Dissertação de Mestrado Profissional em Física com ênfase em Instrumentação Científica

Desenvolvimento de Sistema SCADA Intranet para a operação de um Laser de Elétrons Livres

João Manoel Barbosa Pereira

Rio de Janeiro

2015

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Coordenação de Física Aplicada

CBPF/RJ

João Manoel Barbosa Pereira

Desenvolvimento de Sistema SCADA Intranet para a operação de um Laser de Elétrons Livres

Dissertação submetida ao Mestrado Profissional em Física com ênfase em Instrumentação Científica do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas para a obtenção do grau de Mestre

Orientador: Geraldo Roberto Carvalho Cernicchiaro

Rio de Janeiro

2015

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um Sistema de Controle Supervisório e de Aquisição de Dados (*Supervisory Control and Data Acquisition* – SCADA) baseado em uma rede restrita (Intranet) e na linguagem de programação gráfica LabVIEW para a operação de um Laser de Elétrons Livres (*Free Electron Laser* – FEL) [1]. O projeto visa contribuir para a proposta de construção de um FEL no Brasil e é inspirado em um sistema anterior [2] desenvolvido no *Center for Research and Education in Optics and Lasers – University of Central Florida* (FEL-CREOL), que foi operacional de 1997 a 2001.

O FEL é uma fonte de radiação eletromagnética monocromática, coerente e sintonizável produzida através da interação de um feixe eletrônico relativístico com campo magnético periódico [3]. Existem diversos laboratórios de FEL operando ou em construção na atualidade, porém nenhum na América Latina [4]. A instalação de uma fonte de radiação deste tipo em um ambiente multiusuário abrirá novas oportunidades técnicas e científicas, fomentando o desenvolvimento e a expertise de uma nova área de pesquisa.

Neste documento são descritos os mecanismos fundamentais de controle do feixe eletrônico de um FEL, a construção de uma ferramenta de avaliação e testes para analisar a viabilidade técnica em utilizar os componentes de controle do feixe eletrônico do FEL-CREOL que estão disponíveis e um dispositivo de monitoramento de interferência magnética de baixa frequência para otimizar a operação do FEL. Este tipo de interferência também é um desafio recorrente na operação de sistemas de feixe eletrônico de baixa energia, como MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), MET (Microscopia Eletrônica de Transmissão) e Litografia por feixe de elétrons, sugerindo a aplicação do dispositivo desenvolvido em outras áreas.

A arquitetura do sistema SCADA desenvolvido pode ser adaptada em sistemas similares de pequeno e médio porte para gerenciar processos que envolvam o controle e monitoramento de centenas de parâmetros físicos.

Palavras-chave: Laser de elétrons livres, FEL, SCADA, LabVIEW, Sistema de Controle, Intranet, Monitoramento magnético e Interferência magnética.

Abstract

This paper presents the development of a Supervisory Control and Data Acquisition system (SCADA) based on a restricted network (Intranet) and graphical programming language LabVIEW for operation of a Free Electron Laser (FEL) [1]. This project aims to contribute to the proposed construction of a FEL in Brazil and is inspired on a previous system [2] developed at the Center for Research and Education in Optics and Lasers – University of Central Florida (FEL-CREOL) which was operational from 1997 to 2001.

The FEL is a monochromatic, coherent and tunable electromagnetic radiation source produced trough the interaction of a relativistic electron beam with periodic magnetic field [3]. There are several FEL laboratories operating, or in construction, at present, but none in Latin America [4]. The installation of a FEL in a multiuser lab will open new technical and scientific opportunities, promoting the development and expertise of a new area of research.

This work describes the fundamental mechanisms to control the electron beam of a FEL, the construction of a tool to analyze and evaluate the technical viability to use FEL-CREOL electromagnetic transducers and the construction of a low frequency magnetic interference-monitoring device to optimize the operation of the FEL. This kind of interference is also a recurring challenge in operation of low energy electron-beam systems, such as SEM (Scanning Electron Microscopy), TEM (Transmission Electron Microscopy) and e-beam lithography.

The SCADA system architecture presented allows adaptations in small and medium-sized similar systems to manage processes involving the control and monitoring hundreds of physical parameters.

Keywords: Free Electron Laser, FEL, SCADA, LabVIEW, Control System, Intranet, magnetic monitoring and Magnetic interference.

Agradecimentos

Preciso agradecer ao meu orientador e amigo Geraldo Cernicchiaro pela oportunidade de trabalhar com instrumentação científica e com um trabalho envolvendo tantas possibilidades e conhecimento. Agradeço a ele também pela extrema compreensão, paciência e conhecimento que adquiri.

Da mesma forma, tenho que agradecer à minha família e em especial à minha noiva Carina Braghim pelo apoio que foi necessário para que eu pudesse me dedicar de maneira satisfatória para a conclusão deste trabalho.

Agradeço a todos os envolvidos no projeto inicial deste laser e em especial aos programadores Jeff Wolfe e Erik Hall pelo desenvolvimento do antigo sistema de controle do laser, que foi a base fundamental para o trabalho apresentado neste documento.

Agradeço ao amigo e colega de trabalho Rubem Caetano que contribuiu com partes relevantes deste trabalho. Também agradeço ao Gregoirè pelo desenvolvimento de forma independente de algumas partes do sistema de controle deste laser.

Agradeço aos amigos do CBPF: Pedro Russano, Marcos, Leonardo Ribas, Bruno, Geraldo; aos amigos da PUC-Rio, funcionários e professores do departamento de física em especial ao professor Antônio Carlos Bruno; aos funcionários e professores do CBPF, às secretárias Bete, Gil e Mônica, ao professor André Pinto pela oportunidade de utilizar o dispositivo de monitoramento magnético descrito neste trabalho em seu laboratório.

Gostaria de agradecer ainda a todos que de alguma forma estiveram envolvidos e que de alguma forma me ajudaram nesta etapa, seja fornecendo subsídios diretos ou indiretos. Agradeço também às pessoas e as empresas de instrumentação e software utilizados neste trabalho.

Apresentação

Este trabalho está dividido em cinco seções, sendo a primeira a introdução que discorre sobre lasers convencionais, princípios de um Laser de Elétrons Livres, sistemas de controle de aceleradores e suas características com relação ao controle de processos, algoritmos e dispositivos físicos. No fim desta primeira seção serão apresentados os objetivos deste trabalho.

Na segunda parte são descritas as características do laser FEL-CREOL, que é o projeto inicial deste laser e base para o Laser de Elétrons Livres a ser instalado no Brasil. Serão apresentados os seus principais componentes, o sistema de controle, a análise, diagnóstico e critérios que permitem descartar ou reaproveitar os componentes da arquitetura deste sistema.

A terceira seção é o principal foco deste trabalho e mostra como foi projetado e elaborado o novo Sistema de Controle do laser, do ponto de vista da arquitetura, do software e do hardware. Nesta seção também é exposto o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de interferência magnética de baixa frequência que fará parte deste novo Sistema de Controle.

Na quarta seção são apresentados os resultados obtidos com a implementação dos módulos do sistema SCADA-FEL. Serão exibidos os testes e as avaliações de alguns transdutores eletromagnéticos do laser e em seguida os testes realizados com o Sistema de monitoramento magnético desenvolvido. Esta seção demonstra a funcionalidade e a efetiva comunicação entre os módulos do sistema SCADA projetado.

Por último as conclusões e considerações finais do trabalho.

Sumário

Resumo ... 3
Abstract ... 4
Agradecimentos ... 5
Apresentação ... 6
Lista de figuras ... 9
Lista de tabelas ... 12
Lista de abreviações e siglas ... 13
1. Introdução ... 15
1.1. Laser ... 15
1.2. Laser de Elétrons Livres ... 17
1.3. Sistema de Controle de Aceleradores – O estado da arte ... 21
1.3.1. Sistema Supervisório do Sistema de Controle ... 23
1.3.2. Protocolos de Comunicação ... 25
1.3.3. Descrição física de um Sistema de Controle ... 26
1.4. Objetivos do trabalho ... 27
2. Laser de Elétrons Livres – CREOL ... 28
2.1. Descrição do Sistema ... 28
2.2. Sistema de Aceleração ... 30
2.3. Sistema de Vácuo ... 32
2.4. Sistema de Transporte do Feixe de Elétrons ... 32
2.4.1. Dipolos ... 33
2.4.2. Quadrupolos ... 33
2.4.3. Monitores do Feixe de Elétrons ... 34
2.4.4. Torre de Potência ... 36
2.5. Sistema de Emissão Laser ... 37
2.6. Sistema de Controle ... 39
2.6.1. Programas Servidores ... 41
2.6.2. Painel de Operação ... 43
2.6.3. Limitações do Sistema de Controle ... 43
3. Projeto e Desenvolvimento ... 45
3.1. Descrição física ... 45
3.1.1. Plataforma de Hardware ... 45
3.2. Sistema SCADA-FEL ... 50
3.2.1. Banco de Dados ... 51
3.2.2. Intranet ... 53
3.2.3. Protocolo de Comunicação ... 53

3.2.4. Programa Servidor Principal 54
3.2.5. Programa Servidor de Hardware 58
3.2.6. Sistema de Diagnóstico 60
3.3. Monitoramento Magnético 60
4. Discussão dos Resultados 64
4.1. Painel de Controle 64
4.2. Caracterização dos Transdutores Eletromagnéticos 67
4.3. Monitoramento Magnético 70
5. Conclusão 76
6. Referências 79
ANEXO A – Sistema de Controle FEL-CREOL 85
ANEXO B – Banco de Dados do Sistema de Controle 86
ANEXO C – Diagramas dos módulos DAC e ADC 90
ANEXO D – Diagrama do protocolo de comunicação 92
ANEXO E – Firmware do instrumento de monitoramento magnético 93

Lista de figuras

Figura 1 – Esquema básico do funcionamento de um laser. 15

Figura 2 – Esquema do sistema de geração, transporte e injeção do feixe de elétrons no ondulador de um FEL [29]. 18

