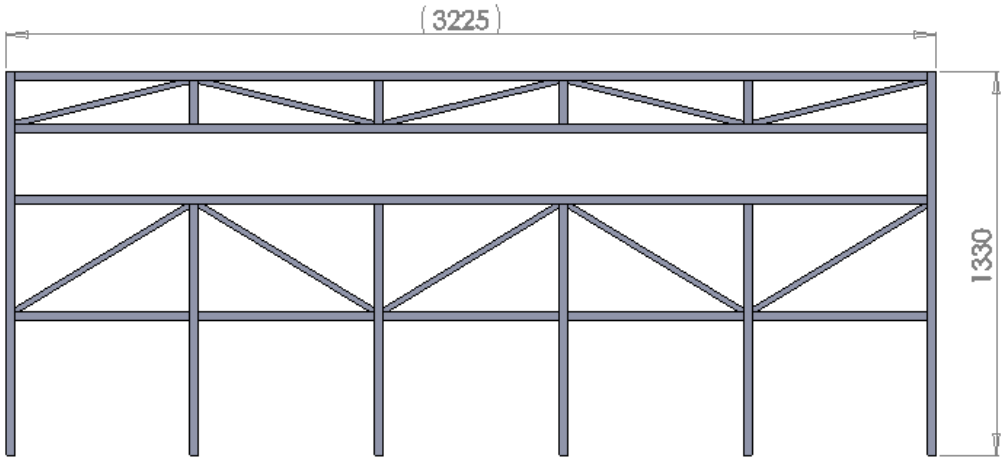

Figura 7 – Vista da estrutura da lateral do canal

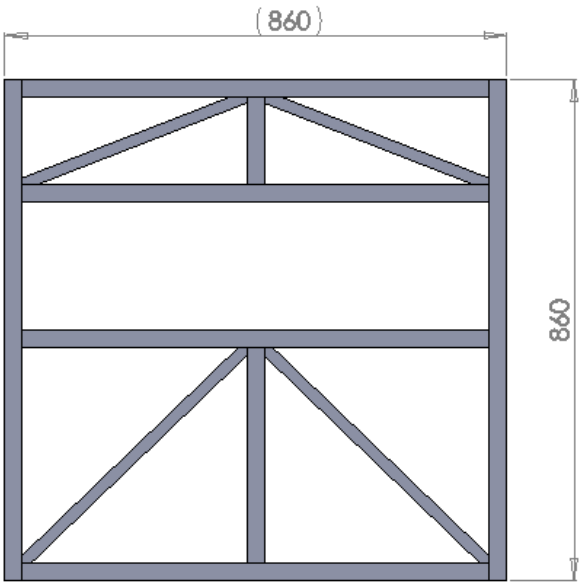

Figura 8 – Estrutura lateral menor do canal

A montagem do canal é mostrada pela figura 9. O canal possui em um dos lados, na parte inferior, a saída de água, por onde esta será escoada quando da limpeza do mesmo.

Com o canal montado, partimos para a montagem da plataforma de reboque, a qual será colocada sobre o canal de testes. Após montar o canal, a próxima etapa é a montagem da estrutura lateral que ira suportar a plataforma de manobra. A estrutura de suporte da plataforma foi confeccionada em perfil U dobrado, prancheta e chapa metálica, de modo a suportar o carregamento vertical da plataforma e o carregamento horizontal do canal, devido à pressão da água. Como o esforço lateral é maior, reforçamos a estrutura lateral, suporte da plataforma de reboque, de modo a utilizarmos um apoio de contenção na estrutura do canal, com a devida isolação, visto que não queremos transmissão de possíveis vibrações da estrutura lateral para o canal. Diante do exposto acima, a estrutura lateral foi dimensionada de maneira a suportar, além do carregamento vertical originado pela plataforma, o carregamento horizontal provocado pela pressão de água no interior do canal. Esta estrutura terá também uma área livre para não comprometer a já deixada na estrutura do canal. Esta estrutura será fixada no piso e sobre ela os trilhos onde se deslocará a plataforma de reboque, sendo que entre os trilhos e a estrutura foi colocado um sistema que permite fazer o alinhamento horizontal e vertical dos trilhos..

