

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO - IFSP  
MESTRADO EM AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE PROCESSOS**

André Bassoli Napoleão  
Orientador: Carlos Frajuca

**CONTROLE DE UM EXPERIMENTO PARA MEDIR A  
VELOCIDADE DA INTERAÇÃO GRAVITACIONAL COM O  
DETECTOR MARIO SCHENBERG**

São Paulo

2013

**CONTROLE DE UM EXPERIMENTO PARA MEDIR A  
VELOCIDADE DA INTERAÇÃO GRAVITACIONAL COM  
O DETECTOR MARIO SCHENBERG**

Dissertação submetida ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Automação e Controle de Processos.  
Orientador: Prof. Dr. Carlos Frajuca

São Paulo

2013

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre” e aprovada em sua forma final pelo Programa Pós-graduação em Automação e Controle de Processos.

São Paulo, de abril de 2013.

---

Prof<sup>ª</sup>  
Coordenador do Curso

**BANCA EXAMINADORA:**



INSTITUTO FEDERAL  
SÃO PAULO  
Campus São Paulo

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO  
CAMPUS SÃO PAULO  
DIRETORIA GERAL DO CAMPUS SÃO PAULO  
Coordenadoria de Registros Escolares de Pós-Graduação

## ATA DE EXAME DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Nome do Programa: **Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos**

Nome do(a) Aluno(a) : André Bassoli Napoleão

Nome do Orientador: Prof. Dr. Carlos Frajuca

Nome do Co-orientador:

Título do Trabalho: "CONTROLE DE EXPERIMENTO PARA MEDIR VELOCIDADE DE INTERAÇÃO GRAVITACIONAL COM O DETECTOR MÁRIO SCHENBERG"

Abaixo o resultado de cada participante da Banca Examinadora

Nome completo dos Participantes Titulares da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Carlos Frajuca – Orientador	IFSP – SPO	Aprovado
Prof. Dr. Fábio da Silva Bortoli	IFSP – SPO	Aprovado
Prof. Dr. Sergio Turano	UNICSUL	Aprovado
Nome completo do Participante Suplente da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Profª. Drª. Nadja Simão Magalhães	UNIFESP	
Prof. Dr. Ricardo Pires	IFSP – SPO	

Considerando-o:

APROVADO

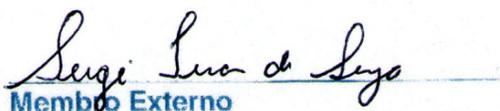
NÃO APROVADO

Assinaturas

São Paulo, 23 de abril de 2013

  
Presidente da Banca

  
Membro Interno

  
Membro Externo

Observações:

Dedico este trabalho à minha família:  
Sérgio, Maria Alice e Regiane,  
estes que me ajudaram  
e me apoiaram nesta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Carlos Frajuca pela amizade, atenção, ensinamentos e incentivos sem jamais desistir de mim e que sem os quais não teria terminado esse trabalho.

Aos colegas de curso, com os quais compartilho a alegria desta conquista.

Aos meus pais Sérgio e Maria Alice, pelo apoio, amor e pela confiança destinada a mim.

A minha esposa Regiane, que me suportou nesse tempo com carinho e dedicação.

Aos meus bichos Frederico, Juca e Lilica, que me deram alegria em minha vida.

Aos companheiros de trabalho que me ajudaram nos momentos que nada parecia dar certo

A todas as amizades construídas durante o curso, esperando que sejam fortalecidas a cada dia.

A todos os colaboradores do IFSP, em especial os Professores do curso de Mestrado e Automação pelos ensinamentos e pela amizade.

## RESUMO

Esse trabalho visa fornecer uma opção para o controle de um experimento que irá gerar um sinal gravitacional de maré periódico (não uma onda gravitacional) utilizando ferramentas como o FPGA e sistemas operacionais determinísticos. Este sinal gerado será detectado por um detector esférico tipo massa-ressonante para ondas gravitacionais que está localizado no Instituto de Física da Universidade de São Paulo com o objetivo de alcançar uma sensibilidade, em  $h$ , de  $10^{-21}$ , numa frequência central de  $3200 \text{ Hz}$  com uma banda de  $\pm 200 \text{ Hz}$ . O detector não é um experimento isolado, pois há nesse momento a construção ao redor do mundo de uma rede para detecção de ondas gravitacionais onde esse experimento pode ser usado. Isso poderá ser crucial na questão ainda indefinida que é a velocidade de propagação da interação gravitacional. A teoria da relatividade geral de Einstein prevê que esta velocidade é a mesma da velocidade da luz, outras teorias preveem velocidades maiores ou menores do que a velocidade da luz. Nesse trabalho, o objetivo é encontrar ferramentas para o controle da rotação de um dispositivo com duas massas girantes que irão gerar um sinal gravitacional a ser lido pelo detector Mario Schenberg.

Palavras-chave: Interação gravitacional, Velocidade interação gravitacional, Onda gravitacional, sistema operacional determinístico (ou de tempo real) e FPGA

## **ABSTRACT**

The goal of this work is to give an option to the control of an experiment that will generate a gravitational tide periodic signal (not a gravitational wave) making use of tools like the FPGA deterministic operational systems. Such signal will be detected by a spherical resonant-mass gravitational wave detector being built in the Physics Institute at São Paulo University with the goal to reach a sensitivity, in  $h$ , of  $10^{-21}$ , with a central frequency of  $3200 \text{ Hz}$  and a bandwidth of  $\pm 200 \text{ Hz}$ . This detector is not an isolated experiment, because in this very moment a net for detection of gravitational waves is being built and can be also used. This could be crucial in the yet undefined question which is the velocity of gravitational interaction. The Einstein General Theory of Relativity sets this velocity to be equal to the light velocity, other theories set different velocities bigger or smaller than the light velocity. The objective of this work is find tools for rotation control of the device with two mass that will generate a gravitational signal that will be read by Mario Schenberg detector.

Key-words: Gravitational interaction, Gravitational interaction velocity, Gravitational wave. Operational system deterministic (or real-time) and FPGA

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação do período orbital do pulsar PSR 1913+16 com o tempo .....	14
Figura 2 – Representação esquemática de um detector interferométrico.....	16
Figura 3 – Efeito da passagem de uma onda gravitacional, incidindo na direção z, sobre um anel de partículas.....	18
Figura 4 – Joseph Weber e o Detector de Massa Ressonante de Primeira Geração.....	18
Figura 5 – Visão geral do detector Mário Schenberg com algumas de suas partes.....	21
Figura 6 – Antena esférica do detector de Ondas Gravitacionais Mario Schenberg.....	22
Figura 7 – Posição dos seis Casadores Mecânicos de Impedância utilizados no detector Mário Schenberg relativamente à superfície de um icosaedro truncado.....	23
Figura 8 – Sistema duas massas girantes.....	28
Figura 9 – Modelagem do sistema Emissor e Detector para uma massa girante.....	29
Figura 10 – Modelagem do sistema Emissor e Detector para duas massas girantes.....	31
Figura 11 – Resumo da aplicação.....	34
Figura 12 – Arquitetura do Sistema RIO.....	35
Figura 13 – Componentes de um chip FPGA.....	37
Figura 14 – Módulos de Entrada e Saída da série C.....	39
Figura 15 – Plataforma completa para desenvolvimento com tecnologia RIO.....	39
Figura 16 – Funcionamento do Encoder de quadratura.....	40
Figura 17 – Projeto onde é determinado o local de execução do VI.....	41
Figura 18 – Interface de usuário localizado no sistema operacional de tempo real.....	42
Figura 19 – Diagrama de Blocos do sistema RT para leitura das entradas e determinação da velocidade e aceleração.....	42
Figura 20 – Painel Frontal do FPGA para leitura do Encoder de quadratura.....	43
Figura 21 – Diagrama de Blocos do FPGA para leitura do Encoder de quadratura.....	43
Figura 22 – Paradigma do driver do dispositivo de aquisição de dados.....	44
Figura 23 – Código do FPGA para controle das rotações da ventoinha.....	45
Figura 24 – Painel frontal do FPGA para controle das rotações da ventoinha.....	45
Figura 25 – Código no processador de tempo real para controle das rotações da ventoinha.	46
Figura 26 – Interface de usuário para controle embarcado da ventoinha ventoinha.....	46
Figura 27 – Sistema utilizado para a realização das experiências.....	47
Figura 28 – Planta da Quanser utilizada na experiência 1.....	47
Figura 29 – Planta utilizada na experiência 2.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fonte das Ondas Gravitacionais e Método de Detecção.....	13
Tabela 2 – Detectores de Ondas Gravitacionais Interferométricos e características.....	17
Tabela 3 – Classificação dos detectores de massa ressonante, segundo suas Características de operação.....	19
Tabela 4 – Características dos Detectores de (OG) de Massa Ressonante.....	20

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 Fontes de Ondas Gravitacionais.....	12
1.2 Detecção de Ondas Gravitacionais.....	14
1.3 Detector MÁRIO SCHENBERG.....	21
1.4 Objetivos Gerais.....	25
1.5 Objetivos Específicos.....	26
1.6 Descrição dos Capítulos.....	27
<b>2 AMPLITUDE DOS SINAIS GRAVITACIONAIS.....</b>	<b>28</b>
2.1 Sinal de onda gravitacional de duas massas girantes.....	28
2.2 Sinal newtoniano de massas girantes.....	29
2.2.1 Sinal newtoniano de uma massa girando ( <i>Força de Maré</i> ).....	29
2.2.2 Sinal newtoniano de duas massas girando ( <i>Força de Maré</i> ).....	31
<b>3 DESCRIÇÃO E CONTROLES DOS SISTEMAS.....</b>	<b>34</b>
3.1 Resumo da Aplicação.....	34
3.2 Ferramentas.....	35
3.2.1 Sinal Operacional de tempo real ( <i>Real-Time</i> ),,,.....	36
3.2.2 <i>FPGA</i> .....	36
3.2.3 <i>Módulos de Entrada e Saída</i> .....	38
3.2.4 <i>Ambiente Gráfico de Programação</i> .....	39
3.3 Metodologia.....	40
3.4 Ferramentas de Hardware.....	47
<b>4 CONCLUSÕES E PRÓXIMOS PASSOS.....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>51</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Diversos cientistas através da história trouxeram avanços para a ciência, como Erastóstenes (276-195 AC), Cláudius Ptolemaeus (120 –189), Nicolau Copérnico (1473-1543), Galileu-Galilei (1564-1642) e Isaac Newton (1642-1727).

A teoria da Relatividade Geral formulada por Albert Einstein (1879-1955) em 1916 trouxe uma nova maneira de observar os fenômenos do universo.

A partir destes estudos, diferentes experimentos foram realizados para comprovar a teoria, mas em nenhum deles foi possível comprovar de forma definitiva o fenômeno chamado de Ondas Gravitacionais (OG).

Na física, as ondas gravitacionais são ondulações da curvatura do espaço-tempo que se propagam como uma onda a partir de uma fonte. As ondas gravitacionais teoricamente transportam energia como radiação gravitacional. Fontes de ondas gravitacionais detectáveis podem incluir sistemas estelares binários compostos de anãs brancas, estrelas de nêutrons ou buracos negros.

Embora a radiação gravitacional não tenha sido detectada diretamente, há evidências indiretas de sua existência. Vários detectores de ondas gravitacionais foram construídos, no entanto ainda não houve sucesso na detecção de tais fenômenos.

Tal detecção não é simples por dois motivos:

- As OG interagem fracamente com a matéria
- A intensidade das OG é muito baixa.

O Brasil também faz parte deste esforço internacional através do detector Mario Schenberg.