Figura 3 – Mecanismo de funcionamento de um FEL, indicando a interação do feixe de elétrons com o campo magnético periódico do ondulador produzindo radiação eletromagnética. .. 19

Figura 4 – Configuração de um ondulador *Hybrid*. 20

Figura 5 – Distribuição hierárquica dos processos em um Sistema de Controle. 21

Figura 6 – Arquitetura de um sistema SCADA dividido em três camadas: Interface com o operador, Servidores e Controladores. 24

Figura 7 – Fluxo dos pacotes de dados entre as camadas de comunicação do modelo OSI (azul) e TCP/IP (marrom). 25

Figura 8 – Laser instalado na CREOL. À esquerda o Acelerador Tandem, os Dipolos em amarelo, Quadrupolos em verde e Ondulador ao fundo (Fotografia obtida nos arquivos do FEL-CREOL). 29

Figura 9 – Acelerador eletrostático Tandem de 1,7MV utilizado no FEL-CREOL [2]. 31

Figura 10 – Dipolo eletromagnético utilizado no FEL-CREOL. 33

Figura 11 – Quadrupolo eletromagnético. À esquerda a configuração dos solenoides e a direita o Quadrupolo utilizado no FEL-CREOL. 34

Figura 12 – Posições da haste do monitor do feixe visualizadas no sentido da trajetória do feixe. a) *Up,* b) *Middle e* c) *Down.* 35

Figura 13 – Monitor do feixe utilizado para o alinhamento do feixe de elétrons. À esquerda a vista lateral interna desenhada e a direita uma foto real do dispositivo. 36

Figura 14 – Fonte de corrente bipolar utilizada na Torre de Potência. 37

Figura 15 – À esquerda: Vista do interior do Ondulador aberto, é possível visualizar os cassetes que contém os magnetos. À direita: Ondulador fechado, vista lateral (arquivos FEL-CREOL). 38

Figura 16 – Cassete do Ondulador, à esquerda a vista frontal e à direita a vista da superfície... 38

Figura 17 – Extremidade de um dos lados do cilindro hermético, expondo um dos espelhos da cavidade ressoante. 39

Figura 18 – Diagrama do sistema de controle CREOL. 41

Figura 19 – À esquerda o rack contendo a plataforma CAMAC, os terminais de conexão e o computador Thunder e à direita o Painel de Operação FEL-CREOL. 43

Figura 20 – Diagrama de blocos do sistema PXI utilizado. 47

Figura 21 – O Sistema SCADA-FEL controla os Dipolos e Quadrupolos através dos módulos ADC e DAC e Torre de Potência. 49

Figura 22 – Esquema simplificado da arquitetura proposta para o SCADA-FEL. 50

Figura 23 – Diagrama simplificado dos dispositivos principais de controle do feixe eletrônico. 52

Figura 24 – Estrutura do pacote definido no protocolo de aplicação. 53

Figura 25 – Formato do pacote utilizado para requisição de leitura entre os módulos do sistema SCADA-FEL. 56

Figura 26 – Formato do pacote de resposta do servidor para um pedido de leitura válido. 57

Figura 27 – Algoritmo de configuração e controle do campo dos Dipolos e Quadrupolos 59

Figura 28 - Diagrama de blocos do Sistema de Monitoramento Magnético. 62

Figura 29 – Painel do sistema de monitoramento magnético. 62

Figura 30 – Painel de Controle do usuário, cada um dos elementos de controle é acessado através do painel *touchscreen*. 65

Figura 31 – Painel de Controle, quando acionado o controle de um dos Dipolos eletromagnéticos 67

Figura 32 – Foto da mesa robótica XYZ utilizada na caracterização de um Dipolo magnético. As setas indicam o curso dos eixos dos servomecanismos e da ponteira de prova Hall. 68

Figura 33 – Curva do campo magnético resultante em função da corrente elétrica aplicada no Dipolo apresentando a histerese deste dispositivo. 69

Figura 34 – Mapeamento magnético do entreferro de um Dipolo de base trapezoidal (à esquerda) e retangular (à direita) com corrente elétrica de polarização de 1A. 69

Figura 35 – Par de Helmholtz utilizado para a calibração do módulo sensor e o módulo sensor ao centro. 70

Figura 36 – Espectros do campo magnético para excitação de 25nT em 2Hz com taxa de aquisição de 60ms à esquerda e 245nT em 52Hz e taxa de aquisição de 2ms a direita. 71

Figura 37 – Espectro magnético com excitação de 245nT e frequência de 10Hz até 100Hz com passos de 10Hz em intervalos de dez minutos. 72

Figura 38 – Intensidade do campo magnético medido pelos sensores do MicroMag3 quando rotacionado em torno de Z. 72

Figura 39 – Medidas de monitoramento do ruído magnético, à esquerda o espectro magnético com a intensidade representada por uma escala de cor e à direita a medida do campo magnético contínuo. 73

Figura 40 – Medidas de monitoramento magnético utilizando uma câmara blindada. 73

Figura 41 – Monitoramento do campo magnético no CBPF (H representa o módulo dos eixos XY e F representa o modulo dos três eixos XYZ). 74

Figura 42 – Monitoramento do campo magnético realizado na PUC-Rio. 74

Figura 43 – Espectro magnético com as medidas realizadas no CBPF, à direita um espectro tomado na região central do gráfico da esquerda. 75

Figura 44 – Formato das colunas na tabela “FEL” do novo banco de dados. 86

Figura 45 – Utilizando o LabVIEW para criar uma tabela em um Banco de Dados. 88

Figura 46 – Atualização de um registro no banco de dados utilizando a linguagem SQL e o LabVIEW. 88

Figura 47 – Leitura de um registro no banco de dados utilizando a linguagem SQL e LabVIEW. 89

Figura 48 – Diagrama de blocos utilizado para fazer uma varredura pelos canais da ADC à taxa de 100Khz. 90

Figura 49 – Diagrama de blocos utilizado para mudar a tensão de saída de um canal do módulo PXI CP266. 91

Figura 50 – Diagrama de blocos do programa LabVIEW utilizado para escrita de um registro no banco de dados do sistema de controle. 92

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características do Laser (FEL-CREOL) [50, 51]. 28
Tabela 2 – Características do Ondulador projetado [51, 2, 59]. 37
Tabela 3 – Especificações da controladora 46
Tabela 4 – Especificações técnicas DAC CP266 [72]. 47
Tabela 5 – Especificações técnicas da interface ADC CP213 [73]. 48
Tabela 6 – Especificações técnicas da interface RIO NI PXI-7813R. 49
Tabela 7 – Configurações utilizadas para os drivers dos módulos PXI [72, 73]. 51
Tabela 8 – Composição do cabeçalho e finalização do pacote. 54
Tabela 9 – Lista de comandos programados no programa servidor do sistema de controle. 54
Tabela 10 – Configurações do tempo de aquisição do MicroMag3 [78]. 61
Tabela 11 – Configuração da velocidade de aquisição. 63
Tabela 12 – Códigos e parâmetros "rhandler" e "rparam". 86
Tabela 13 – Códigos e parâmetros "whandler" e "wparam". 87

Lista de abreviações e siglas

ADC – ***A**nalogic **D**igital **C**onverter*

ASIC – ***Application **S**pecific **I**ntegrated **C**ircuit*

CAMAC – ***C**omputer **A**utomated **M**easurement **a**nd **C**ontrol*

CERN – ***C**onseil **E**uropéen pour la **R**echerche **N**ucléaire*

CCS – ***C**ohesive **C**ontrol **S**ystem*

CREOL – ***C**enter for **R**esearch and **E**ducation in **O**ptics and **L**asers*

DAC – ***D**igital **A**nalog **C**onverter*

DIO – ***D**igital **I**nput **O**utput*

DNS – ***D**omain **N**ame **S**ystem*

FFT – ***F**ast **F**ourier **T**ransformer*

FEL – ***F**ree **E**lectron **L**aser*

FEL-CREOL** – **F**ree **E**lectron **L**aser desenvolvido na **CREOL

Fermilab – *Fermi National Accelerator Laboratory*

FIR – ***F**ar **I**nfrared*

FPGA – ***Field **P**rogrammable **G**ate **A**rray*

FTP – ***F**ile **T**ransfer **P**rotocol*

GPIB – ***G**eneral **P**urpose **I**nterface **B**us*

HTTP – ***H**yper**T**ext **T**ransfer **P**rotocol*

HMI – ***Human **M**achine **I**nterface*

IBM – ***I**nternational **B**usiness **M**achines*

IP – ***I**nternet **P**rotocol*

ISA – ***I**ndustry **S**tandard **A**rchitecture*

LAN – *Local Area Network*

LASER – ***L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation*

ODBC – ***O**pen **D**ata**b**ase **C**onnectivity*

OSI – ***O**pen **S**ystems **I**nterconnection*

PC – ***P**ersonal **C**omputer*

PCI – ***P**eripheral **C**omponent **I**nterconnect*

PXI – ***PCI** e**X**tensions for **I**nstrumentation*

RAM – ***R**andom **A**ccess **M**emory*

RIO – ***R**econfigurable **I**nput **O**utput*

SCADA – ***S**upervisory **C**ontrol and **D**ata **A**cquisition*

SCADA-FEL *– Sistema* ***SCADA*** *desenvolvido para o* ***FEL***

SPI – ***S****erial* ***P****eripheral* ***I****nterface*

SSH – ***S****ecure* ***Sh****ell*

TCP – ***T****ransmission* ***C****ontrol* ***P****rotocol*

USB – ***U****niversal* ***S****erial* ***B****us*

VISA – ***V****irtual* ***I****nstrument* ***S****oftware* ***A****rchitecture*

VME – ***V****ersa* ***M****odule* ***E****uropa*

VXI – ***VME*** *e****X****tensions for* ***I****nstrumentation*

1. *Introdução*

Nesta parte do trabalho serão descritos os princípios básicos de um laser convencional e como se pode obter radiação eletromagnética coerente a partir da interação de elétrons relativísticos com campo magnético periódico. Logo após serão apresentados os conceitos básicos e as principais características de sistemas de controle utilizados em aceleradores eletrostáticos e, por fim, serão mencionados os objetivos deste trabalho.