A plataforma de reboque foi confeccionada em estrutura de alumínio, tendo quatro apoios, através de carros com esferas, os quais encaixam nos trilhos. Foi colocado um eixo preso em mancais de rolamento, sendo que na extremidade deste foram colocadas engrenagens, as quais engrenam em cremalheira, transmitindo assim o movimento de deslocamento da plataforma, garantindo que não há deslizamento nesta transmissão.

O movimento longitudinal desta plataforma de reboque será realizado a partir de um moto-redutor de 0,37 KW de potência, fixado na própria plataforma e transmitindo movimento para um dos eixos através de roda e correia dentada, de modo a evitar-se deslizamento. A variação

de velocidade do motor é feita a partir de um conversor de freqüência, o qual receberá os comandos a partir de um controle de malha fechada implementado no sistema de tempo real.

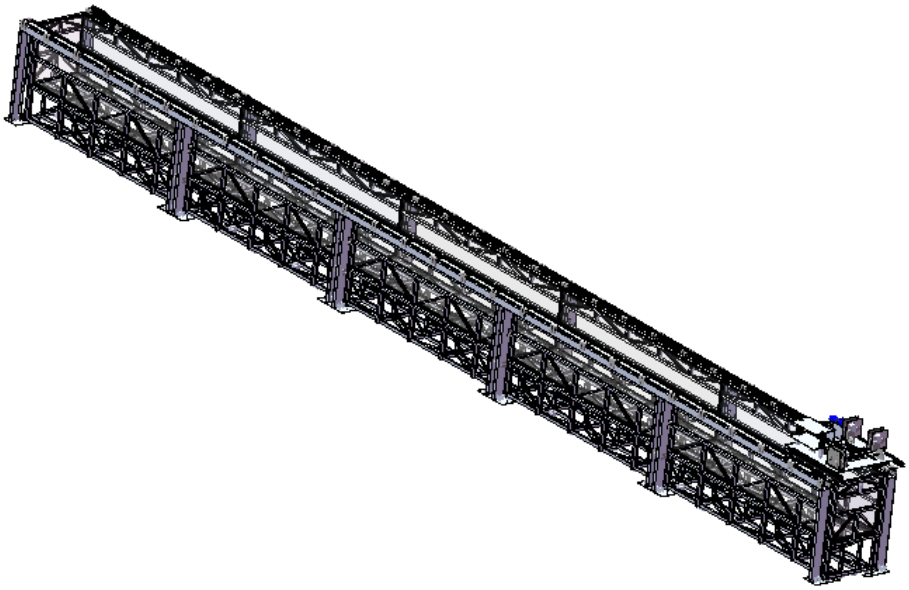

Figura 9 – Montagem do canal

Como o controle de velocidade é feito no motor, poderia ocorrer um deslizamento entre a roda e o trilho, alterando então a velocidade pretendida, mas isso não ocorrerá, pois a roda dentada engrena na cremalheira colocada paralela aos trilhos, evitando este deslizamento. Pode-se observar esta montagem na figura 10.

Cabe salientar que, neste projeto, a velocidade linear máxima da plataforma de reboque é de 1,0 m/s e o comprimento do canal de 16 metros.

Nesta plataforma de reboque serão fixados os cilindros para análise. Esta análise consiste, neste trabalho, em visualização de vórtices, e medição da pressão exercida sobre os cilindros ao deslocar-se em um meio fluídico e da deformação sofrida pelos mesmos durante este deslocamento.

Além do deslocamento longitudinal, será possível imprimir a um grupo de cilindros deslocamentos longitudinais relativos e deslocamentos transversais e a outro grupo de cilindros somente deslocamentos transversais. Estes deslocamentos ocorreram através de atuadores, montados sobre a plataforma de reboque. Estes atuadores são compostos de uma estrutura onde será colocado um motor de corrente contínua e um sistema de redução, através de polia e correia sincronizada, o qual permite uma redução de 1:9. A velocidade do motor é controlada por um sistema de controle em malha fechada, sendo esta verificada através de um encoder colocado no eixo motor. No eixo de saída do redutor do atuador foi colocada uma roda dentada, e o conjunto é fixado na plataforma de modo que esta roda dentada fique sobre um dos lados do espaço que o cilindro tem para deslocar-se.

Do outro lado é colocada uma outra roda dentada, de tamanho menor e mesmo passo (ou módulo) de modo a permitir a colocação de uma correia dentada unindo-as. Um dispositivo fixado à correia é fixado também ao suporte do cilindro, o qual está sobre guias. Deste modo, quando o atuador imprimir movimentos, a transmissão será repassada à correia dentada, que por sua vez, ao deslocar-se, irá deslocar também os cilindros em análise.