Esse trabalho visa dar continuidade ao mestrado desenvolvido por Débora Moreira Padovani. Usaremos os resultados gerados nessa pesquisa adicionando outras técnicas de controle para a construção um dispositivo capaz de gerar sinal gravitacional de maré periódico e assim permitir a medição da velocidade da interação gravitacional nos detectores, sendo um deles o Mario Schenberg.

### 1.1 Fontes de Ondas Gravitacionais

Tendo como base a tese de doutorado de Kilder Leite Ribeiro, é possível a classificação das fontes de ondas gravitacionais em quatro tipos definidos pela quantidade de  $q$ , que é o número de ciclos coerentes apresentados pelo sinal.

Com isso, é possível determinar a largura da banda para uma frequência característica  $f_c$

$$\Delta f = \frac{f_c}{q} \quad (1.1)$$

Onde:

$\Delta f$  - Largura de banda;

$f_c$  - frequência característica e emissão da fonte.

$q$  - número de ciclos coerentes apresentados pelo sinal.

Essas quatro fontes são apresentadas abaixo:

a) *Bursts* (impulsivas)

São fontes cujas ondas mantêm a coerência durante um tempo correspondente a poucos ciclos da própria onda ( $q$  pequeno). Como exemplo deste tipo de fonte, tem-se supernovas (SN's), colapsos de estrelas ou aglomerados de estrelas para formar um buraco negro (BN), coalescência de binárias compactas - estrelas de nêutrons (EN's) e BN supermassivos, e instabilidades em EN's em rotação.

b) Fontes periódicas

São fontes cujos sinais são emitidos continuamente e mantêm a coerência durante um tempo longo ( $q$  grande). Como exemplo, temos EN's e estrelas binárias.

c) Estocásticas

São fontes correspondentes ao somatório de uma distribuição aleatória e, portanto, não coerentes ( $q \rightarrow 0$ ). Entre estas fontes, destacam-se as superposições de estrelas binárias, estrelas de população III, OG's primordiais, transições de fase e cordas cósmicas.

d) Fontes Espiralantes (“Chirp”)

Correspondem às fontes emissoras de OG's na fase final de espiralação de um sistema binário ( $q$  variável).

Com base nessa classificação, é possível associar a frequência da OG com o tipo da fonte emissora e com isso, o melhor método para sua detecção.

Tabela 1 – Fonte das Ondas Gravitacionais e Método de Detecção

Frequência	Fonte	Método de detecção
$10^{-16}$ Hz	Primordial	Anisotropia da radiação cósmica de fundo em micro-ondas
$10^{-9}$ Hz	Primordial Cordas Cósmicas	Tempo de pulso de ms
$10^{-4} - 10^{-1}$ Hz	Estrelas binárias super massivas BN ( $10^3 - 10^7 M_s$ )	Interferometria laser no espaço.
$10 - 10^3$ Hz	Espiral de EN e BN binários ( $1 - 10^3 M_s$ )	Interferometria laser na Terra
$10^3$ Hz	Coalescência de EN e BN binários Supernovas	Detectores de massa ressonante

Fonte: (RIBEIRO, INPE 2003 – P.34)

O dispositivo proposto aqui, é para os detectores de massa ressoante.

## 1.2 Detecção de Ondas Gravitacionais

Até o presente momento não existe evidência direta da existência de OG, embora seja possível a sua verificação experimental indireta através da observação da taxa de decaimento do período orbital do Pulsar Binário PSR 1913+16. Em 1993, o Prêmio Nobel da Física foi atribuído a Russell Hulse e Joseph Taylor da Universidade de Princeton 1974 pela descoberta de um pulsar, designado PSR1913 +16, num sistema binário, em órbita ao redor de uma estrela com um outro centro de massa comum. Usando a antena de 305m em, Hulse e Taylor detectaram uma pulsação de emissões de rádio e, assim, identificaram a Arecibo fonte como um pulsar, de rápida rotação. A estrela de nêutrons em seu eixo gira 17 vezes por segundo; assim o pulso período é de 59 milissegundos. Após se verificar pulsos de rádio por algum tempo, Hulse e Taylor repararam que havia uma variação sistemática na hora de chegada dos pulsos. Às vezes, os pulsos foram recebidos um pouco mais cedo do que o esperado e às vezes mais tarde do que o esperado. Estas variações ocorrem de uma maneira harmoniosa e repetitiva, com um período de 7,75 horas. Eles perceberam que tal comportamento é previsível e que o pulsar estavam em uma órbita com outra estrela binária.

A figura 1 mostra a variação do período orbital do pulsar pelo tempo e a linha contínua mostra como essa variação deveria ocorrer se causada apenas pela emissão de ondas gravitacionais.

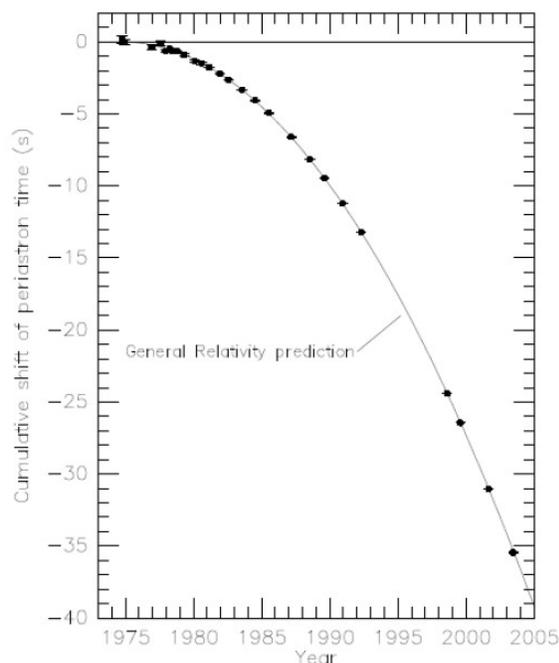


Figura 1 – Variação do período orbital do pulsar PSR 1913+16 com o tempo.

Fonte: TAVARES – UNICAMP 2010 – P.16

Os estudos para detectar as OG tiveram início na década de 1960 quando Joseph Weber propôs um método para a medição do tensor de Riemann e de uma possível detecção de OG. Ele foi o responsável pelo desenvolvimento do primeiro detector de OG utilizando a técnica de massa ressonante e, além disso, foi um dos idealizadores dos interferômetros a laser (BLAIR, 2000) para detecção de OG.

Hoje, podemos encontrar atividades em vários países, que utilizam as seguintes técnicas:

- Interferométricos: mede a distorção do espaço-tempo causada pela passagem da onda;

- Massa Ressonante: a partir da absorção da energia emitida por um corpo massivo com frequência de ressonância igual a da onda é possível observar a OG.

Com isso, grandes recursos tecnológicos e financeiros são empregados nos mesmos e em contrapartida vários segmentos da física estão em grande expansão como controle de sistemas criogênicos e isolamento vibracional. Este esforço tem como objetivo desenvolver detectores cada vez mais sensíveis e precisos. A interação das (OG) com a matéria é muito fraca e sua amplitude é muito pequena, desta forma os detectores precisam ser extremamente sensíveis, em contrapartida esta baixa interação com a matéria permite a propagação da (OG) pelo espaço interestelar sem a perda de energia ou características principais. Ou seja, com a detecção das (OG) será possível analisar sistemas extremamente distantes da Terra, assim como a formação do universo.

#### 1.2.a Detectores Interferométricos

Este método de detecção foi estudado inicialmente na década de 1970. A configuração mais simples deste tipo de detector é a mesma apresentada pelo interferômetro de Michelson. Interferômetro é um instrumento que utiliza a característica ondulatória da luz para gerar um padrão de interferência.

No interferômetro, um laser altamente potente e monocromático é enviado a um divisor de feixe, o qual direciona dois feixes que percorrem caminhos ópticos perpendiculares entre si. Ao final de cada caminho há um espelho preso a uma massa de teste. Ao ser refletido pelos espelhos os feixes voltam novamente para o divisor onde são recombinados e detectados pelo foto-sensor. O espelho é livre para movimentos horizontais como mostrado na figura 2:

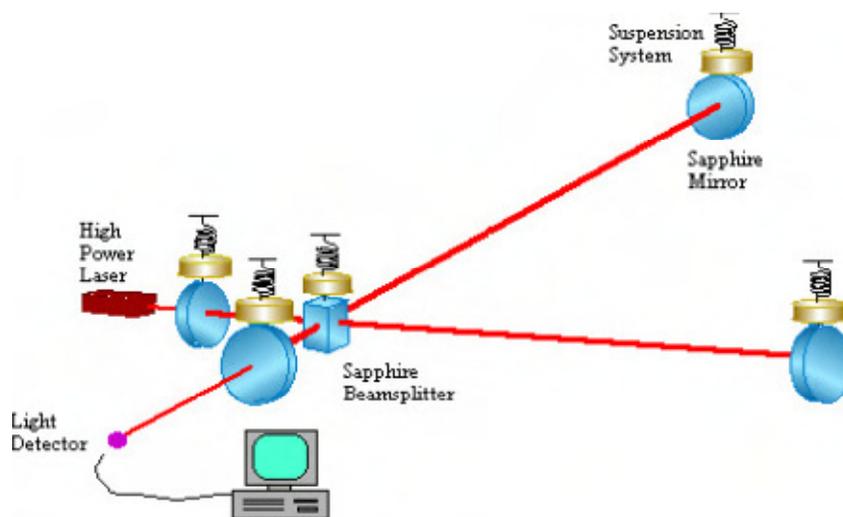


Figura 2 – Representação esquemática de um detector interferométrico.  
Fonte: Ju et al. (2000).

Inicialmente é produzida uma diferença de fase de  $180^0$  entre os dois feixes, esta diferença de fase é produzida através de ajustes no braço do interferômetro. Ao retornarem para o foto-sensor não é detectado sinal, neste cenário é dito que o interferômetro está ajustado em “franjas-negras”.

A interação da OG com as massas de teste situadas nos espelhos altera a posição relativa entre os espelhos, alterando assim, o ângulo de fase entre os feixes de luz e gerando sinal no foto-sensor (RIBEIRO, 2003).

Quando comparados com os detectores de massa ressonantes, os detectores interferométricos apresentam a grande vantagem o fato de que apresentam uma banda larga de detecção, ou seja, pode varrer uma grande faixa de frequências. No entanto, apresentam algumas desvantagens (BORTOLLI, 2011):

- São bem mais caros que os detectores de massa ressonante;
- Não podem responder sobre a quantização das ondas gravitacionais;
- São “cegos” para certas direções e polarizações das OG, quando comparados aos detectores ressonantes de massa esférica.

Atualmente detectores interferométricos com braços de alguns quilômetros de comprimento encontram-se em operação ou em fase de desenvolvimento.

Dependendo da frequência da OG a ser detectada há necessidade que o detector interferométrico possua braços com grandes comprimentos, de até 4000 metros. Este tipo de situação não é possível ser realizada na Terra, devido a sua curvatura. Tendo em vista esta dificuldade há um projeto que prevê a construção de um detector interferométrico no espaço, o LISA.