1.1. Laser

O surgimento do laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) possibilitou o estudo de fenômenos ópticos não lineares e de processos que requerem pulsos coerentes de luz. A utilização desta tecnologia é amplamente difundida atualmente e possui diversas aplicações na medicina [5], na indústria e na ciência [6].

Laser é um dispositivo que amplifica a radiação eletromagnética e produz um feixe direcional, intenso, coerente e de comprimento de onda definido. Consiste basicamente de um meio amplificador excitado (onde a emissão estimulada ocorre) e uma cavidade óptica formada por um espelho e um semi-espelho [7], conforme Figura 1.

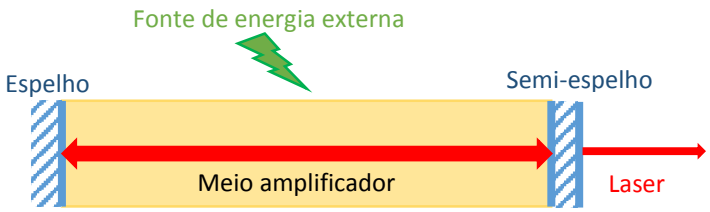

Figura 1 – Esquema básico do funcionamento de um laser.

A cavidade óptica tem o objetivo de confinar a radiação eletromagnética produzida, obrigando a radiação eletromagnética a atravessar diversas vezes o meio amplificador excitado. Os átomos excitados do meio amplificador, ao serem estimulados pela radiação eletromagnética, decaem emitindo fótons gerando um efeito em cadeia. Estes fótons saem da cavidade pelo semi-espelho formando a radiação laser. As principais

características da radiação eletromagnética produzida por um laser são a alta coerência, monocromaticidade, alta intensidade e elevada colimação [7].

Existem diversos tipos de lasers, dos mais variados materiais (meio amplificador), frequência (10^{11} – 10^{17}Hz), potência (10^{-9} – 10^{20}W) e duração de pulsos ($5x10^{-15}$s – Contínuo) [8]. A maioria dos lasers disponíveis comercialmente não são sintonizáveis e existem aplicações onde isto é desejável [9] como: espectroscopia [10, 11], sensoriamento remoto [12], indústria e medicina [13]. Alguns tipos de lasers sintonizáveis mais comuns são:

- ***Ti-sapphire (Ti:Al_2O_3)***: Tipo de laser em que pode-se sintonizar o comprimento de onda no regime contínuo de 710nm – 870nm [14] e no regime pulsado de 660nm – 986nm [15] com largura de pulso que pode variar de alguns picosegundos até 10 femtosegundos [8].

- **Laser de corante orgânico** (*Dye Lasers*): Tipo de laser em que o meio amplificador é um corante orgânico. Diferentes tipos de corantes podem ser utilizados para alterar o comprimento de onda do laser emitido. Normalmente o laser de corante é excitado por outro tipo de laser ou uma rápida descarga de uma lâmpada *flash* [13]. A região do espectro em que os *Dye Lasers* operam vai de 320nm até 1200nm [13].

- **Laser à fibra óptica**: Laser baseado em fibra óptica dopada com elementos de terra rara como meio amplificador. Dependendo do dopante é possível alterar as propriedades da radiação emitida [16]. Entre os dopantes mais utilizados estão o Érbio, que fornece radiação de 1530nm a 1620nm, e o Titânio que fornece radiação de 1750nm a 2100nm [17].

- **Laser de semicondutor**: Utiliza um semicondutor como meio amplificador e é excitado por tensão elétrica. Dependendo do semicondutor é possível alterar as propriedades do laser [8]. A região de operação é de 20nm até 1500nm [12].

Dos lasers sintonizáveis citados, nenhum consegue abranger uma ampla região do espectro eletromagnético de maneira contínua e uniforme. Na maioria das vezes é necessária a substituição do meio amplificador, o que nem sempre é uma tarefa simples e prática de ser realizada. Um laser que ganha destaque por ser altamente sintonizável é

o laser de elétrons livres (*Free Electron Laser* – FEL) [1, 8]. Este tipo de laser emite radiação eletromagnética coerente através da interação de elétrons relativísticos com campo magnético senoidal e periódico [1]. A alteração da energia dos elétrons acelerados e/ou periodicidade e intensidade do campo magnético altera o comprimento de onda e a intensidade da radiação eletromagnética emitida. O FEL pode trabalhar de maneira uniforme em regiões do espectro eletromagnético em que os lasers convencionais não são eficazes [18], onde a região de trabalho vai do micro-ondas até os Raios-X[1] [19].

Existem várias maneiras de produzir radiação eletromagnética com o uso de aceleradores de elétrons, mas somente com o laser de elétrons livres é possível conseguir radiação bem definida (linha espectral estreita), colimada e coerente [1]. A principal razão disto é o uso de um dispositivo magnético de inserção [20] denominado ondulador magnético.

Este tipo de laser foi proposto em 1933 por Kapitza e Dirac [21] e a teoria fundamental foi analisada nas décadas de 1960 e 1970 por Dreicer [22], Pantell et al [23], Madey et al [18, 24], Sukhatme e Wolff [25] utilizando mecânica quântica, e em 1976 a teoria foi analisada por F.A. Hopf et al [26] utilizando abordagem clássica.

1.2. Laser de Elétrons Livres

A amplificação óptica em um FEL é obtida a partir da injeção de um feixe de elétrons relativísticos em um dispositivo magnético denominado ondulador [3]. O feixe de elétrons é conduzido ao ondulador por meio de campos magnéticos produzidos por transdutores eletromagnéticos tipo solenoide, tais como dipolos e quadrupolos [27].

Conforme ilustrado no diagrama da Figura 2, dipolos permitem defletir o feixe de elétrons. Os quadrupolos permitem corrigir a divergência do feixe, atuando de forma análoga a lentes ópticas [27, 28]. Os campos magnéticos produzidos por estes dispositivos são determinados por sua geometria e normalmente são controlados aplicando-se corrente elétrica. A condução dos elétrons se dá através de uma linha de vácuo, necessária para

[1] A faixa de operação do micro-ondas aos Raio-X compreende a combinação de diversos FEL operacionais.

aumentar o livre caminho médio dos elétrons, minimizando perdas de energia devido ao choque do feixe eletrônico com moléculas de gás de fundo.

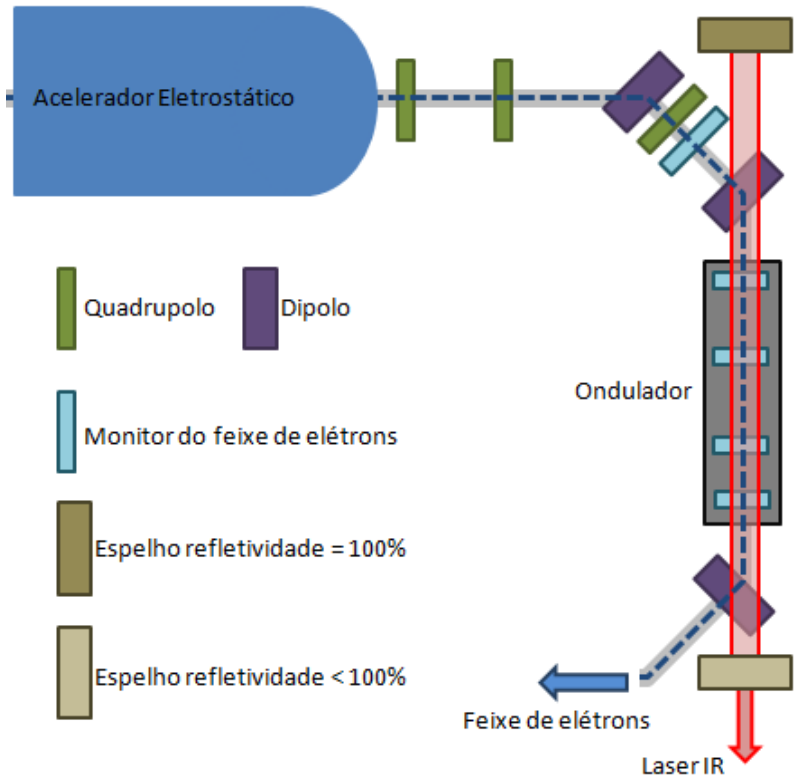

Figura 2 – Esquema do sistema de geração, transporte e injeção do feixe de elétrons no ondulador de um FEL [29].

O ondulador é um dispositivo que apresenta no seu eixo axial campo magnético periódico e estático obtido a partir de um conjunto de magnetos dispostos alternadamente [30]. A radiação eletromagnética emitida é resultado da interação do feixe de elétrons relativístico com o campo magnético periódico e com a onda eletromagnética que se propaga na mesma direção que os elétrons, conforme Figura 3. O monitor do feixe, representado na Figura 2 se refere a dispositivos que auxiliam na visualização do feixe com o objetivo de centragem e colimação.

Quando os elétrons sofrem a ação da força de Lorentz (devido ao campo magnético no interior do ondulador) emitem radiação eletromagnética de abertura óptica estreita e na direção da trajetória do feixe [31]. A cavidade ressoante do ondulador, formada pelos espelhos, cria uma onda eletromagnética estacionária que interage com o feixe de elétrons e, na condição de ressonância, provoca a emissão estimulada da radiação

[1]. Este processo é semelhante ao que ocorre em uma cavidade ressoante de um laser convencional.