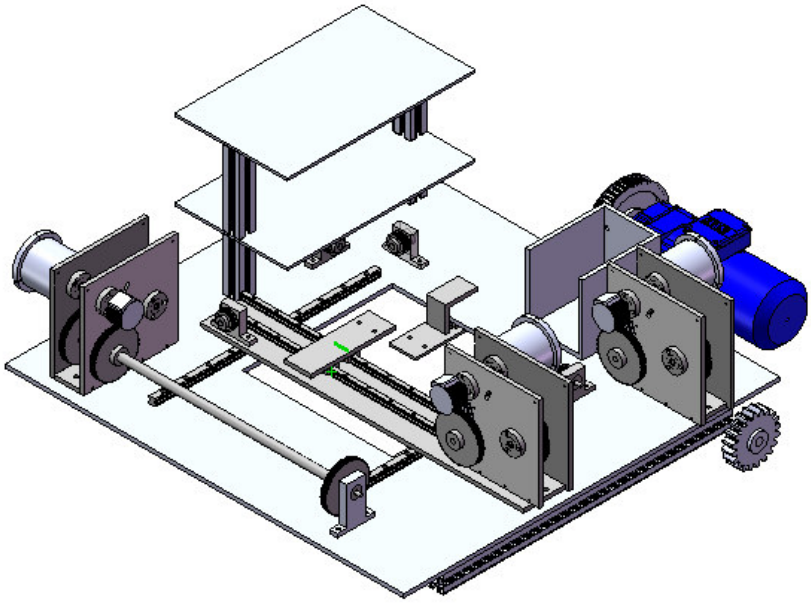

Figura 10 – Montagem da plataforma de reboque

Foi utilizado um atuador para cada movimento imposto aos cilindros. Desta maneira consegue-se induzir nos cilindros em análise movimentos relativos de translação e ao mesmo tempo movimentos transversais, que resultarão em movimentos harmônicos dos cilindros. A figura 11 mostra a montagem do redutor do atuador confeccionado, o qual movimenta os cilindros.

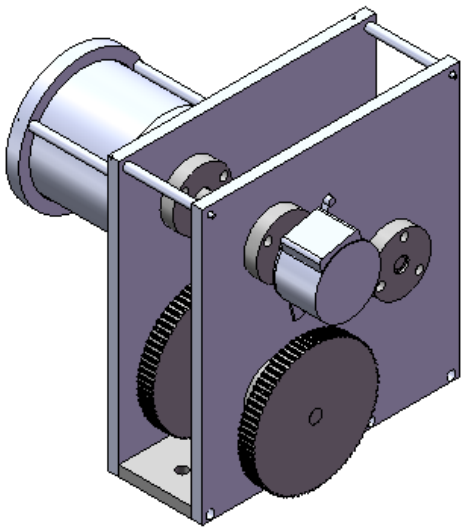

Figura 11- Redutor do atuador dos cilindros

Neste trabalho estes movimentos oscilatórios permitirão trabalhar com freqüências de até 5 Hz e com amplitudes de deslocamento de até uma vez o diâmetro do cilindro em análise. É importante salientar que, devido ao tamanho do canal, teremos limitações no diâmetro do cilindro.

Após toda a estrutura montada, pode-se realizar testes com cilindros, que serão no primeiro momento a visualização do desprendimento de vórtices através da injeção de contraste e a medição da pressão sobre o cilindro através de transdutores de pressão, com os sinais captados através de placa de aquisição de sinais e uso do programa LabVIEW de aquisição de dados.

5. PROJETO ELETRO-ELETRÔNICO E CONTROLE

5.1. Acionamento do motor trifásico

O acionamento do motor trifásico, responsável pelo movimento da plataforma, é feito pelo inversor de freqüência MOVITRAC® LT E, conforme ref. [8]. Ele converte sinais de baixa potência (vindos da placa de saídas) em sinais de alta potência necessários para o acionamento do motor AC. A interface disponível para efetuar o controle de liberação, velocidade e sentido de rotação do motor é a régua de bornes de sinal mostrada na figura 12.