Na tabela 2, Borloti (2011) relaciona os detectores de OG interferométricos com suas principais características:

Tabela 2: Detectores de OG interferométricos e características

Detector e Localização	Tamanho dos braços (m)	Banda (Hz)	Status	$h(\text{Hz})^{-1/2}$
<b>LIGO I =&gt; Advanced LIGO</b> (Hanford, Washington, USA)	4000	40 – 6000	Em modernização	$\sim 6 \times 10^{-22}$
<b>LIGO II =&gt; Advanced LIGO</b> (Hanford, Washington, USA)	2000	40 – 6000	Está sendo desmontado	---
<b>LIGO III =&gt; Advanced LIGO</b> (Livingston, Louisiana, USA)	4000	40 – 6000	Em modernização	$\sim 5 \times 10^{-23}$
<b>VIRGO =&gt; Advanced VIRGO</b> (Piza, Itália)	3000	$10^0 - 10^4$	Em modernização até 2014	$\sim 6 \times 10^{-23}$
<b>TAMA</b> (Mitaka, Tokyo, Japão)	300	$10^1 - 10^4$	Em modernização	$\sim 8 \times 10^{-22}$
<b>GEO 600 =&gt; GEO HF</b> (Hannover, Alemanha)	600	$10^0 - 10^4$	Em modernização	$\sim 1 \times 10^{-22}$
<b>AIGO</b> (Perth, Austrália)	80 a 4000	---	Em planejamento	---
<b>INDICO</b> (Índia)	---	---	Em estudo de possibilidade	---
<b>LCGT</b> (Japão)	---	---	Telescópio criogênico de grande escala	---
<b>ET (Einstein Telescope)</b> (European Commission, FP7)	---	< 10	2008 início Projeto 2017 início preparação do local	---
<b>LISA Pathfinder</b> (Espacial, ESA)	---	---	Lançamento em 2012	---
<b>LISA</b> (Espacial, ESA)	$\sim 5 \times 10^9$	$3 \times 10^{-5} - 0,1$	Entre 2014 e 2020	$< 10^{-23}$

Fonte: Furtado – INPE 2009 – P.67

### 1.2.b Detectores Massa Ressonante

Os detectores de massa ressonante são constituídos por um corpo metálico massivo (antena), cujos modos fundamentais de vibração são excitados na incidência de um pulso de OG com frequência característica próxima da frequência de oscilação da antenna, ou seja, as posições relativas das partículas que constituem a massa ressonante sofrem alterações. Na Figura 3, há um exemplo de um anel de partículas sofrendo o efeito da passagem de uma OG, como pode ser visto há oscilação em duas direções:  $h_+$  e  $h_x$ .

Esta oscilação possui amplitude muito baixa, impossível de ser verificada naturalmente. Desta forma, os detectores de massa ressonante possuem transdutores elétricos acoplados em sua superfície, de modo que essas oscilações mecânicas sejam convertidas em sinais elétricos, sendo assim ampliadas para serem medidas (FRAJUCA, BORTOLI, MAGALHÃES, 2009).

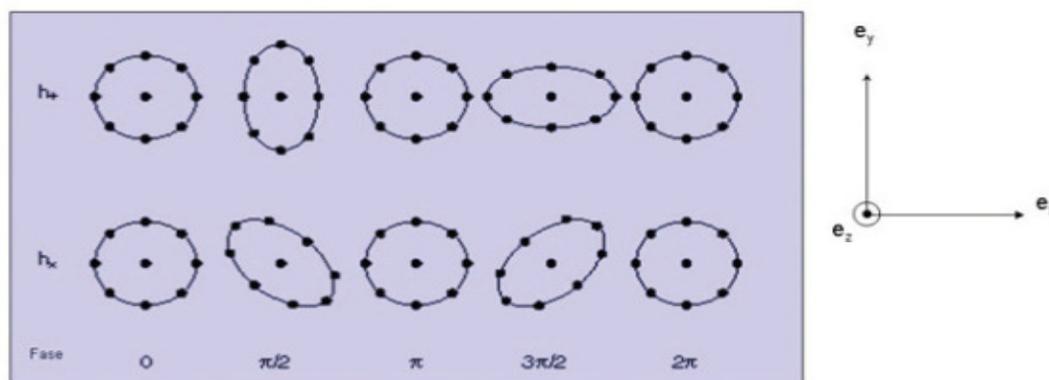


Figura 3: Efeito da passagem de uma onda gravitacional, incidindo na direção  $z$ , sobre um anel de partículas.  
 Fonte: FRAJUCA, C. et al, 2007

Na década de 1960 Joseph Weber construiu o primeiro detector de OG, utilizando como método de detecção uma massa ressonante (Figura 4). Este detector consistia em um cilindro metálico massivo mantido a temperatura ambiente e isolado vibracionalmente em uma câmara de vácuo, cuja frequência longitudinal de 1,6 Hz era monitorada por sensores piezo-elétricos (Ribeiro 2003). Este tipo de detector é classificado como de primeira geração



Figura 4 - Joseph Weber e o Detector de Massa Ressonante de Primeira Geração.  
 Fonte: (WEBER 1960 apud FURTADO 2009 p.27)

Com o objetivo de aumentar a sensibilidade do detector foi idealizado um detector de massa ressonante criogênica. Este tipo de detector entrou em operação na década de 1980 e sua massa ressonante é resfriada a uma temperatura de cerca de 4K, utilizando hélio líquido. A utilização deste novo método deu origem aos detectores de segunda geração. A partir do procedimento de resfriamento e devido a melhorias no sistema vibracional, transdutores mais sofisticados e de amplificadores de amplitude mecânica houve um aumento de sensibilidade dos detectores de segunda geração da ordem de dez mil vezes em relação aos de primeira geração (BORTOLI, 2011).

Em seguida foram criados os detectores de massa ressonante de terceira geração, eles se distinguem por serem resfriados a temperaturas ultra-criogênicas (abaixo de 1K, próximas ao zero absoluto), através da utilização de refrigeradores por diluição. Utilizando essa tecnologia, é possível que alguns detectores de terceira geração atinjam a sensibilidade de  $10^{-20} - 10^{-21}$  ( $\text{Hz}^{-1/2}$ ).

Na década de 1990 iniciou-se a utilização de detectores de quarta geração, possuem a mesma tecnologia dos de terceira geração só que utilizam massa ressonante esférica. Este é tipo de detector de OG ao qual se enquadra o Mario Schenberg. Segundo Melo (2002) a utilização de massa esférica tem as seguintes vantagens:

- Omnidirecionalidade:

O esferóide, que apresenta cinco modos quadripolares fundamentais, é sensível a ondas oriundas de qualquer direção do espaço

- Sensibilidade independente da polarização:

O detector é sensível aos dois tipos de polarização previstos para as ondas

- Possibilidade de determinação da direção de origem da onda, com um único detector:

Decompõe-se a onda nos cinco modos, resolvendo-se o problema inverso, descobre-se a direção (MAGALHÃES et al. 1995 apud MELO 2002 p.43)

- Seção reta para absorver energia cerca de 70 vezes maior que uma barra na mesma frequência de detecção.

Desta forma podem-se classificar os detectores de massa ressonante segundo a Tabela 3:

Tabela 3: Classificação dos detectores de massa ressonante, segundo suas características de operação

<b>Geração</b>	<b>Massa Ressonante / Vácuo</b>	<b>Temperatura</b>
Primeira	Cilíndrica	Ambiente
Segunda	Cilíndrica sob vácuo	4 K
Terceira	Cilíndrica sob vácuo	Menor que 0,1 K
Quarta	Esférica sob vácuo	Menor que 0,1 K

Fonte: (BORTOLI, 2011)

A tabela 4 relaciona os detectores de massa ressonante existentes com suas características mais relevantes:

Tabela 4 – Características dos Detectores de (OG) de Massa Ressonante.

Detector, Localização e Classificação (Geração)	Material	Massa (ton)	Comp. ou Diâmetro (m)	Temp. (K)	Temp. de Ruído (mK)	Transdutor	Frequência (Hz)	Situação Oper.	H ( $10^{-20} \text{Hz}^{-1/2}$ )
<b>ALLEGRO</b> (LSU, Baton Rouge, Louisiana, EUA) 2ª Ger.	Al 5056	2,30	3,0	4,2	6	Ressonante Indutivo	900	Inativo	1 - 0,1
<b>EXPLORER</b> (CERN, Genebra, Suíça) 2ª Ger.	Al 5056	2,30	3,0	2,0	6	Ressonante Capacitivo	900	Inativo	1 - 0,1
<b>NIOBE</b> (UWA, Perth, Austrália) 2ª Ger.	Nb	1,50	2,50	5,00	1	Ressonante Paramétrico Microonda	700	Inativo	50
<b>NAUTILUS</b> (INFN, Frascati, Itália) 3ª Ger.	Al 5056	2,50	3,00	0,90	4	Ressonante Capacitivo	900	Ativo	1 - 0,1
<b>AURIGA</b> (Legnaro, Itália) 4ª Ger.	Al 5056	2,50	3,00	0,90	1	Ressonante Capacitivo	900	Ativo	1 - 0,1
<b>MARIO SCHENBERG</b> (USP, São Paulo, Brasil) 4ª Ger.	Cu(94%) -Al(6%)	1,15	0,65	4,20		Ressonante Microonda	3200	Teste transdutores e refrigerador por diluição	---
<b>MINI-GRAIL</b> (Laiden, Holanda) 4ª Ger.	Cu(94%) -Al(6%)	1,15	0,68	0,05		Ressonante Capacitivo	2900	Teste	---

Fonte: Baseado em (BORTOLI, 2011).

### 1.3 Detector MÁRIO SCHENBERG

No Brasil, o grupo Gráviton formado por colaboradores de várias instituições brasileiras tais como INPE, USP, IFSP, ITA e UNICAMP, e por algumas instituições internacionais como Leiden University e UWA foi responsável pelo projeto e construção do primeiro detector de (OG) brasileiro, o detector Mario Schenberg. Atualmente, o projeto é financiado pela FAPESP, CAPES, CNPq e MCT, Aguiar (2012). Seu nome foi dado em homenagem ao físico brasileiro Mario Schenberg (1914-1990), ex-professor do Instituto de Física da USP, um dos pioneiros da física teórica e da astrofísica moderna no Brasil.

O detector está localizado no departamento de Física dos Materiais e Mecânica da Universidade de São Paulo (USP). Na figura 5 há uma visão geral do detector.

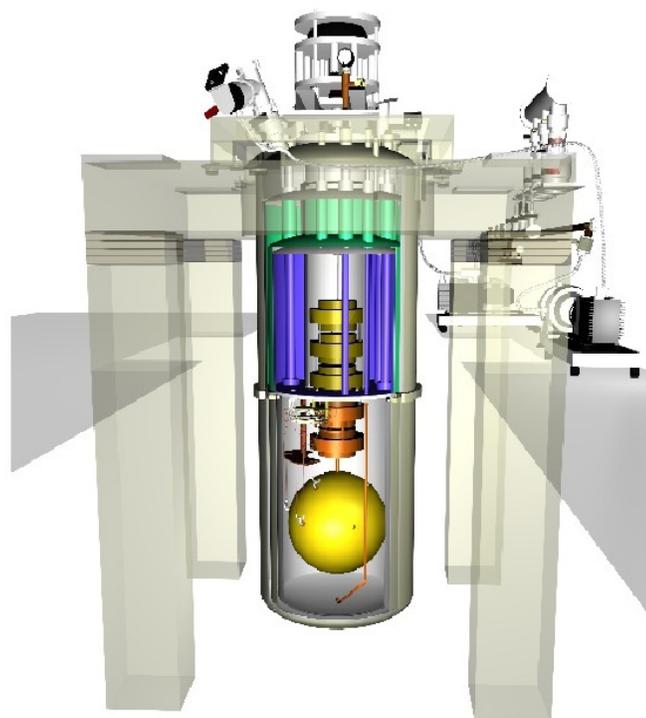


Figura 5 - Visão geral do detector de Ondas Gravitacionais Mario Schenberg com algumas de suas partes.  
Fonte: (BORTOLI, 2011)

O detector Mario Schenberg é um detector de massa ressonante esférico de quarta geração, sua massa (ou antena) esférica possui 1,15 toneladas e 65 cm de diâmetro e é constituída por uma liga de cobre-alumínio com 94% de cobre e 6% de alumínio, como pode ser visualizado na figura 6. Para garantir um fator de qualidade mecânico alto (da ordem de  $10^6$  a  $10^7$ ) durante a confecção uma quantidade adequada desta liga foi fundida e a seguir usinada na forma esférica.