A radiação eletromagnética estacionária atua acelerando e desacelerando parte do feixe de elétrons agrupando-os ao longo do eixo óptico dependendo da fase do modo estacionário dentro da cavidade. Os elétrons agrupados produzem radiação eletromagnética coerente com a radiação eletromagnética estacionária (Figura 3) [3, 29].

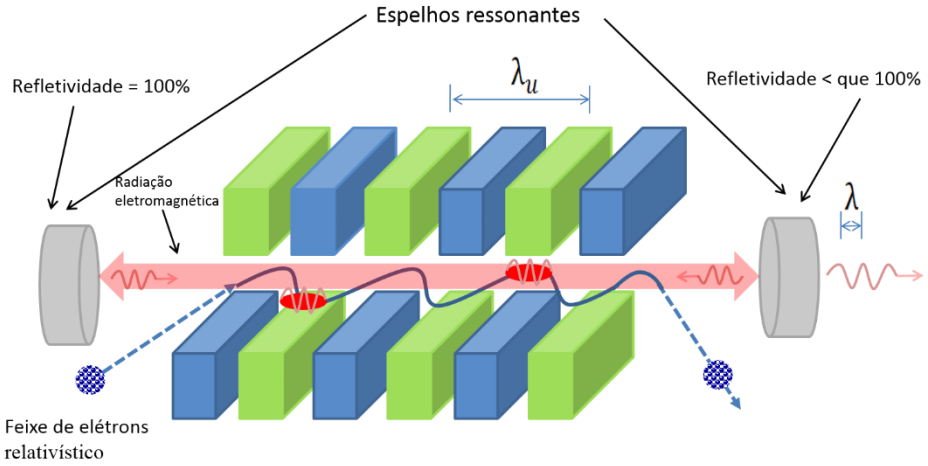

Figura 3 – Mecanismo de funcionamento de um FEL, indicando a interação do feixe de elétrons com o campo magnético periódico do ondulador produzindo radiação eletromagnética.

Normalmente são utilizadas duas configurações de magnetos na construção dos onduladores: *Halbach* e *Hybrid* [32]. Estas configurações definem a orientação dos polos dos magnetos e permitem intensificar o campo magnético na região de interesse do ondulador.

A diferença entre estas configurações está relacionada ao fato de que nos onduladores do tipo *Hybrid* existem placas de material ferromagnético entre os magnetos, o que melhora a sua performance, entretanto esta configuração é mais complexa de ser projetada e requer análise numérica [32].

Na Figura 4 é apresentada a configuração típica de um ondulador do tipo *Hybrid*, onde as setas de cor preta indicam a orientação do campo magnético dos magnetos e as setas de cor vermelha indicam o campo magnético resultante nos ferromagnéticos. A linha tracejada vermelha indica a intensidade do campo magnético periódico resultante da configuração que será utilizada para deflexionar os elétrons no interior do ondulador.

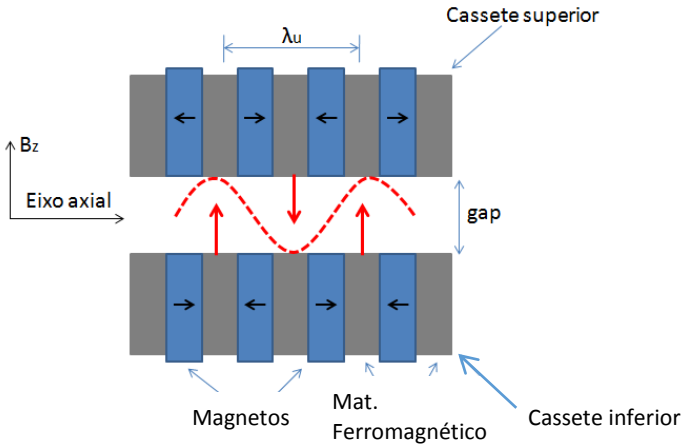

Figura 4 – Configuração de um ondulador *Hybrid*.

A equação fundamental de um Laser de Elétrons Livres, equação (1), relaciona o comprimento de onda λ da radiação eletromagnética emitida, ao comprimento de onda λ_u do ondulador, ao fator de Lorentz γ (associado à energia do feixe de elétrons) e ao parâmetro do ondulador K (relacionado com a configuração do dispositivo), onde c é a velocidade da luz no vácuo, e e m são, respectivamente, a carga e a massa do elétron e B_0 a amplitude magnética do ondulador (associados ao campo magnético periódico característico do ondulador) [3].

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2}\left(1 + \frac{K^2}{2}\right), onde\ K = \frac{eB_0\lambda_u}{2\pi mc} \qquad (1)$$

Para o ondulador *Hybrid*, a amplitude do campo magnético B_0 corresponde a equação empírica [3]:

$$B_0 = 3{,}3 \cdot \exp\left\{-\frac{g}{\lambda_u}(4{,}94 - 1{,}45\frac{g}{\lambda_u}\right\} \qquad \textbf{(2)}$$

Onde g representa o *gap* do ondulador, conforme Figura 4. O campo magnético (B_z) ao longo do eixo axial (x), no interior do ondulador, obedece a seguinte relação [33]:

$$B_z(x) = -B_0 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda_u} \cdot x\right) \qquad \textbf{(3)}$$

O comprimento de onda da radiação eletromagnética produzida pelo FEL (λ) pode ser sintonizada, atuando na energia do feixe de elétrons (γ) e/ou variando mecanicamente as características magnéticas do ondulador (λ_u, B_0) [3]. Os fundamentos teóricos

referentes a trajetória e a emissão de radiação dos elétrons no ondulador pode ser vista com detalhes em [31, 33, 34, 35, 36].

1.3. Sistema de Controle de Aceleradores – O estado da arte

Em experimentos complexos, em que o número de parâmetros físicos é da ordem de centenas, é conveniente o desenvolvimento de um sistema gerenciador capaz de monitorar o experimento, atuar em situações de risco, realizar rotinas automatizadas e principalmente: oferecer total controle e segurança ao usuário. Este conjunto de processos é denominado: Sistema de Controle [37].

Aceleradores eletrostáticos requerem intenso estudo para que se possa implementar um Sistema de Controle eficaz, facilmente atualizável, robusto e seguro. Os tipos de controle de processos envolvidos para a operação de um acelerador podem ser distribuídos em uma hierarquia estruturada em camadas, onde os controles mais complexos pertencem as camadas superiores [37], conforme Figura 5.

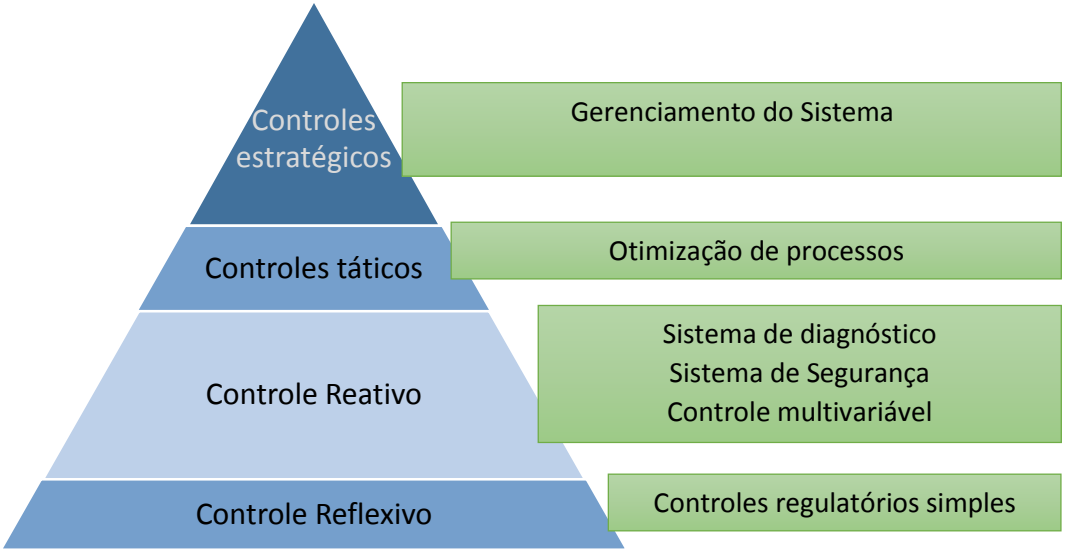

Figura 5 – Distribuição hierárquica dos processos em um Sistema de Controle.

Para o controle de aceleradores não é necessário que todas estas camadas estejam disponíveis, principalmente se tratando de aceleradores eletrostáticos de pequeno porte. Porém, com o avanço e redução de custos de sistemas computacionais é perfeitamente possível a adaptação da maioria destas camadas em qualquer Sistema de Controle. Estas camadas são descritas a seguir:

- **Controles Estratégicos**.

  Nesta camada são implementados controles de processos referentes ao gerenciamento do sistema, como: manutenção, agenda de utilização, permissão de usuários e paradas programadas. Estes controles são essenciais para a administração de sistemas multiusuário e de cooperação internacional. Um sistema baseado em uma rede global com gerenciamento de usuários representa o estado da arte no que diz respeito à Sistemas de Controle [38, 39].

- **Controles táticos**.

  Utiliza modelos matemáticos em tempo real para o controle e otimização de processos. Os controles táticos representam a inteligência artificial do Sistema de Controle [37, 40, 41].

- **Controles reativos**.

  São dispositivos de controle que realizam processos mediante alguma retroalimentação do sistema e normalmente são desempenhados por um sistema computadorizado [37]. Desta maneira, é possível instituir um sistema de diagnóstico, algoritmos e sistemas de segurança adaptável às configurações dos parâmetros do sistema.

- **Controles reflexivos**.

  São os mais numerosos e simples dispositivos de controle de um Sistema de Controle [37] e desempenham tarefas de baixa complexidade. Exemplos destes controles podem ser: válvulas, interruptores relés, termostatos, motores, sensores e servos mecânicos. A maioria destes controles são desempenhados por processos mecânicos simples que podem ou não serem controlados de maneira automatizada.