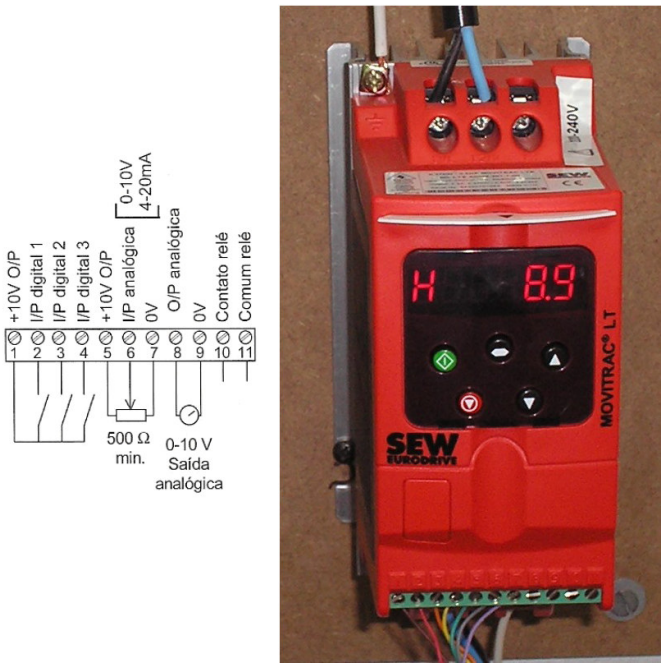

Figura 12 – Régua de bornes de sinal e Inversor de Freqüência

5.2. FPGA

Para interpretar os comandos recebidos da interface, via porta serial, e gerar as velocidades necessárias para cada um dos quatro motores é usada uma placa FPGA (field-programmable gate array) Virtex-II Pro Development. Ela é um dispositivo de hardware programável com dois processadores PowerPC, 30816 células lógicas, 136 multiplicadores de 128 bits, um módulo DDR SDRAM DIMM que suporta até 2 gigabytes de memória, módulo ethernet, porta usb, entrada para cartão Compact Flash, RS-232 (serial). Além de vários pinos de entrada/saída distribuídos em um módulo de alta velocidade e em dois de baixa velocidade, estes dois últimos somando 40 pinos, usados no envio de sinais às placas.

5.3. Interfaceamento FPGA – Inversores

A placa de saída é responsável por adequar os níveis de tensão do FPGA (0 a 2,6V) aos níveis de tensão do inversor(0 a 10V). Através de suas saídas o sentido de rotação e o setpoint de velocidade são controlados. O circuito implementa um conversor Digital/Analógico(DAC) no qual um sinal de PWM de 8 bits de resolução vindo do FPGA é aplicado à sua entrada, possibilitando 256 níveis de tensão distintos na saída, que, no caso, são os bornes do inversor. Tais níveis são necessários ao setpoint analógico de velocidade do MOVITRAC® LT E. No caso do controle do sentido de rotação, somente dois níveis são importantes, 0 e 100% de PWM. Tais níveis aplicam, respectivamente, 0 e 10V na entrada digital do inversor. Quando ela está em nível baixo a plataforma gira no sentido horário. Caso esteja em nível alto, gira no sentido anti-horário.

5.4. Acionamento dos motores CC

Para o acionamento dos motores de corrente contínua foi desenvolvida uma etapa de potência através de um circuito denominado Ponte-H. Sua função é possibilitar a inversão do sentido de rotação dos motores bem como o controle de sua velocidade. Quando os MOSFETs M1 e M4 estão ativos (figura 13), a corrente flui pelo motor em um sentido, gerando rotação. Quando M2 e M3 estão ativos, o sentido de rotação é invertido. Para variar a velocidade de rotação dos motores é aplicado um sinal de PWM (modulação por largura de pulso) ao gate dos MOSFETs. Quanto maior for o período do ciclo ativo do PWM maior será a tensão efetiva aplicada ao motor e, portanto, maior a velocidade de rotação. O sinal de PWM é gerado pelo FPGA.

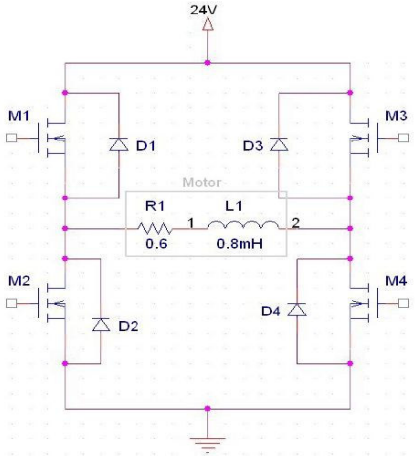

Figura 13 – Circuito da Ponte-H simplificado.