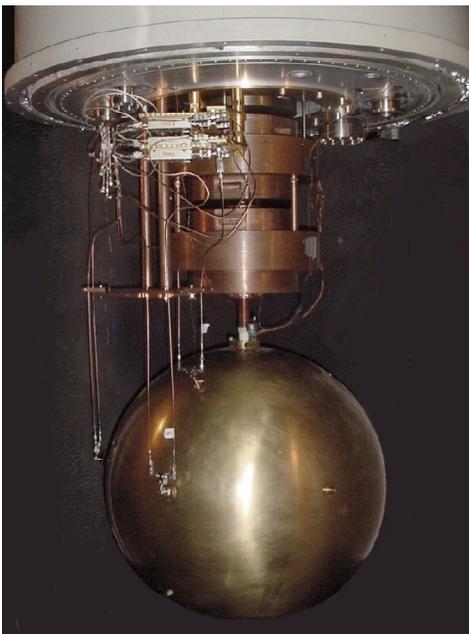


Figura 6 – Antena esférica do detector de Ondas Gravitacionais Mario Schenberg.  
Fonte: (AGUIAR, 2012)

O detector entrou em operação em 8 de Setembro de 2006 como explica Aguiar (2012) e até 2008 foi testado com um sistema de 3 transdutores acoplados à sua superfície.

Há dois tipos de principais de transdutores que podem ser utilizados neste tipo de detector de OG: os passivos e os paramétricos. Devido a problemas envolvendo os transdutores passivos como: perdas em corrente contínua nos circuitos supercondutores e desempenho dos amplificadores SQUID, no detector Mario Schenberg foi feita a opção de usar os detectores paramétricos.

A partir de 2008 são utilizados seis transdutores paramétricos de microondas, do tipo cavidade reentrantes ressonantes. Estes transdutores utilizam Casadores Mecânicos de Impedância (CMI) de dois modos, também chamados de ressonadores (BORTOLI, 2011).

Os transdutores são responsáveis pelo monitoramento das oscilações mecânicas da antena, a fim de convertê-los em sinal elétricos. A disposição destes transdutores na superfície da esfera é baseada no trabalho de Merkowitz e Johnson (MERKOWITZ, 1993; FRAJUCA, 2002 apud FRAJUCA; BORTOLI; MAGALHÃES, 2011 p.255) e foi confirmada por Magalhães e colaboradores (FRAJUCA, 2005; MAGALHAES, 1997 apud FRAJUCA; BORTOLI; MAGALHÃES, 2011 p.255), conforme figura 7.

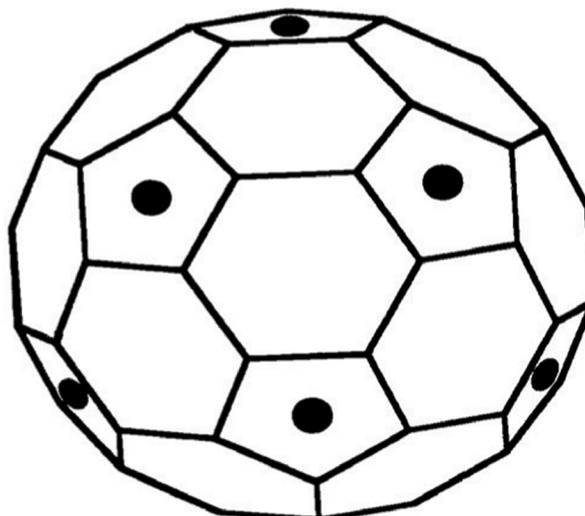


Figura 7 – Posição dos seis Casadores Mecânicos de Impedância utilizados no detector Mário Schenberg relativamente à superfície de um icosaedro truncado.  
 Fonte: (FRAJUCA; BORTOLI; MAGALHÃES, 2011)

O detector foi construído para operar em uma frequência central de cerca de 3200Hz, que é a frequência característica da massa ressonante. Ao incidir em um detector de massa ressonante, uma onda na frequência semelhante a frequência característica da massa produzirá uma excitação nos modos normais quadripolares de vibração e devido ao fator de qualidade mecânico alto a energia absorvida pela massa se dissipará lentamente e apenas nos seus modos normais, produzindo, desta forma, amplitudes mensuráveis nos transdutores acoplados a superfície da massa.

A fim de diminuir o ruído térmico a esfera é resfriada e mantida no vácuo. Para isso a esfera e os sistemas a ela unidos são acondicionados em uma garrafa térmica, denominada *dewar*. Também é necessária a utilização de sistemas mecânicos que produzam um isolamento vibracional adequado à antena para manter o ruído mecânico abaixo do ruído térmico. Estes sistemas minimizam os ruídos sísmicos ambientais e os não-sísmicos (BORTOLI, 2011).

O projeto prevê o resfriamento da esfera à temperatura em torno de 50 mK e operação em regiões a vácuo de  $2 \times 10^{-5}$  tor. Desta forma ele terá sensibilidade suficiente para captar sinais de amplitudes da ordem de  $10^{-22} \text{ Hz}^{-1/2}$ , na faixa de 3000-3400Hz, sendo competitivo com detectores interferométricos.

Dentro desta banda de frequência, Costa (2002) relaciona algumas fontes candidatas a serem observadas pelo detector Mario Schenberg:

- Instabilidades dinâmicas não-aximétricas de estrelas de nêutrons em alta rotação;
- Excitação dos modos  $f$  (1-4kHz) de estrelas de nêutrons;
- Excitação dos modos quasi-normais de buracos negros;
- Expirilação de mini-buracos negros;
- Rotação de estrelas de quarks.

#### 1.4 Objetivos Gerais

Esse trabalho visa contribuir com a linha de pesquisa abordada, trazendo soluções que hoje são utilizadas em diferentes áreas (por exemplo a área automobilística e aeroespacial) para realizar o controle de rotação de um dispositivo que tem por intuito gerar um sinal gravitacional para ser lido no detector e assim testá-lo e calibrá-lo.

O interesse em detectar OG é motivado por importantes descobertas, tais como enumeradas por (FRAJUCA, C. et al, 2007):

- Testar teorias de gravitação, em especial a teoria da Relatividade Geral de Einstein
- Investigar a astrofísica de corpos celestes, especialmente aqueles que não emitem radiação suficiente na banda eletromagnética
- Verificar a existência de objetos astrofísicos previstos teoricamente
- Desenvolver a astrofísica gravitacional.

Quando foi idealizado, o projeto previu a detecção de sinais de amplitudes da ordem de  $10^{-22} \text{ Hz}^{-1/2}$ , na faixa de 3000-3400Hz, no entanto, esta sensibilidade ainda não foi atingida pelo detector Mario Schenberg.

Ao mesmo tempo pretende-se medir a velocidade de propagação dos sinais gravitacionais medindo-se a mudança de fase do sinal produzido e do sinal detectado e com isso medir a velocidade da interação gravitacional.

### 1.5 Objetivos Específicos

Desenvolver o sistema de controle para o sistema:

Objetivos ideais:

Dados de entrada:

- 96000 RPM ( $1600 \text{ Hz} * 60\text{s}$ )

- 5.760.000 pulsos ( $1600 \text{ Hz} * 3600 \text{ pulsos} = 0,1 \text{ graus por pulso}$ )

Dados de saída:

Depende de como será o movimento dos motores. Pode ser tanto analógico quanto digital.

Não termos algumas condições reais, como por exemplo:

- Planta para teste;
- Sensor de encoder com o desempenho desejado.

Com isso, o objetivo deste trabalho será mostrar o potencial das ferramentas apresentadas em experiências usando o mesmo conceito para no futuro, quando houver os elementos para a criação do dispositivo, este poder utilizar as soluções apresentadas.

## **1.6 Descrição dos Capítulos**

O Capítulo 1 descreve, em linhas gerais, o escopo desta Dissertação, introduzindo o assunto deste trabalho, o que são OG, os tipos de detetores e finalmente os objetivos.

O Capítulo 2 descreve toda a matemática usada para descrever a amplitude dos sinais gravitacionais.

O Capítulo 3 apresenta as ferramentas propostas para o controle, como o sistema operacional de tempo real, o FPGA, a tecnologia RIO, o ambiente de programação gráfico, os módulos de entrada e saída. Após a apresentação, mostramos a metodologia empregada além de experiências que comprovam sua utilização.

O Capítulo 4 refere-se a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 AMPLITUDE DOS SINAIS GRAVITACIONAIS

Esse trabalho usa como base a tese do IFSP desenvolvido para o mestrado da Debora Padovani (2012), onde uma das conclusões foi que o modelo com duas massas girantes é o melhor para o dispositivo a ser criado. Segue abaixo a análise matemática.

### 2.1 Sinal de onda gravitacional de duas massas girantes

A seguir, descreveremos a análise do sinal gravitacional gerado por duas massas girantes e como a amplitude pode ser descrita matematicamente. Tendo como base a figura 8, a expressão da amplitude da onda gravitacional a uma distância  $r$  é dado por:

$$h = \frac{1}{r} \frac{4G\mu W o^2 a^2}{c^4} \quad (2.1)$$

Onde:  $G$  – Constante de Newton

$\mu$  - Massa reduzida

$W$  – Velocidade angular das massas

$a$  – Raio de rotação

$c$  – Velocidade da luz

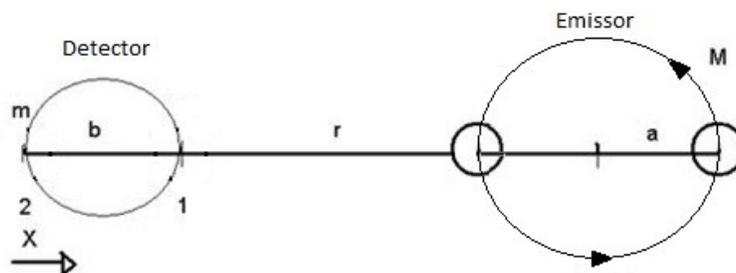


Figura 8 – Sistema de duas massas girantes.

Substituindo valores razoáveis nessa equação ela fornece uma amplitude da ordem de:

$$\frac{1}{r} 10^{-42} \quad (2.2)$$

Este sinal é muito fraco para ser detectado por qualquer detector em operação próxima ou futura.

## 2.2 Sinal newtoniano de massas girantes

A seguir, será mostrado a análise matemática para o sinal newtoniano gerado a partir de uma ou duas massas girantes, aonde o detector é modelado por duas massas conectadas por uma mola.

### 2.2.1 Sinal newtoniano de uma massa girando (*Força de Maré*)

A análise abaixo é sobre o sinal com uma única massa girante baseada na figura 9:

$$F_{1x} = \frac{-GMm}{r^2 \left( \frac{1+a \cos(wt)}{r} \right)^2} \quad (2.3)$$

$$F_{2x} = \frac{-GMm}{r^2 \left( \frac{1+a+b \cos(wt)}{r} \right)^2} \quad (2.4)$$

Onde: G – Constante de Newton;

M – Massa da esfera girante;

m – massa efetiva do detector esférico;

a – raio de giro da esfera girante;

b – comprimento efetivo do detector;

r – distância entre o detector e a massa girante;

w – Velocidade angular de rotação da massa.