Um Sistema de Controle computadorizado normalmente é baseado em um sistema computacional distribuído, padrão amplamente utilizado em diversos aceleradores de grandes instituições como o *CERN* [42] e o *Fermilab* [43]. A grande vantagem de um sistema distribuído é a capacidade de modularização do conjunto, permitindo que uma parte danificada possa ser substituída e/ou atualizada sem que todo o Sistema de Controle necessite passar por modificações agressivas.

A utilização de sistemas computacionais distribuídos tende a ter custo-benefício superior, uma vez que podem utilizar numerosas máquinas dedicadas com mais disponibilidade no mercado, favorecendo a ampliação orgânica do sistema ao passo que em um sistema central seria exigido máquinas de alta performance que demandam investimento inicial elevado. Com o avanço dos microcontroladores e dos *System-on-a-chip*[2] é cada vez mais intuitiva a utilização de sistemas distribuídos, paralelizando e otimizando o processamento.

Um Sistema de Controle computadorizado é dividido em duas partes principais: **hardware** e **software**. O hardware define a parte física do Sistema, é responsável pela conversão de processos programados logicamente em ações de controle e monitoramento. O hardware engloba todos os componentes eletrônicos e circuitos elétricos do conjunto de controle. O software, denominado neste contexto de Sistema SCADA, é responsável pelo processamento das informações e por implementar algoritmos para controle e automação dos processos através de *drivers* e protocolos de comunicação específicos.

1.3.1. Sistema Supervisório do Sistema de Controle

Em um Sistema de Controle computacional, o software é baseado em um sistema Supervisório e de Aquisição de Dados denominado SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisition*). Este sistema é a denominação técnica para o conjunto de programas que apresentam uma arquitetura específica voltada para monitorar, controlar e supervisionar os processos e subprocessos que envolvam múltiplos parâmetros, variáveis e dispositivos [44]. Os dispositivos e equipamentos que realizam os processos de controle e monitoramento são conectados através de controladores (*drivers*), que são programas de computador dedicados para realizar as operações de comunicação com a função especifica de tornar os elementos de hardware acessíveis ao Sistema Supervisório, permitindo o controle por algoritmos.

Em princípio, um sistema SCADA deve permitir sua contínua atualização e apresentar: robustez, modularidade e confiabilidade. Existem sistemas SCADA proprietários e comerciais disponíveis para várias plataformas e sistemas operacionais

[2] *System-on-a-chip* (SoC) se refere a um circuito integrado que possui todos os componentes de um computador, ou qualquer outro sistema eletrônico.

[44]. Experimentos científicos demandam uma arquitetura aberta, acessível, escalonavel, flexível e normalmente baseada em um sistema computacional conectado através de uma rede local (LAN – *Local Area Network*) [37].

O Software de um sistema SCADA é baseado em um conjunto de aplicações do tipo cliente-servidor que se comunicam através de protocolos de comunicação previamente estabelecidos. As aplicações do tipo cliente requisitam a execução dos processos e as aplicações do tipo servidor executam os processos.

Conforme ilustrado na Figura 6, podemos dividir um Sistema SCADA em três camadas principais: **Camada de Interface**, que apresenta painéis interativos com gráficos, alarmes, informações e permite a configuração dos parâmetros dos processos; **Camada dos Servidores,** responsável pelo controle dos processos e armazenamento de parâmetros de operação e configuração do Sistema de Controle [44, 45], e **Camada de Controladores**, que atua diretamente nos transdutores, circuitos e instrumentos através de *drivers* de hardware.

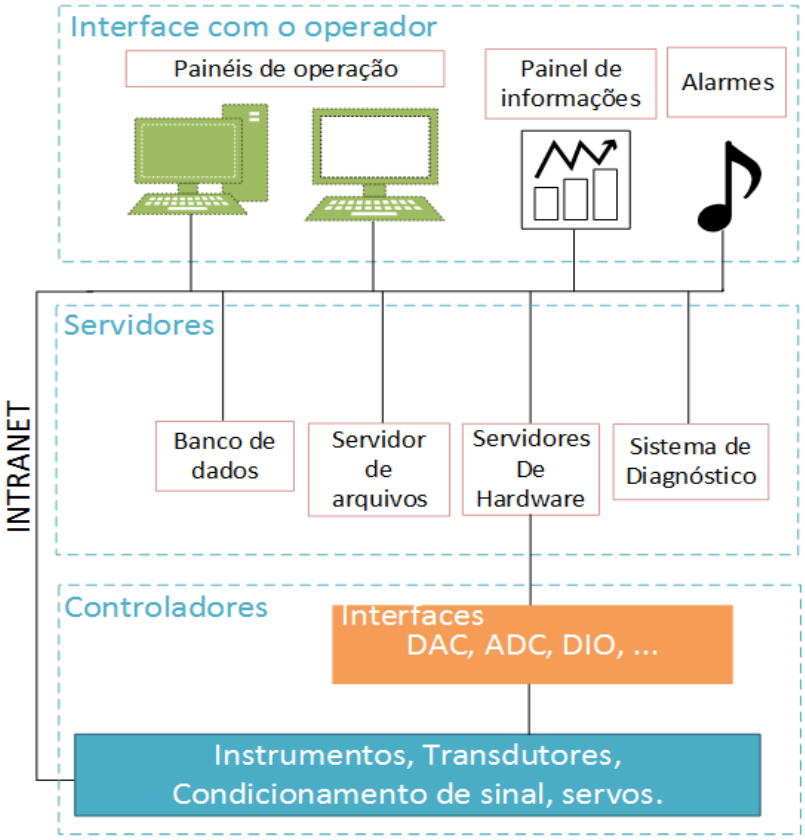

Figura 6 – Arquitetura de um sistema SCADA dividido em três camadas: Interface com o operador, Servidores e Controladores.

1.3.2. Protocolos de Comunicação

A interconexão e comunicação entre os módulos do Sistema de Controle se processa pela utilização de interfaces e protocolos de comunicação que podem ser estabelecidos por rádio, fibras ópticas ou cabos elétricos e podem ser do tipo analógica ou digital. Em computação, um protocolo de comunicação é definido como um padrão, um conjunto de normas e especificações, estabelecido por uma convenção que permite a conexão e a transferência de dados entre sistemas computacionais. Esta convenção estabelece a sintaxe da troca das informações, as conexões lógicas, mecânicas e elétricas.

O modelo OSI (*Open Systems Interconnect*) é um modelo de referência utilizado para a comunicação entre sistemas computacionais que envolve a adoção de sete camadas conceituais [46], conforme Figura 7. Cada uma das camadas possui um conjunto de especificações que encapsula o pacote recebido de uma camada superior, adiciona um cabeçalho próprio e o transmite para uma camada abaixo, até que a informação esteja presente na última camada. A última camada (de cima para baixo) é conhecida como a **Camada Física**. Nela estão definidos os parâmetros físicos da transmissão dos dados entre os sistemas de processamento.

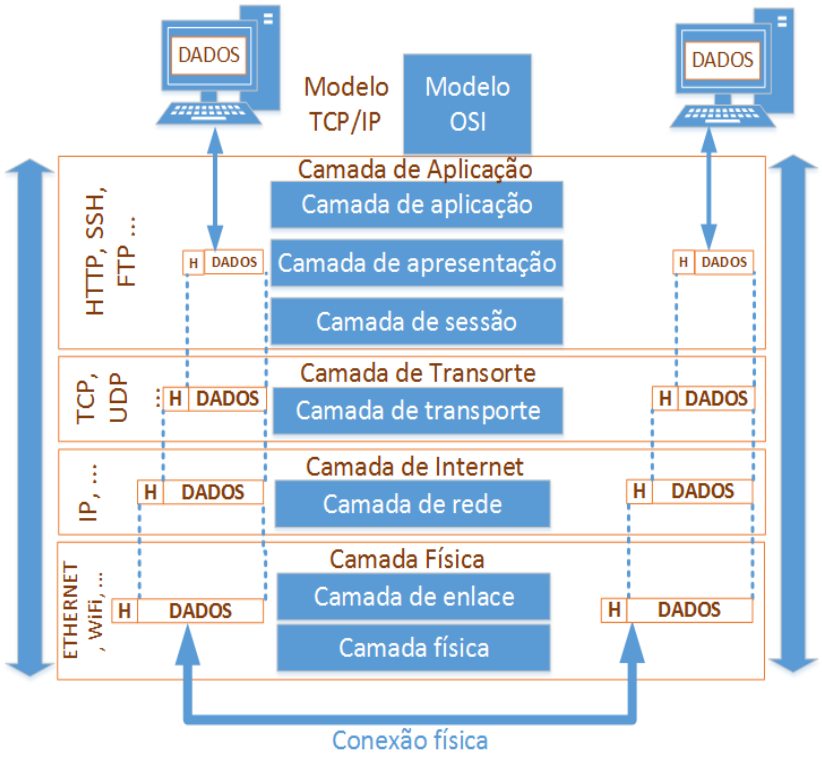

Figura 7 – Fluxo dos pacotes de dados entre as camadas de comunicação do modelo OSI (azul) e TCP/IP (marrom).

No sistema de processamento que recebe a informação, os dados precisam ser repassados pelas camadas que retiram as informações de cabeçalho pertinente àquela camada e a envia para uma camada adjacente posterior. O processo se repete até que o dado esteja disponível na primeira camada, definida como Camada de Aplicação. Na Camada de Aplicação, os dados são processados pelo programa supervisório. Exemplos de protocolos da camada de aplicação são o HTTP, FTP, SSH e o DNS. Exemplos de protocolos da camada física são o USB, RS-232, 10BASE-T, PCI e GPIB.

O modelo de comunicação TCP/IP é comparável à estrutura do modelo OSI englobando as sete camadas em quatro camadas (Aplicação, Transporte, Rede e Física), conforme esquematizado na Figura 7 em marrom. Estes modelos permitem que um elemento ou módulo do processo possa ser facilmente substituído desde que atenda as especificações das camadas adjacentes.