5.5. Sensoreamento

Para efetuar o controle em malha fechada da planta foram utilizados sensores que medem a posição angular dos atuadores. Tais sensores são chamados de encoders incrementais. Os sinais, pulsos provenientes desses sensores, são ondas quadradas que fornecem ao sistema de controle a referência em posição do eixo do motor. Tais sinais são transmitidos em dois canais, A e B, defasados de 90º para indicar o sentido de rotação. A decodificação desses sinais é feita pelo FPGA. Para adequação dos sinais provenientes dos encoders (5V TTL) foi desenvolvido um circuito que recebe os pulsos dos canais A e A¬ (sinal complementar ao de A) , executa uma comparação e envia a saída no nível de tensão adequado (0 a 3,3V) ao FPGA. O procedimento é realizado da mesma forma para o canal B e seu complementar, B¬. Na figura 14 vê-se o layout da placa dos encoders de quatro entradas, uma para cada motor.

5.6. Programa de controle e interface de operação

A linguagem usada para a implementação do software foi a C, com controle em malha fechada, conforme ref. [11]. Para poder controlar a plataforma foi construída uma interface gráfica com a ferramenta de programação C++Builder 6, que usa a linguagem C++. O programa consta de entradas dos comandos que o sistema embarcado vai usar na execução da lei de controle e uma caixa de texto para manter o operador informado do status do sistema, em tempo real. A interface de operação foi desenvolvida de modo a facilitar a operação do sistema, sendo que o operador entra com os parâmetros iniciais, como velocidade e distância a percorrer para o deslocamento longitudinal da plataforma e freqüência e amplitude de oscilação para os movimentos do cilindro. Esta interface pode ser observada na figura 15.