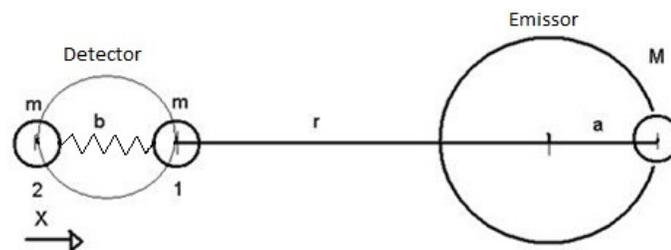


Figura 9 – Modelagem do sistema Emissor e Detector para uma massa girante.

Considerando a velocidade do sinal muito alta e fazendo em primeira aproximação em fatores de  $1/r$ , temos:

$$F_{1x} - F_{2x} = \frac{-GMmb}{r^3} \quad (2.5)$$

Onde:  $G$  – Constante de Newton

$M$  – Massa da esfera girante;

$m$  – massa efetiva do detector esférico;

$b$  – comprimento efetivo do detector;

$r$  – distância entre o detector e a massa girante,

Que é um sinal constante.

Fazendo a aproximação em segunda ordem, temos como a diferença da força a expressão:

$$F_{1x} - F_{2x} = \frac{\left[ \left( \frac{GMmb}{r^3} \right) \right]}{\left[ \frac{b+b^2}{\frac{r+6ab \cos(wt)}{r}} \right]} \quad (2.6)$$

Onde:  $G$  – Constante de Newton;

$M$  – Massa da esfera girante;

$m$  – massa efetiva do detector esférico;

$a$  – raio de giro da esfera girante;

$b$  – comprimento efetivo do detector;

$r$  – distância entre o detector e a massa girante;

$w$  – Velocidade angular de rotação da massa.

Portanto como sinal variável temos o último termo:

$$F_{1x} - F_{2x} = \frac{6GMmab \cos(wt)}{r^4} \quad (2.7)$$

Onde:  $G$  – Constante de Newton;

$M$  – Massa da esfera girante;

$m$  – massa efetiva do detector esférico;

$a$  – raio de giro da esfera girante;

$b$  – comprimento efetivo do detector;

$r$  – distância entre o detector e a massa girante;

$w$  – Velocidade angular de rotação da massa

Usando a expressão da amplitude de movimento de um oscilador harmônico forçado, temos a expressão para o sinal no detector de massa ressonante.

$$\frac{\Delta b}{b} = h = QG M \left( \frac{6ab}{r^4 w^2} \right) \cos(wt) \quad (2.8)$$

Onde: Q - Fator de qualidade mecânico do detector;

G - Constante de Newton;

M - Massa efetiva emissor de sinal gravitacional;

w - Velocidade angular de rotação da massa.

### 2.2.2 Sinal newtoniano de duas massas girando (força de maré)

A próxima análise é sobre o sinal gerado com duas massas girantes conforme figura 10:

$$F_{1x} = -GMm \left( \frac{1}{[r-a \cos(wt)]^2} + \frac{1}{[r+a \cos(wt)]^2} \right) \quad (2.9)$$

$$F_{2x} = -GMm \left( \frac{1}{[r-b-a \cos(wt)]^2} + \frac{1}{[r-b+a \cos(wt)]^2} \right) \quad (2.10)$$

Onde: G - Constante de Newton;

M - Massa da esfera girante;

m - massa efetiva do detector esférico;

a - raio de giro da esfera girante;

b - comprimento efetivo do detector;

r - distância entre o detector e a massa girante;

w - Velocidade angular de rotação da massa.

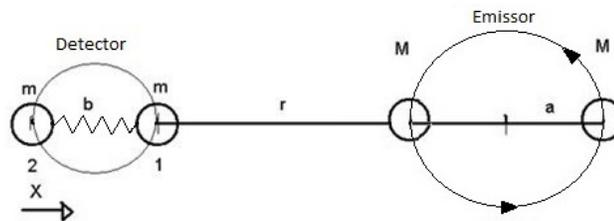


Figura 10 – Modelagem do sistema Emissor e Detector para duas massas girantes.

Em primeira aproximação não aparece força variante com o tempo, em

segunda aproximação.

$$F_{1x} = \frac{-GMm}{r^2 \left( \frac{1+(6a^2 \cos^2(wt))}{r^2} \right)} \quad (2.11)$$

$$F_{2x} = \frac{-GMm}{r^2 \left( \frac{1+6(b+a \cos(wt))^2}{r^2} \right)} \quad (2.12)$$

$$F_{1x} - F_{2x} = \frac{-GMm}{r^2} \left( \frac{b^2}{r^2} + \frac{12 ab \cos(wt)}{r^2} \right) \quad (2.13)$$

Onde: G – Constante de Newton;

M – Massa da esfera girante;

m – massa efetiva do detector esférico;

a – raio de giro da esfera girante;

b – comprimento efetivo do detector;

r – distância entre o detector e a massa girante.

Sendo, portanto a força variante no tempo igual a

$$F_{1x} - F_{2x} = \frac{-GMm12 ab \cos(wt)}{r^4} \quad (2.14)$$

Onde: G – Constante de Newton;

M – Massa da esfera girante;

m – massa efetiva do detector esférico;

a – raio de giro da esfera girante;

b – comprimento efetivo do detector;

r – distância entre o detector e a massa girante.

w – Velocidade angular de rotação da massa

Usando a expressão da amplitude de movimento de um oscilador harmônico forçado, temos a expressão para o sinal no detector de massa ressonante.

$$\frac{\Delta b}{b} = h = QG M \left( \frac{12ab}{r^4 w^2} \right) \cos(wt)$$

Onde:  $Q$  - Fator de qualidade mecânico do detector;

$G$  - Constante de Newton;

$M$  - Massa efetiva emissor de sinal gravitacional;

$\omega$  - Velocidade angular de rotação da massa.

As duas expressões apresentam o mesmo resultado, considerando que a massa girando no segundo caso é o dobro da primeira.

Porém, como para o segundo caso é possível colocar a massa girando em rotações bem maiores, pode-se posicionar o detector numa distância  $r$  (grandezas inversamente proporcionais), com rotação maior o sinal vai ter um comprimento de onda menor e com isso pode-se medir a velocidade do sinal em uma distância menor.

Com rotação menor é possível utilizar uma massa maior, mas existe o problema das reações de apoio podem gerar um sinal gravitacional de amplitude inversa, cancelando o sinal que se deseja medir.

### 3 DESCRIÇÃO E CONTROLE DOS SISTEMAS

A seguir, será mostrado as soluções para a área de controle do dispositivo.

Primeiro apresentarei as ferramentas, para em seguida apresentar as experiências realizadas.

#### 3.1 Resumo da aplicação

A aplicação terá um controlador em malha fechada, onde a leitura será feita por um sensor digital similar a um encoder de quadratura e a saída será analógica após análise do FPGA que será a controladora da aplicação.

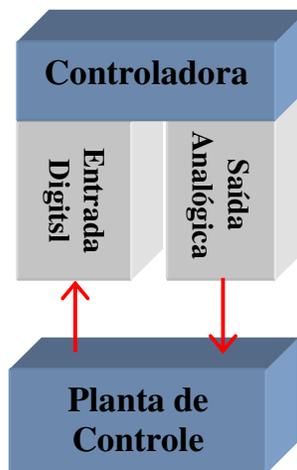


Figura 11 – Resumo da aplicação.

### 3.2 Ferramentas

As ferramentas de controle recomendadas para atender as exigências de tal experimento são hoje utilizadas em diferentes aplicações que exigem controle determinístico, nos segmentos industriais e acadêmico.

Como são utilizados em diferentes experimentos que requerem confiabilidade e tempo de resposta rápido e entre diferentes usuários, há uma comunidade que compartilha idéias sobre essas tecnologias. Isso também é um diferencial a ser levado em conta.

Essas ferramentas que apresentadas de forma separada, quando combinadas formam um instrumento de controle chamado de PAC (Programmable Automation Controller).

Os PACs combinam a robustez do PLC (Programmable logic controller) com a funcionalidade do PC sob uma arquitetura de software aberta e flexível. Com estes controladores, é possível construir sistemas avançados incorporando toda a potencialidade do software como controle avançado, comunicação, armazenamento de dados e processamento de sinais com um controlador robusto realizando lógica, controle de movimento, controle de processo e visão de máquina.

O PAC em questão possui o *NI Reconfigurable I/O (RIO)* e é uma tecnologia baseada em quatro componentes: um processador executando um sistema operacional de tempo real (*Real-Time*), um FPGA (*Field-Programmable Gate Array*) reconfigurável, hardware modular de Entrada e Saída e ambiente gráfico de programação. Juntos, estes elementos permitem criar rapidamente um hardware personalizado com entrada e saída de alta performance e flexibilidade em sistemas com controle de tempo<sup>1</sup>, conforme a figura 12:

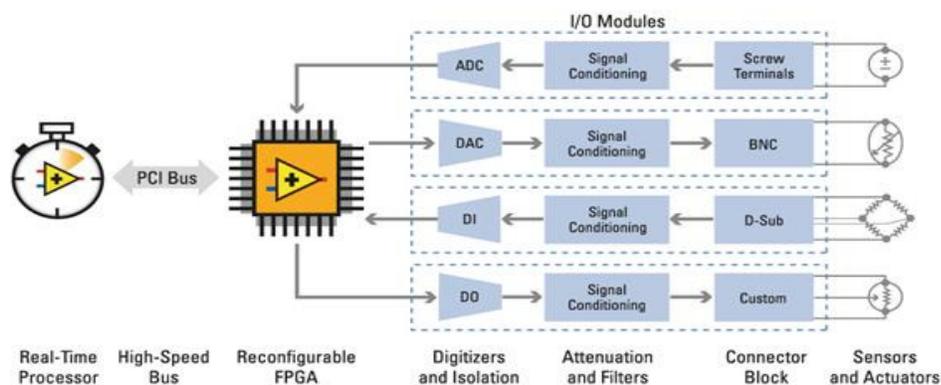


Figura 12 – Arquitetura do Sistema RIO.

Fonte: <http://www.ni.com/white-paper/7997/pt>

<sup>1</sup> <http://www.ni.com/white-paper/7997/pt>

### ***3.2.1 Sistema Operacional de tempo real (Real-Time)***

O processador é usado para implementar códigos para comunicação com outras unidades de processamentos como o FPGA, interfaces com periféricos, log de dados e execução de aplicativos. Outro motivo para usar esse sistema operacional é a execução por longos períodos de tempo além de possibilitar em caso de necessidade a execução determinística de uma tarefa crítica de software, sem interrupção ou interferência de tarefas não críticas.

Aplicações determinísticas geralmente fazem interações entre tarefas críticas e todas essas interações consomem uma quantidade mensurável de tempo de processamento. Com isso, podemos concluir que são avaliadas não somente pela velocidade, mas pela confiabilidade nas respostas às entradas e fornecimento de saídas com um *Jitter* conhecido (*Jitter* é a diferença média do tempo que um loop gasta para executar).

### ***3.2.2 FPGA***

A tecnologia FPGA fornece a confiabilidade de um hardware dedicado, com verdadeira execução em paralelo e desempenho de controle de malha fechada extremamente rápido.