1.3.3. Descrição física de um Sistema de Controle

A execução dos processos físicos de um Sistema de Controle, que está relacionada com a operação do equipamento, é efetivada pelo hardware do sistema de controle. O hardware pode ser composto por computadores, plataformas de hardware, interfaces, instrumentos, transdutores e atuadores.

As **Plataformas de Hardware** são sistemas modulares que fornecem estrutura física e potência elétrica necessária para interconectar os módulos e as interfaces à unidades de processamento através de protocolos de comunicação padronizados para a plataforma. Quando os processos de controle apresentam certo nível de complexidade, demandando estabilidade, robustez e segurança, são exigidas plataformas de hardware compatíveis. Alguns exemplos de arquiteturas projetadas para instrumentação são: CAMAC (*Computer Automated Measurement And Control*) [47], PXI (*PCI eXtensions for Instrumentation*) [48] e VXI (*VME eXtensions for Instrumentation*) [49].

Os **Transdutores e atuadores** representam os dispositivos objetos de controle e compreendem os **Controles Reflexivos** na hierarquia de processos de controle, detalhado na seção 1.3. São: válvulas, motores, bombas de vácuo, dipolos eletromagnéticos, quadrupolos eletromagnéticos, sensores de campo magnético, sensores de temperatura, lâmpadas, entre outros.

1.4. Objetivos do trabalho

Um dos objetivos deste trabalho foi o estudo do Sistema de Controle do laser FEL-CREOL para elaborar e desenvolver um Sistema de Controle que será operacional no novo projeto do laser. Este processo envolve a compreensão e a documentação dos detalhes de funcionamento e da dinâmica da troca das informações entre os módulos do sistema FEL-CREOL.

Como objetivo principal, é proposto o desenvolvimento de um Sistema de Controle SCADA para um Laser de Elétrons Livres do tipo realimentado, SCADA-FEL. Este projeto é baseado na linguagem de programação gráfica LabVIEW, plataforma de hardware PXI e foi inspirado no Sistema de Controle FEL-CREOL.

Com o objetivo de caracterizar os dispositivos físicos do FEL-CREOL, para possível utilização no novo projeto do laser, foi construída uma ferramenta para testes e avaliação nos transdutores eletromagnéticos (Dipolos e Quadrupolos) e no sistema de condicionamento de sinal do transporte do feixe de elétrons.

Para garantir a qualidade da radiação eletromagnética emitida pelo FEL, foi proposto o desenvolvimento de um Sistema de monitoramento de interferência magnética de baixa frequência. Este tipo de interferência afeta a colimação do feixe eletrônico e é um desafio recorrente em equipamentos que utilizam feixe eletrônico de baixa intensidade.

2. *Laser de Elétrons Livres – CREOL*

Nesta seção descrevemos um Laser de Elétrons Livres desenvolvido no *Center for Research and Education in Optics and Lasers* (CREOL), *University of Central Florida*, operacional entre 1997 e 2001. Além da compreensão dos mecanismos de um FEL, parte dos objetivos deste trabalho é criar ferramentas para verificar a viabilidade de se reaproveitar os elementos operativos do FEL CREOL no projeto de um novo sistema, que possa operar na faixa do infravermelho longínquo (*Far Infrared* – FIR) com comprimentos de onda entre 250 a 1000 μm. O reaproveitamento destes componentes, especificamente os transdutores eletromagnéticos do sistema de transporte do feixe eletrônico, podem representar um importante fator de economia na eventual proposta de desenvolvimento e construção de um novo FEL.

2.1. Descrição do Sistema

O FEL projetado na CREOL é um sistema compacto e realimentado que utiliza feixe eletrônico de baixa energia para gerar radiação laser contínua ou pulsada com potência média de até 1kW na região do infravermelho longínquo. O FEL-CREOL possui sistema de recuperação que permite maior eficiência energética na geração do feixe eletrônico. Os componentes deste projeto foram transferidos para o Brasil por iniciativa de Ricardo Galvão, do CBPF, e Luís Elias, da Universidade do Havaí. As características principais da radiação originalmente emitida por este laser [2] são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do Laser (FEL-CREOL) [50, 51].

Frequência sintonizável	0,3 – 1,22 THz
Duração do pulso	100 ns – contínuo
Homogeneidade da frequência	1 parte em 10^8
Potência de pico	1000 W
Potência média	< 1000 W
Energia do feixe de elétrons	1,0 – 1,7MeV
Corrente do feixe de elétrons	0,2 A
Emitância	$\sim 2{,}5\ \pi\ mm.mrad$

Na Figura 8 é apresentada a antiga instalação do laser FEL-CREOL contendo o Acelerador (ao lado esquerdo), Ondulador (ao fundo), o caminho óptico do feixe (tubo na mesa óptica), os Dipolos (amarelos) e os Quadrupolos (verdes).

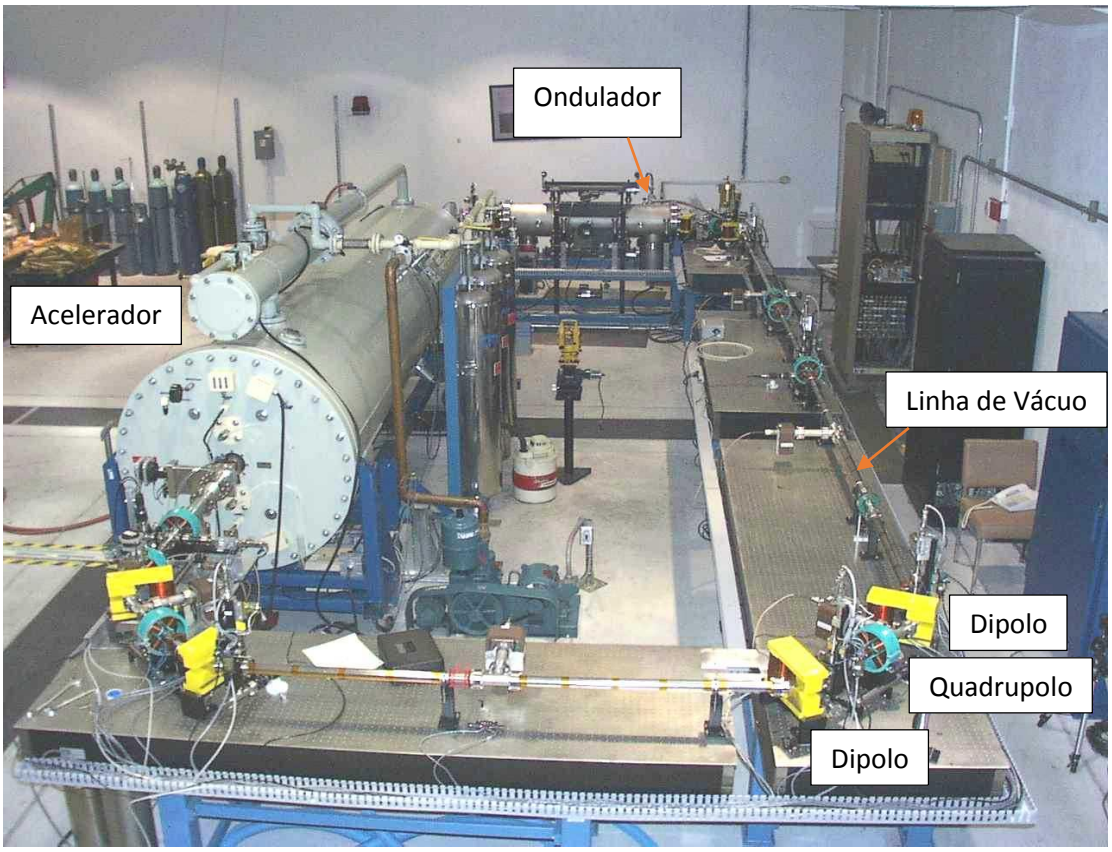

Figura 8 – Laser instalado na CREOL. À esquerda o Acelerador Tandem, os Dipolos em amarelo, Quadrupolos em verde e Ondulador ao fundo (Fotografia obtida nos arquivos do FEL-CREOL).

Para o estudo, documentação e posterior projeto do novo laser, o FEL-CREOL teve seus componentes operacionais divididos em sistemas, que estão listados a seguir:

- **Sistema de aceleração**: Este sistema é responsável pelos processos relacionados com a emissão e as propriedades do feixe eletrônico que será injetado no Ondulador.

- **Sistema de vácuo**: Compreende os transdutores e dispositivos de vácuo necessários para aumentar o livre caminho médio do feixe eletrônico e minimizar a perda energética dos elétrons ao trafegar o caminho óptico na linha de vácuo.

- **Sistema de transporte do feixe eletrônico**: É o conjunto de transdutores eletromagnéticos de transporte do feixe, utilizados para a colimação e direcionamento do feixe eletrônico no caminho óptico.

- **Sistema de emissão laser**: Composto pelo Ondulador sendo responsável pelos processos relacionados com a geração e extração da radiação eletromagnética coerente e colimada do FEL.

- **Sistema de Controle**: Responsável pelo controle computacional dos componentes e subsistemas, gerenciando todos os demais sistemas e fornecendo controle destes processos ao usuário. Este sistema é o foco de estudo deste trabalho.

2.2. Sistema de Aceleração

O objetivo deste sistema é produzir um feixe de elétrons estável e com largura de pulso controlável para ser injetado no Ondulador, produzindo a radiação eletromagnética. É composto pelo Acelerador Eletrostático [52], um Canhão de Elétrons e um Coletor de Elétrons.

O laser FEL-CREOL utiliza um acelerador eletrostático do tipo *tandem* modificado [2] fabricado pela *National Electrostatic Corporation of Middleton – NEC*, modelo 5SDH-2, capaz de fornecer diferença de potencial de 1,7MV entre os terminais [53].