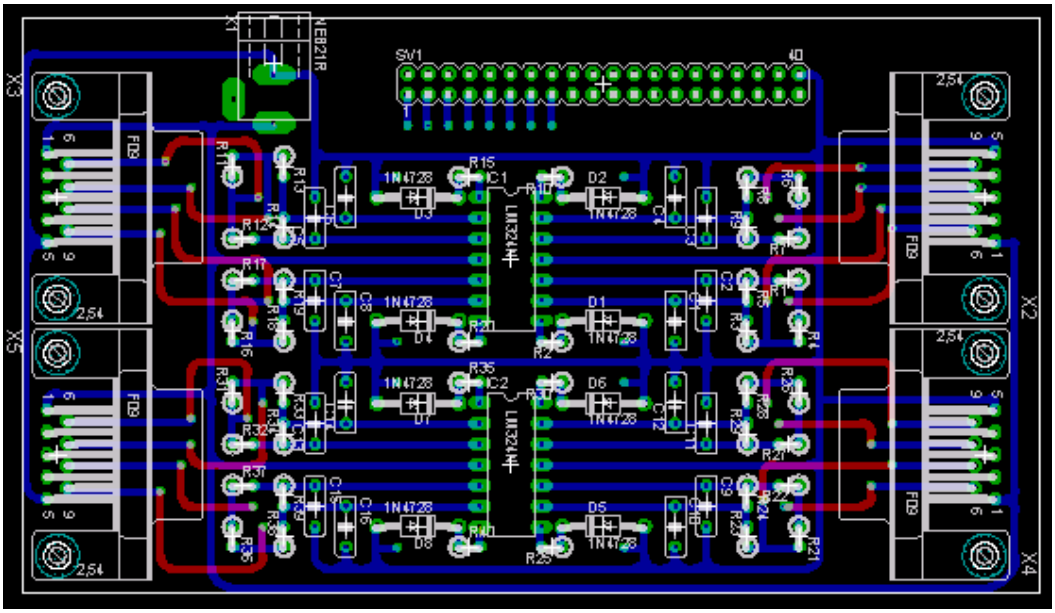

Figura 14 – Layout da placa dos Encoders

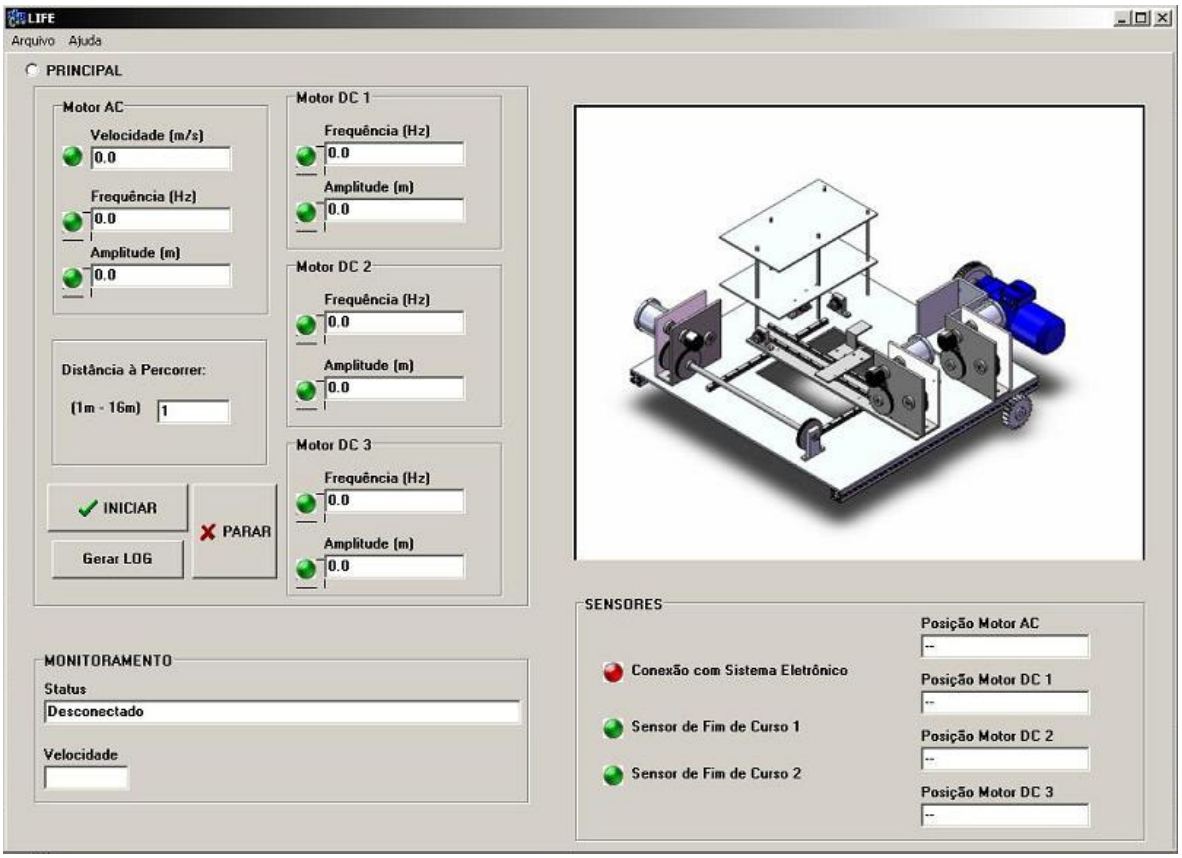

Figura 15 – Interface de operação do LIFE

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a descrição das instalações para estudos de vibrações induzidas pelo escoamento que fazem parte das instalações do Laboratório de Interação Fluido Estrutura (LIFE) que se encontram concluídas na FURG, como pode ser visto na figura 16. Essas instalações vão permitir a realização de ensaios com vibração forçada assim como ensaios com estruturas flexíveis com freqüência natural na faixa de 0 a 5 Hz. O número de Reynolds máximo da análise está em torno de 40.000, sendo muito superior ao Reynolds passível de solução numérica via DNS.
Estas instalações vão permitir um avanço significativo nas pesquisas fundamentais de vibrações induzidas pelo escoamento e turbulência, assim como no desenvolvimento de modelos aplicados às estruturas oceânicas esbeltas.