Este dispositivo contém uma matriz de circuitos lógicos com arranjo de portas reconfiguráveis. Quando um FPGA é configurado, os circuitos internos são conectados da mesma maneira com que aplicação do software foi desenvolvida, criando uma implementação em hardware conforme foi projetado no software. Ao contrário dos processadores, o FPGA usa hardware dedicado para lógica de processamento e não possui sistema operacional. Os FPGAs possuem execução paralela por natureza, logo, diferentes operações de processamento não precisam competir pelos mesmos recursos. Com isso, o desempenho de uma parte da aplicação não é afetado quando um processamento é adicionado durante a execução do sistema. Além disso, várias malhas de controle em taxas diferentes podem ser executadas em um único dispositivo FPGA. Sistemas de controle baseados em FPGA podem impor uma lógica crítica de intertravamento e podem ser projetados para prevenir E/S forçada por um operador. Porém, diferente dos projetos de placas de circuito impresso (PCB) cabeadas, que têm recursos fixos de hardware, sistemas baseados em FPGA podem literalmente refazer seus circuitos internos para permitir a reconfiguração depois que o sistema de controle é implantado no campo. Dispositivos FPGA trazem o desempenho e confiabilidade de um hardware dedicado.

Um único FPGA pode substituir milhares de componentes discretos incorporando milhões de portas lógicas em um único circuito integrado (CI). Os recursos internos de um chip FPGA consistem em uma matriz de blocos lógicos configuráveis (CLBs) cercados por blocos de E/S. Os sinais são encaminhados para dentro da matriz do FPGA por chaves de interconexão e trilhas de fios, conforme a figura 13:

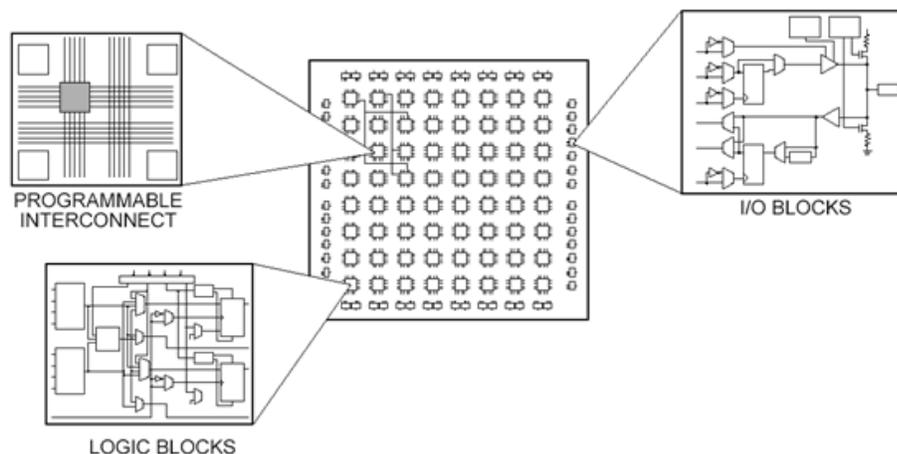


Figura 13 – Componentes de um chip FPGA.

Fonte: <http://www.ni.com/white-paper/3357/pt>

Assim como os sistemas de controle baseados em processadores, os FPGAs são usados para implementar todos os tipos de sistemas de controle industriais, incluindo controle analógico de processos, sistemas de controle de lógica discreta ou baseado em máquinas de estado. Porém, sistemas de controle baseados em FPGA diferem de sistemas baseados em processadores de maneira significativa.

Além de oferecer alta confiabilidade, dispositivos FPGA podem realizar controles determinísticos de malha fechada a taxas extremamente rápidas. Na maioria das aplicações de controle baseadas em FPGA, a velocidade é limitada pelos sensores, atuadores e módulos de E/S em vez do processamento do FPGA. Por exemplo, o algoritmo de controle Proporcional Integral Derivativo (PID), que é incluído no módulo LabVIEW FPGA, executa em apenas 300 nanossegundos<sup>2</sup>. O controle PID é normalmente utilizado para regular os valores analógicos do processo como pressão, temperatura, força, deslocamento, vazão de fluido ou corrente elétrica.

<sup>2</sup> <http://www.ni.com/white-paper/3357/pt>

Sistemas de controle baseados em FPGA oferecem desempenho determinístico de controle de malha fechada a taxas excedendo 1 MHz. Na verdade, muitos algoritmos podem ser executados em um único ciclo do clock do FPGA (40 MHz). O processamento é feito em paralelo, então sistemas de controle com várias taxas são facilmente implementados. Por conta da lógica de controle ser executada em subsistemas do FPGA, as aplicações não ficam lentas quando é acrescentado processamento adicional. Em muitos casos, um arranjo de portas definido por software no hardware do FPGA pode ser usado para substituir um layout de placa de circuito impresso (PCB) customizada, na qual possui desenvolvimento caro e demorado.

Os FPGAs podem processar sinais digitalmente a taxas muito altas e são normalmente utilizados para reconfigurar a funcionalidade do módulo de E/S. Por exemplo, um módulo de entrada digital pode ser usado simplesmente para ler o estado verdadeiro/falso de cada linha digital. Alternativamente, o mesmo FPGA pode ser reconfigurado para realizar o processamento dos sinais digitais e medir a largura de pulso, realizar filtragem digital ou mesmo medir a posição e velocidade de um sensor de encoder de quadratura.

Para programá-lo, usei o módulo FPGA do LabVIEW para ter acesso a todo potencial da programação gráfica de alto nível baseada em fluxo de dados para criar uma implementação de arranjo de portas altamente otimizada para a sua lógica de controle analógico ou digital. Com isso, pude usar as mesmas técnicas que são usadas para programação em LabVIEW para desenvolver a sua aplicação no FPGA. Ao estabelecer como target um hardware FPGA como por exemplo um chassi CompactRIO, a paleta de funções do LabVIEW é simplificada para conter apenas as funções que são designadas para trabalhar em FPGAs. Não existe necessidade de pensar em multi-tarefas ou prioridades porque cada loop executa em um hardware dedicado independente e não tem que compartilhar recursos – na verdade, cada loop executa em paralelo em uma prioridade de “tempo crítico”.

### 3.2.3 Módulos de Entrada e Saída

Os módulos de entrada e saída da série C de um sistema RIO traz como benefício a redução do espaço e os custos de fiação de campo além de conter isolamento, circuito de conversão, condicionamento de sinal e conectividade interna para conexão direta com sensores industriais e atuadores<sup>3</sup>. Tais módulos podem ser visualizados na figura 14.

---

<sup>3</sup><http://www.ni.com/white-paper/7997/pt>



Figura 14 – Módulos de Entrada e Saída da série C.

Fonte: <http://www.ni.com/white-paper/7997/pt>

### 3.2.4 Ambiente Gráfico de Programação

A ferramenta para programação usada para desenvolver o a aplicação foi o ambiente gráfico de programação LabVIEW, pois permite a utilização da mesma ferramenta para o processador com sistema operacional de tempo real, para o FPGA e integrar os dois com módulos de entrada e saída e assim criar uma solução completa com a tecnologia RIO<sup>4</sup>. Com isso podemos concluir que essa ferramenta integra uma solução completa para aplicações embarcadas, além de poder usar a mesma ferramenta para criar uma interface de usuário. Tal plataforma pode ser vista na figura 15.

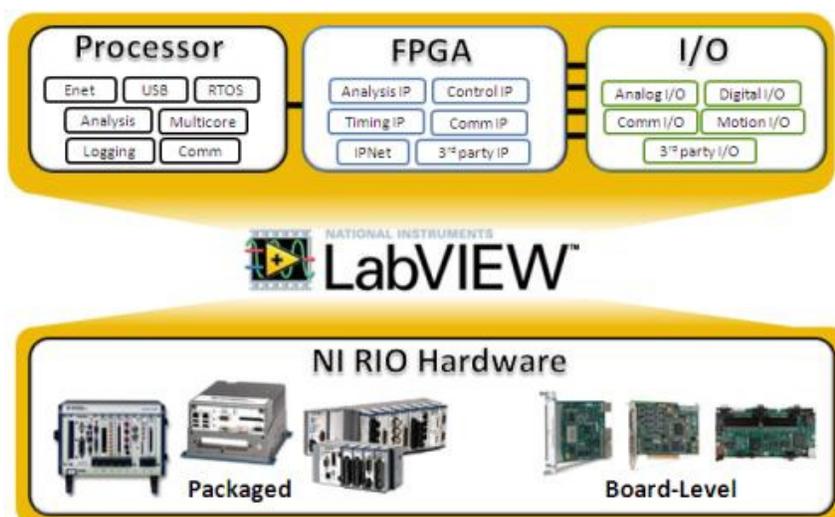


Figura 15 – Plataforma completa para desenvolvimento com tecnologia RIO.

Fonte: <http://www.ni.com/white-paper/7997/pt>

<sup>4</sup> <http://www.ni.com/white-paper/7997/pt>

### 3.3 Metodologia

Devido a não haver hoje uma planta pronta e indisponibilidade dos sensores com a resposta esperada, não foi implementado o controle no dispositivo final. Porém, acredito que algumas experiências podem ser implementadas para comprovar a possibilidade de implementá-lo no futuro.

Para essa demonstração em dividi em dois passos, que serão expolicados em seguida.

#### *Passo 1*

*Adquirir a velocidade angular do sistema usando uma entrada digital e um sensor que trabalhe da mesma forma que um encoder de quadratura.*

O tipo mais comum de encoder incremental usa dois canais de saída (A e B) para a posição de sentido. Usando duas faixas de código com os setores posicionado 90 graus fora de fase, os dois canais de saída do codificador de quadratura indica tanto a posição e o sentido de rotação. Se o sinal A é lido antes do sinal B, o disco está a rodar no sentido dos ponteiros do relógio. Se o sinal B é lido antes do sinal A, então o disco está girando no sentido anti-horário.

Na figura 16, mostramos o funcionamento do sensor encoder:

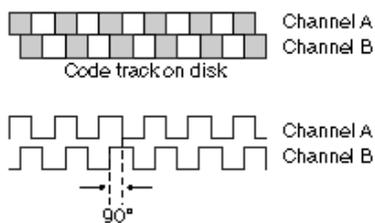


Figura 16 – Funcionamento do Encoder de quadratura.

Fonte: <http://www.ni.com/whitepaper/4763/en>

Ao monitorizar tanto o número de impulsos e a fase relativa dos sinais A e B, é possível controlar a posição e a direção de rotação.

Alguns codificadores de quadratura incluem também um canal de saída, chamada de zero ou índice ou sinal de referência, o qual fornece um impulso único por rotação. Este pulso único é utilizado para a determinação precisa de uma posição de referência.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> <http://www.ni.com/white-paper/4763/en>

### Experiência Proposta

Para demonstrar uma aplicação que permita a leitura de um encoder de quadratura de mercado. Para tal, usarei um encoder do mercado e este será conectado a entrada digital do hardware. Como este é uma entrada digital, a lógica para ler o sensor encoder de quadratura deve ser escrita no FPGA. Usei como base o exemplo existente no site da National Instruments (Quadrature Encoder Velocity and Acceleration with LabVIEW FPGA<sup>6</sup>) que permite a leitura deste dado no FPGA e a demonstração desse dado no ambiente de tempo real. Todas as telas desse código pode ser visualizadas entre as figuras 17 e 21.

Porém, esse código pode ser modificado para manter o controle dentro do FPGA.