O acelerador do tipo *tandem* tem seu princípio de funcionamento similar ao acelerador *Van de Graaff* [54], onde uma correia extrai carga elétrica de uma fonte de alta tensão e transfere para um terminal acumulador de carga. A diferença de potencial entre o terminal acumulador de carga positiva e o terminal aterrado acelera as partículas carregadas. Um aprimoramento na correia de transporte de carga do acelerador *Van de Graaff*, originou o acelerador eletrostático *Tandem* [55].

O acelerador *tandem* consegue obter partículas mais carregadas do que em um acelerador eletrostático *Van de Graaff* convencional, pois possui dois estágios de aceleração. Na entrada do acelerador *Tandem*, íons negativos são acelerados pelo terminal

positivo (terminal central), onde são extraídos elétrons (através de gás ou um filme fino de carbono), e os íons agora positivos, são novamente acelerados para o outro terminal (negativo – terminal mais externo) do *Tandem* e saem do acelerador [56].

Como no laser de elétrons livres serão acelerados elétrons, o acelerador *Tandem* original teve que ser modificado para a utilização no FEL-CREOL. A primeira modificação consistiu em inverter as polaridades dos terminais e acrescentar um canhão e um coletor de elétrons dentro do acelerador. Desta forma, os elétrons são gerados pelo canhão de elétrons, próximo ao terminal negativo (terminal central, neste acelerador) e acelerados para fora do acelerador pelo terminal positivo. Como este acelerador é realimentado, no retorno ao acelerador, os elétrons são invariavelmente desacelerados na entrada e depois são coletados por um coletor de elétrons [2]. Este coletor é multiestágio e foi projetado para recuperar eficientemente (75-80% [2]) os elétrons que chegam ao acelerador. A energia de espalhamento com que os elétrons chegam até o coletor é próxima de 5,45kV [2].

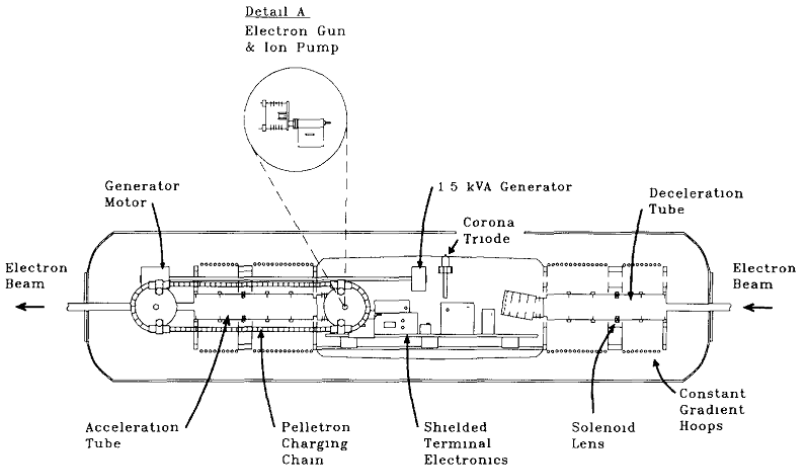

Fig. 2 Modified 1 7 MV electrostatic accelerator.

Figura 9 – Acelerador eletrostático Tandem de 1,7MV utilizado no FEL-CREOL [2].

O Canhão de Elétrons utilizado no FEL-CREOL pode produzir feixe de elétrons de 200mA a 14kV com 1,4mm de raio e emitância de 3,7π mm mrad. Este canhão foi projetado com o auxílio de um software [2](EGUN [57]).

O controle do sistema de aceleração do feixe de elétrons é realizado por um módulo de controle do acelerador, também fabricado pela NEC, que permite alterar as propriedades elétricas do acelerador. Este módulo também permite a operação do canhão de elétrons.

2.3. Sistema de Vácuo

Para a operação do laser de elétrons livres é necessário que o feixe atravesse todo o caminho óptico com a menor perda de energia possível. O caminho óptico é uma tubulação em vácuo por onde o feixe de elétrons irá trafegar guiado pelos Dipolos e Quadrupolos até atingir o Ondulador e retornar ao acelerador. A adoção do sistema de vácuo é fundamental para aumentar o livre caminho médio dos elétrons e reduzir o número de colisões com moléculas de gás, aumentando a eficiência no transporte do feixe eletrônico.

O sistema FEL-CREOL possui um sistema de vácuo com três tipos de bombas diferentes: bomba mecânica rotativa, bomba turbomolecular e bomba iônica.

O sistema de vácuo possui uma bomba rotativa fabricada pela *Edwards* que utiliza um sistema de palhetas rotativas selada a óleo e possui capacidade de vácuo de até 10^{-2} Torr. As bombas turbomoleculares, *Pfeifer* (*HI Pace 80*), são utilizadas para obter vácuo de 10^{-2} – 10^{-10} Torr. Esse tipo de bomba de vácuo se baseia na altíssima rotação de palhetas que direcionam moléculas de gás em direções definidas, permitindo a extração destas moléculas [58].

As bombas iônicas são utilizadas para vácuo de até 10^{-14} Torr e utilizam o efeito da ionização de moléculas para movê-las para superfícies de titânio para então serem absorvidas [58]. O sistema de vácuo do FEL utiliza 13 bombas iônicas distribuídas pela linha de vácuo do feixe de elétrons [59].

As bombas de vácuo são ligadas em sequência de acordo com a capacidade e região de bombeio. O controle destas bombas é realizado mediante o monitoramento do nível de vácuo na linha.

2.4. Sistema de Transporte do Feixe de Elétrons

Este sistema é responsável por conduzir, direcionar e colimar o feixe de elétrons na linha de vácuo permitindo que o feixe eletrônico atravesse o Ondulador em condições de produzir laser. A linha de vácuo é em forma de anel para que o feixe eletrônico possa ser retroalimentado ao sistema. Para direcionar e colimar o feixe de elétrons são utilizados

Dipolos e Quadrupolos. Para realizar ajustes finos na trajetória e na colimação do feixe de elétrons são utilizados Defletores eletromagnéticos, que são solenoides com núcleo de ar dispostos em volta da linha de vácuo.

2.4.1. Dipolos

Estes dispositivos eletromagnéticos são responsáveis por direcionar o feixe de elétrons e são constituídos de solenoides sobre núcleo ferromagnético [28]. Os Dipolos utilizados neste FEL estão representados na Figura 10. O FEL-CREOL possui ao todo 8 Dipolos que estão sendo caracterizados e documentados para avaliar a viabilidade técnica em utilizar estes dispositivos para o novo FEL. Estes Dipolos foram projetados para operar com corrente elétrica de -2,5A até +2,5A, permitindo campo magnético de -100mT até +100mT no entreferro.

Cada Dipolo é responsável por deflexionar o feixe de elétrons em 45 graus na linha de vácuo. Existem dois tipos de polos nos Dipolos deste FEL: Dipolos com polos de base retangular (10 x 5 cm) e Dipolos com polos de base trapezoidal (10 x 8 cm na base maior e 3 cm na base menor). Os polos destes Dipolos são fixos e possuem separação de 3cm (gap, entreferro).

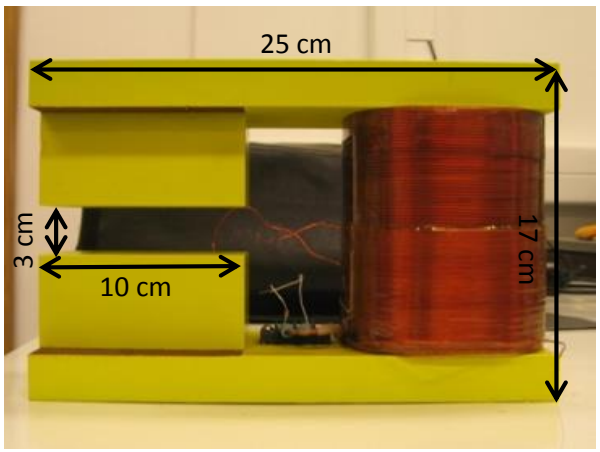

Figura 10 – Dipolo eletromagnético utilizado no FEL-CREOL.

2.4.2. Quadrupolos

São os dispositivos responsáveis por manter o feixe de elétrons colimado. Possuem quatro polos idênticos formados por solenoides dispostos igualmente espaçados

em volta de um núcleo ferromagnético em forma de anel. Cada Quadrupolo é confeccionado de modo a ter um par de polos em cada eixo, X e Y, conforme a Figura 11 à esquerda. A configuração deste dispositivo permite que o módulo das componentes do campo magnético gerado, B_x e B_y, varie linearmente com a distância do centro do Quadrupolo até os polos. No centro, o campo magnético neste dispositivo é nulo.

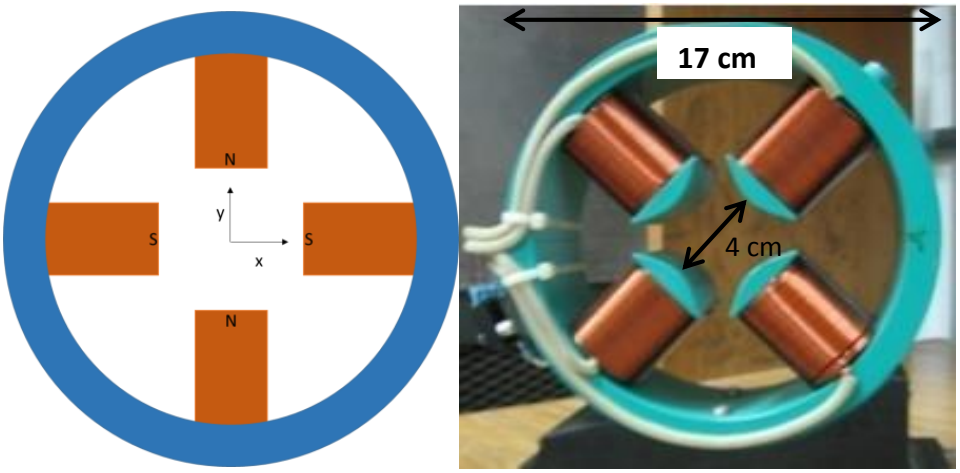

Figura 11 – Quadrupolo eletromagnético. À esquerda a configuração dos solenoides e a direita o Quadrupolo utilizado no FEL-CREOL.