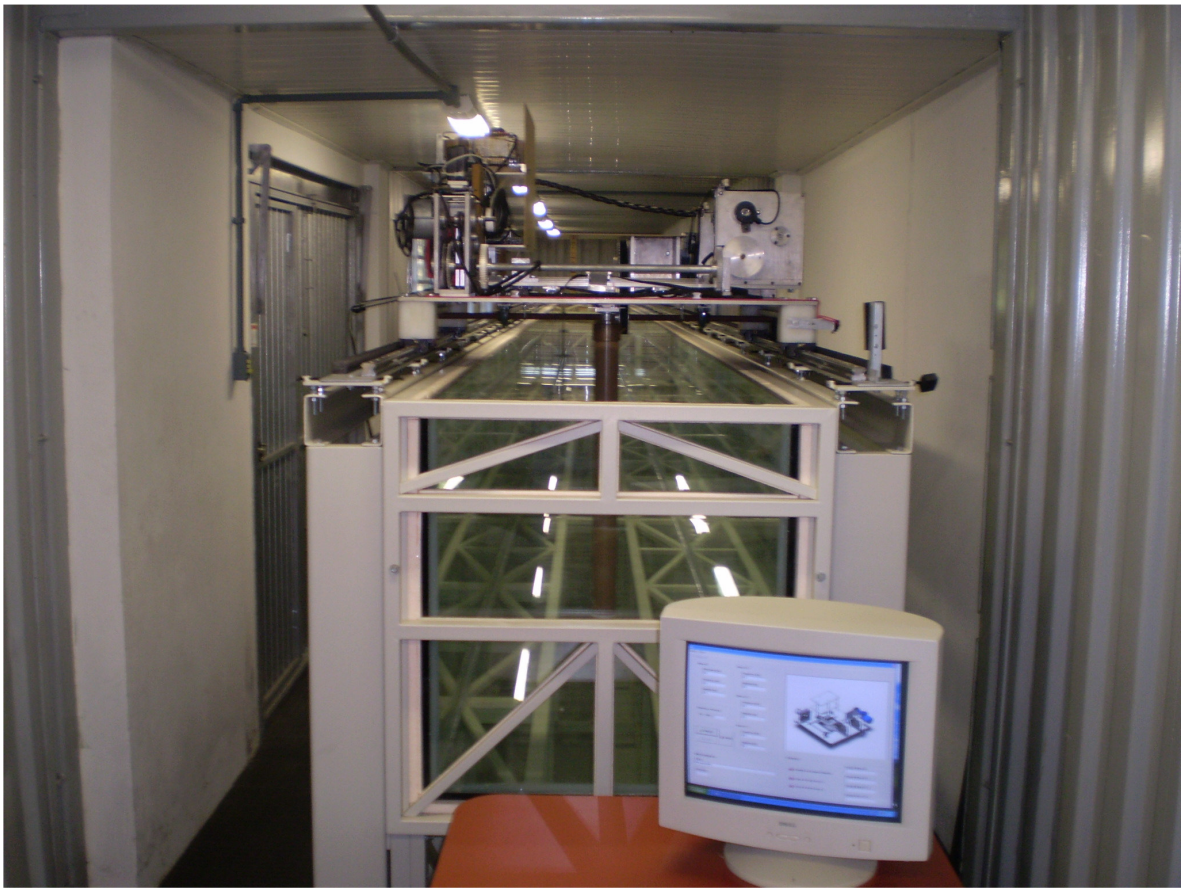

Figura 16 - Canal de testes do LIFE

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists.* EUA, 1993
2. DENVER Impermeabilizantes – www.denver.ind.br
3. FOSSEN, T. I.; Guidance and Control of Ocean Vehicles. England, 1994
4. NEWMANN, J. N. *Marine Hidrodynamics.* EUA,1992.
5. NIEMANN, G. *Elementos de Máquinas, Vol. I, II e III.* Brasil, 1971.
6. PINTO, W. T. *On the dynamics of low tension marine cables.* London, 1995. Tese (Doutorado), University of London.
7. TIMOSHENKO, S. P. *Resistência dos Materiais, Vol. I e II.* Brasil, 1982.
8. SEW EURODRIVE. Sew-Eurodrive Brasil Ltda. www.sew.com.br
9. STEMMER, C. E. *Projeto e Construção de Máquinas.* Brasil, 1979
10. SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R. *Mechanical Engineering Design.* EUA, 1989.
11. SUMER, B. Mutlu and FREDSOE, Jorgen. Hydrodinamics Around Cylindrical Structures. USA, 1997.
12. VIBRA-STOP, Indústria de Amortecedores de Vibração Vibra Stop Ltda. – www.vibra-stop.com.br