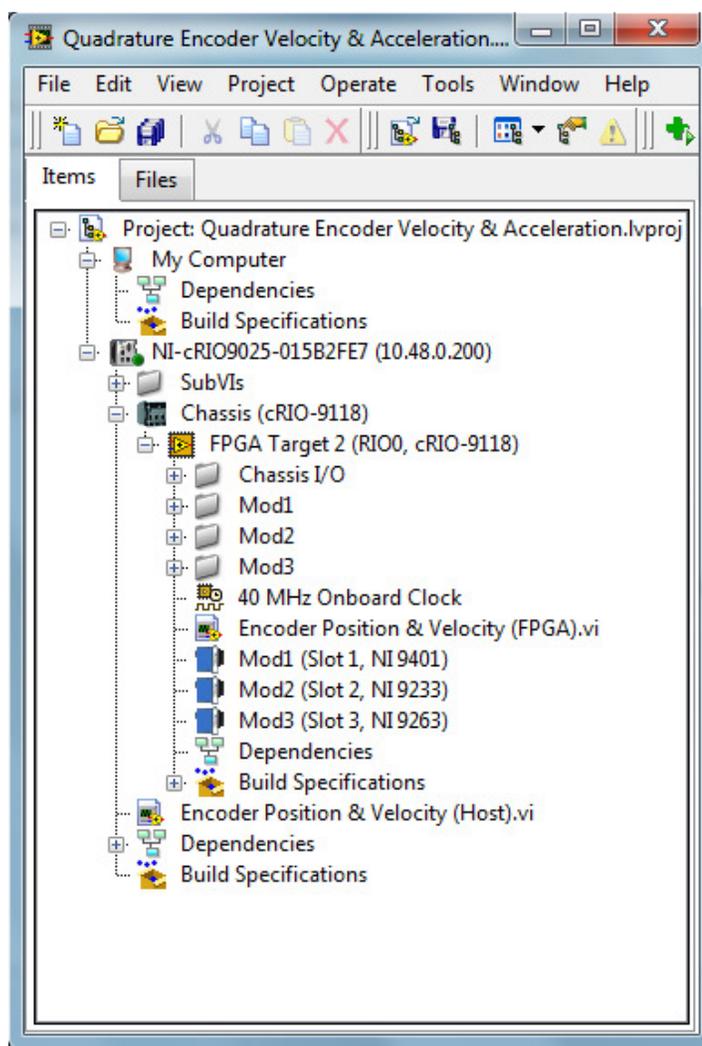


Figura 17- Projeto onde é determinado o local de execução do VI.

<sup>6</sup> <http://zone.ni.com/devzone/cda/epd/p/id/1580>



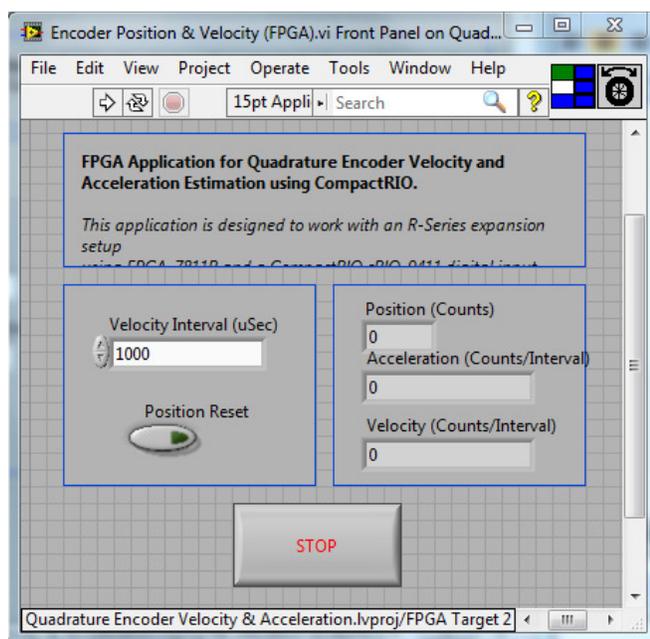


Figura 20 – Painel Frontal do FPGA para leitura do Encoder de quadratura.

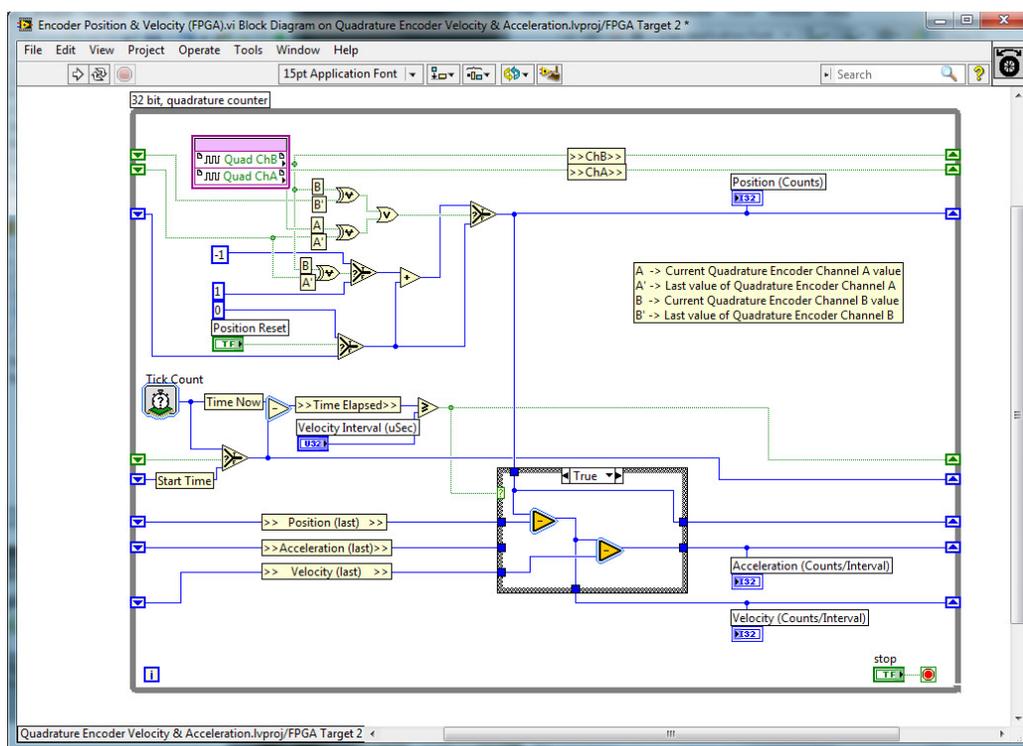


Figura 21 – Diagrama de Blocos do FPGA para leitura do Encoder de quadratura.

Outra parte existente no código permite ler a aceleração e a velocidade, o que pode ser útil em uma implementação futura.

### Passo 2

Usar esse dado como entrada para manter a rotação do sistema em com 3200 rotações por segundo, fazendo o controle em no FPGA de um dispositivo com uma saída baseada na informação de entrada digital, fechando a malha de controle. Usar um sistema operacional de tempo real para controlar o FPGA e permitir o uso desse dispositivo por um grande período de tempo.

Com a entrada do encoder sendo lida dentro do FPGA e usando esse dado como set point da malha de controle, é possível definir a saída, tanto analógica quanto digital para que esta controle a rotação em 1600Hz.

Durante a apresentação das ferramentas, foi mostrado que sistemas de controle baseados em FPGA oferecem desempenho determinístico de controle de malha fechada a taxas excedendo 1 MHz.

Além disso a tomada de decisão pode ser feita dentro do FPGA, evitando assim que este tenha de passar por diferentes camadas até que a decisão seja tomada. Isso traz além de rapidez, maior confiabilidade na execução. Tal comportamento pode ser visto na figura 22 e pode ser chamado de “Paradigma do driver do dispositivo de aquisição de dados”.

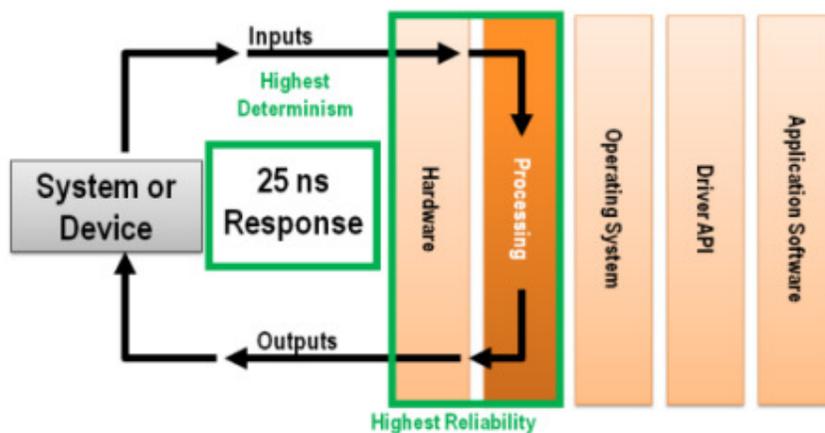


Figura 22 – Paradigma do driver do dispositivo de aquisição de dados.

Fonte: <http://zone.ni.com/devzone/cda/pub/p/id/1467>

### Experiência Proposta

Para demonstrar uma aplicação de controle usando as ferramentas propostas, foi repetido um experimento de controle sendo feito no ambiente embarcado. A planta utilizada fornece o sinal de utilizado na entrada através de um sensor do tipo tacômetro e este é lido pela entrada analógica do sistema RIO. No exemplo demonstrado, este é passado para o sistema operacional de tempo real através de uma fila FIFO, conforme pode ser visto em destaque na figura 23.

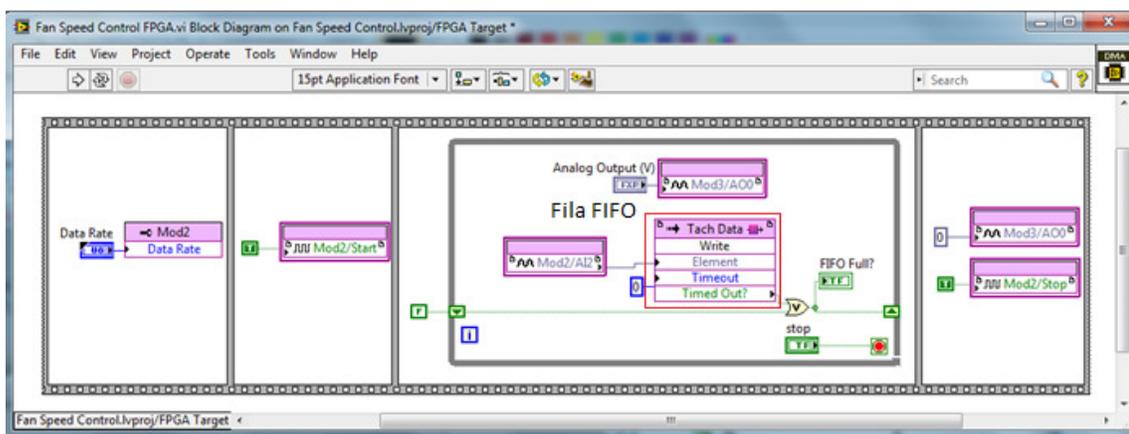


Figura 23 – Código do FPGA para controle das rotações da ventoinha.

A informação para o módulo de saída analógico é feito através de uma comunicação entre o sistema operacional determinístico e o FPGA chamada de *Interactive Front Panel Communication*. Essa comunicação permite que qualquer controle ou indicador localizado no Painel Frontal do código no FPGA possa ter interação com o código do sistema operacional determinístico. A seguir, na figura 24 segue a tela do Painel Frontal do FPGA para controle da ventoinha e o controle *Analog Output (V)* que realiza esse controle:

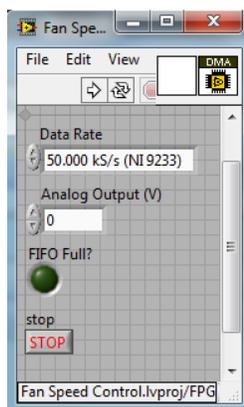


Figura 24 – Painel frontal do FPGA para controle das rotações da ventoinha.

No processador com sistema operacional de tempo real é realizado o controle PID da aplicação através da função PID no diagrama de blocos e o resultado é enviado para o FPGA através de comunicação de painel frontal e no FPGA este é encaminhado para o terminal da saída analógica, que através do sinal de tensão controla a velocidade da ventoinha. Essa lógica pode ser observada no diagrama de blocos do VI no processador com sistema operacional de tempo real da figura 25:

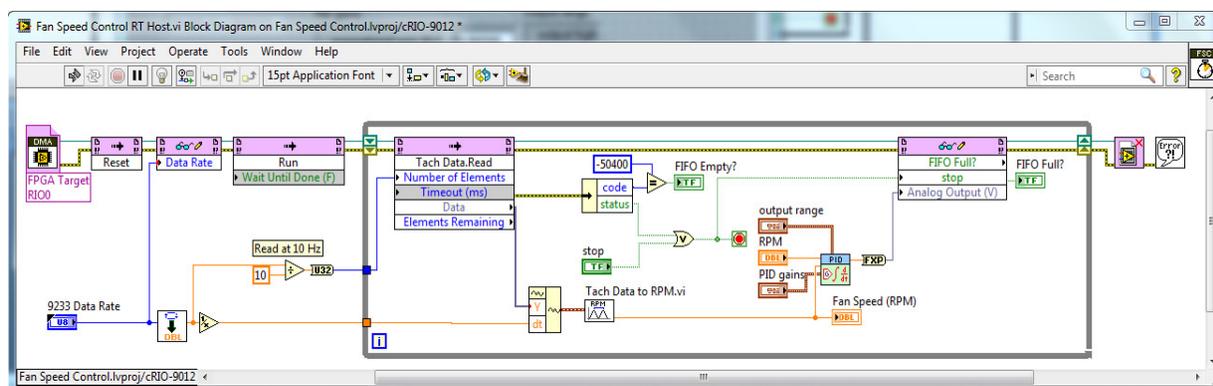


Figura 25 – Código no processador de tempo real para controle das rotações da ventoinha.

A interface de usuário, onde o código é controlado pode ser visto na figura 26:

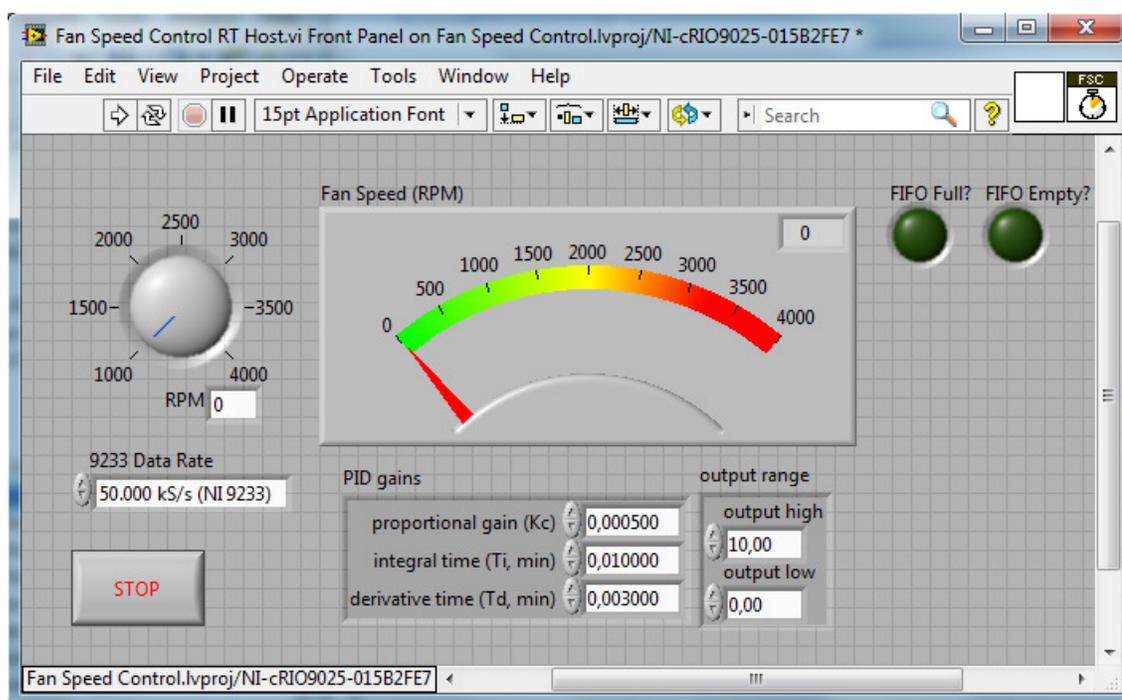


Figura 26 – Interface de usuário para controle embarcado da ventoinha.



contagemdo número de ciclos através de um tacômetro. Além disso, permite o controle das duas ventuinhas (uma balanceada e outra desbalanceada) através de um controle na própria planta ou através de um sinal que pode ser conectado na planta através de um conector BNC.

A figura 29 exhibe uma foto desta planta:



Figura 29 – Planta utilizada na experiência 2.

As conexões realizadas para as duas experiências foram:

- Experiência 1: Conectado os sinais A e B do encoder de quadratura da planta da Quanser no módulo 9401, nos canais 0 e 1 respectivamente.
- Experiência 2: O sinal do tacômetro foi conectado via cabo BNC ao canal 2 do módulo 9233 e a saída analógica 9263 foi conectada a entrada da planta para controle da velocidade da ventoinha.

## 4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesse trabalho, o objetivo não foi focar nos materiais para criar o dispositivo, mas aproveitar as conclusões do trabalho realizado pela Débora Moreira Padovani, que utiliza a montagem de duas massas (quadripolar) operando a 1600 Hz (O valor de duas massas é muito mais razoável do que o valor com 1 massa, e não tem o problema das força de reação para a massa desbalanceada).

O principal legado deste material é mostrar uma alternativa para controle com maior capacidade do que um PLC, sem perder a robutez deste e com capacidade de poder dispor de um circuito personalizado no FPGA.

Para demonstrar o potencial das ferramentas, foi realizado dois experimentos com sucesso:

- Ler os sinais para determinar a fase da rotação do experimento através do encoder de quadratura;
- Realizar o controle de uma entoinha a uma taxa menor, mas que pode servir de base para a implementação final.

Podemos concluir com as experiências que as ferramentas definidas atendem as necessidades para o controle para o dispositivo em si.

Uma modificação que deve ser implementada é o uso da função de PID para o controle dentro do FPGA onde o seu tempo de execução é de 300 nanossegundos.

Nos experimentos, usamos a interface no Real-time até mesmo para facilitar a visualização dos resultados do experimento.

Finalizando, esse experimento poderia ter todas as suas fases realizada no FPGA, com taxas de controle de malha fechada da ordem de 40 MHz e com paralelismo real.

Tais tarefas que podem ser realizadas estão listadas abaixo:

- Leitura dos sinais digitais;
- Cálculo do número de voltas e o cálculo da fase (dado de entrada na malha fechada);
- Sistema de controle;
- Geração do sinal analógico.

O FPGA é um recurso limitado, ou seja, nem sempre a família e o tipo de FPGA escolhido suporta o código escrito para a aplicação. Mas, caso seja necessário trocar o hardware, não será preciso reescrever o código, pois o módulo LabVIEW FPGA é uma

linguagem de alto nível e realiza de maneira transparente essa alteração de hardware sem requerer nenhuma alteração na programação do código.

Para finalizar, eu vejo como um desafio a ser superado para a implementação desta aplicação a criação de sensores e atuadores com o desempenho e o tempo de resposta adequado.

Um exemplo que vejo isso claramente é um sensor que trabalhe como um encoder de quadratura, mas que suporte a rotação e a resolução de necessária para a aplicação e que hoje não estão disponíveis no mercado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PADOVANI, Débora. **Desenvolvimento de um experimento para medir a velocidade da interação gravitacional**. Dissertação de Mestrado – IFSP, São Paulo, 2012.

Quadrature Encoder Fundamentals. Página da empresa National Instruments <<http://www.ni.com/whitepaper/4763/en>>. Acesso em 20 de novembro de 2012

Controle baseado em FPGA: Milhões de transistores ao seu comando (FAQ). Página da empresa National Instruments <<http://www.ni.com/white-paper/3357/pt>>. Acesso em 20 de novembro de 2012

O que é tecnologia RIO. Página da empresa National Instruments <<http://www.ni.com/white-paper/7997/pt>>. Acesso em 22 de Fevereiro de 2012

PAC (Programmable Automation Controller). Página da empresa National Instruments <<http://www.ni.com/white-paper/6090/pt>>. Acesso em 22 de Fevereiro de 2012

Quando eu preciso de um sistema de Tempo Real?. Página da empresa National Instruments <<http://www.ni.com/white-paper/13310/pt>>. Acesso em 22 de Fevereiro de 2012

FPGA Fundamentals. Página da empresa National Instruments <<http://www.ni.com/white-paper/6983/en>>. Acesso em 22 de Fevereiro de 2012

Quadrature Encoder Velocity and Acceleration with LabVIEW FPGA <<http://zone.ni.com/devzone/cda/epd/p/id/1580>>. Acesso em 28 de Fevereiro de 2012

QET DC Motor Control - Quanser <[http://www.quanser.com/english/html/products/fs\\_product\\_challenge.asp?lang\\_code=english&pcat\\_code=exp-mec&prod\\_code=S24-QET&tmpl=3](http://www.quanser.com/english/html/products/fs_product_challenge.asp?lang_code=english&pcat_code=exp-mec&prod_code=S24-QET&tmpl=3)> Acesso em 13 de Maio de 2013

PEREIRA, Eduardo dos Santos. **Fundos estocásticos de ondas gravitacionais gerados por buraco negro pré-galácticos**. Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos, 2008.

RIBEIRO, Kilder Leite. **Estudo do sistema de transdução paramétrica para detectores de ondas**. Tese de Doutorado – INPE, São José dos Campos, 2003.

AMORIM, José Alves de. **Controle do espaçamento na cavidade de microondas do detector de ondas gravitacionais Mario Schenberg**. Qualificação de Mestrado – IFSP, São Paulo, 2012

TAVARES, Denis Borgarelli. **Sinais de raios cósmicos em detectores de ondas gravitacionais**. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

FURTADO, Sérgio Ricardo. **Desenvolvimento de transdutores paramétricos de alta sensibilidade para detector de ondas gravitacionais Mario Schenberg**. Tese de Doutorado – INPE, São José dos Campos, 2009.

ANDRADE, Luiz Alberto de. **Cálculo do ruído de uma antena esférica para ondas gravitacionais acoplada a transdutores paramétricos**. Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos, 1999.

ANDRADE, Luiz Alberto de. **Desenvolvimento de osciladores em 10 GHz de ultrabaixo ruído de fase e análise de seus desempenhos nos transdutores paramétrico do detector de ondas Mario Schenberg**. Tese de Doutorado – INPE, São José dos Campos, 2004.

BORTOLI, Fábio da Silva. **Estudo de casadores de impedância mecânicos para transdutores paramétricos de microondas em detectores esféricos de ondas gravitacionais**. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BORTOLI, Fábio da Silva. **Sistemas vibracionais do detector de ondas gravitacionais Mário Schenberg**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CASTRO, Cláudio de Souza. **Estudo das fontes astrofísicas candidatas à observação pelo detector de ondas gravitacionais “Mario Schenberg”**. Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos, 2002.

FRAJUCA, C.; BORTOLI, F, S; MAGALHÃES, N. S. Estudo de seis casadores de impedância mecânica em um detector de ondas gravitacionais esférico. **Sinergia**, v.10, n.2, p.115-123, jul./dez. 2009.

FRAJUCA, C.; BORTOLI, F, S; MAGALHÃES, N. S. Simulações pelo método de elementos finitos da esfera do detector Mario Schenberg esférico. **Sinergia**, v.12, n.3, p.254-248, set./dez. 2011.