Este dispositivo funciona como uma lente magnética [28]. Quanto mais afastado do centro o elétron estiver (no plano XY do Quadrupolo), mais ação do campo magnético irá sofrer para convergir ou divergir do centro. Para a devida colimação do feixe eletrônico são utilizados dois Quadrupolos (um em seguida do outro), pois o Quadrupolo tende a divergir o feixe de elétrons em um eixo e convergir no outro.

Existem 11 Quadrupolos no FEL-CREOL que foram projetados para trabalhar com corrente de polarização de 0 a 2,5A e produzem campo magnético de até 55mT na base dos polos [59]. Possuem 17 cm de diâmetro com separação entre os polos de 4 cm e os polos possuem base de 6,5 cm por 3 cm. Estes dispositivos também estão sendo caracterizados, documentados e avaliados para aproveitamento no novo FEL.

2.4.3. Monitores do Feixe de Elétrons

O monitoramento do estado do alinhamento e da colimação do feixe de elétrons é realizado pelos dispositivos denominados de Monitores do feixe de elétrons. Nestes dispositivos, o feixe de elétrons é interrompido momentaneamente por uma tela

fluorescente e a imagem produzida pela interação dos elétrons com esta tela pode ser visualizada por uma câmera CCD.

Os monitores do feixe possuem um sistema pneumático para automatizar o processo de verificação do alinhamento do feixe. Este sistema possui uma haste com a tela fluorescente em uma das extremidades e no meio um orifício para a passagem do feixe eletrônico. Este orifício (2,6mm de diâmetro) foi produzido em um disco de cobre isolado eletricamente da estrutura do monitor e permite o monitoramento do feixe eletrônico através da corrente elétrica induzida pela passagem do feixe [2].

Existem três configurações possíveis para a haste do monitor do feixe: *up*, *middle e down* que representam a posição vertical desta haste. A posição *up* é definida quando a haste está completamente fora do caminho óptico (Figura 12-a), na posição *midlle* a tela fluorescente interrompe a passagem do feixe (Figura 12-b) tornando possível o monitoramento do alinhamento e colimação do feixe pela câmera, instalada abaixo do monitor e a posição *down* permite a passagem do feixe de elétrons através do orifício no disco de cobre da haste (Figura 12-c), permitindo o monitoramento do feixe através da corrente elétrica induzida pela passagem do feixe eletrônico.

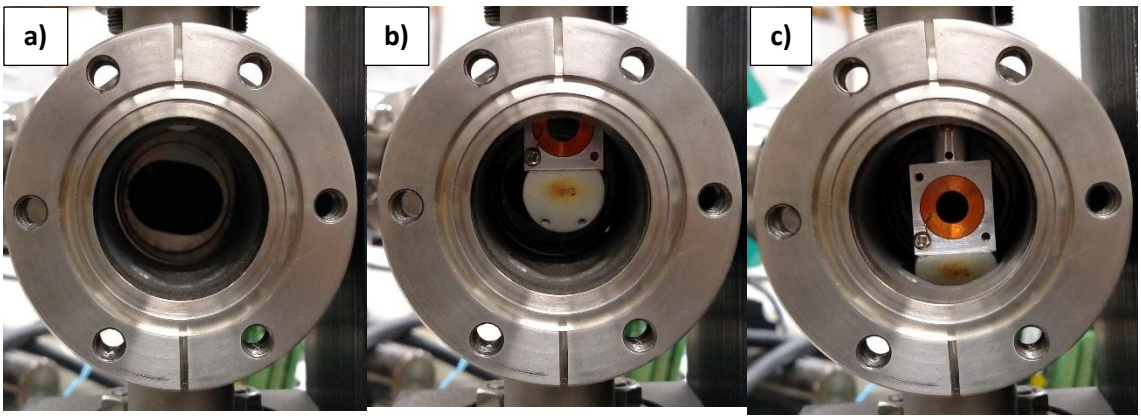

Figura 12 – Posições da haste do monitor do feixe visualizadas no sentido da trajetória do feixe. a) *Up,* b) *Middle e* c) *Down*.

O controle destas posições é realizado por uma válvula pneumática e um atuador eletromagnético (Figura 13). Estes dispositivos também possuem um sensor de posição magnético da haste, localizado na parte externa superior do Monitor do Feixe.

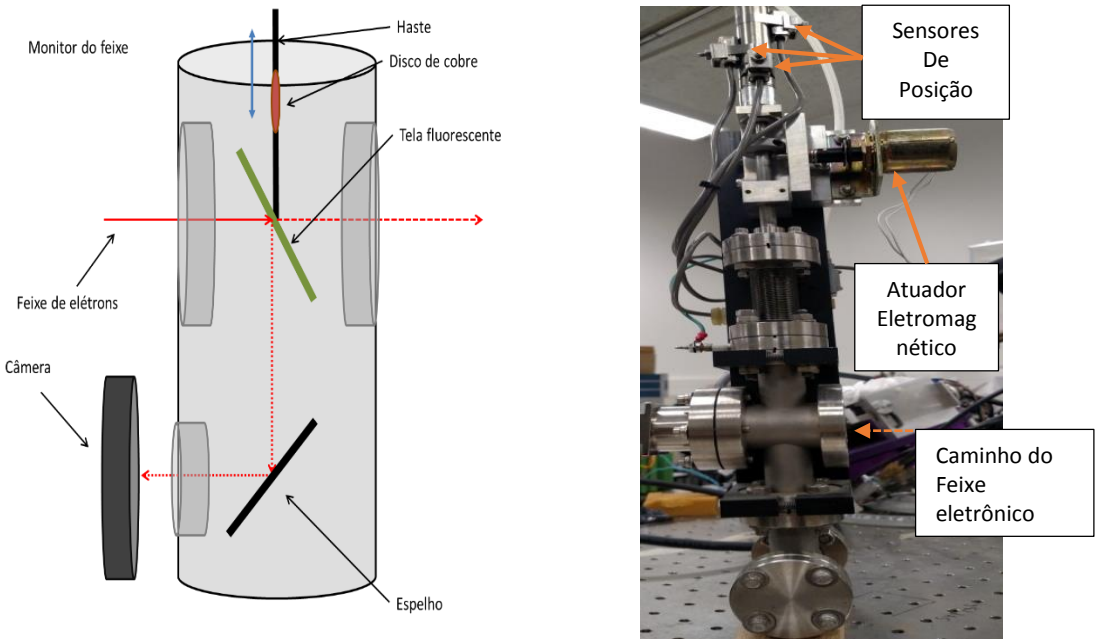

Figura 13 – Monitor do feixe utilizado para o alinhamento do feixe de elétrons. À esquerda a vista lateral interna desenhada e a direita uma foto real do dispositivo.

2.4.4. Torre de Potência

Este sistema é composto por 51 fontes de corrente alimentadas por quatro fontes de tensão trifásica. Estas fontes estão alojadas em um rack dotado de ventilação forçada denominado **Torre de Potência**. A Torre de potência possui 6 módulos independentes que são energizados pelas fontes de tensão trifásica. Cada módulo possui proteção elétrica efetivada por disjuntores e fusíveis localizados na parte interna do rack e possuem controle elétrico realizado por relés eletromagnéticos. Estes módulos são responsáveis por direcionar as conexões elétricas de controle e monitoramento às fontes de corrente e direcionar potência aos transdutores eletromagnéticos de transporte do feixe eletrônico. Cada módulo pode suprir eletricamente até 10 fontes de corrente simultaneamente.

As fontes de corrente (Figura 14) são utilizadas para fornecer potência elétrica para a polarização dos transdutores eletromagnéticos do caminho óptico do feixe de elétrons. Estas fontes são alimentadas com tensão de +15V e -15V e podem fornecer corrente de ±3A cada uma. São controladas por tensão (-10V – +10V) e oferecem um sinal de monitoramento (-10V – +10V) da corrente elétrica que é aplicada aos transdutores eletromagnéticos. Estas fontes são confeccionadas em formato de cartão para

serem inseridas aos módulos da Torre de Potência sem conexões por cabos elétricos, facilitando as conexões elétricas e o diagnóstico.

Figura 14 – Fonte de corrente bipolar utilizada na Torre de Potência.

2.5. Sistema de Emissão Laser

Com o objetivo de produzir radiação eletromagnética coerente é utilizado o Ondulador magnético disposto em uma cavidade ressoante. Este dispositivo de inserção é construído de forma que o feixe de elétrons atravesse uma região de campo magnético periódico cuidadosamente projetada.

Na Tabela 2 são apresentadas as características do Ondulador original projetado para o FEL-CREOL. A estrutura deste Ondulador é de alumínio e foi utilizado a configuração *Hybrid* com magnetos permanentes de **NdFeB** separados por placas de metal (vanádio-permadur [2]) na construção. Este Ondulador pode ser visualizado na Figura 15, onde é possível notar que os cassetes do Ondulador, onde os magnetos são afixados, estão dispostos em um cilindro hermético mantido em vácuo.

Tabela 2 – Características do Ondulador projetado [51, 2, 59].

Comprimento de onda (λ_u)	8 mm
Número de períodos	185
Comprimento do Ondulador	1.486 mm
Gap	6 mm
Amplitude do campo magnético (B_0)	0.2 T
Erro do campo magnético	0.2 %
Magnetos	NdFeB NeoMax 33SH
Dimensões dos magnetos	2,7x13 x30 mm
Campo magnético remanente do magneto	1.17 T
Material entreferro	Vanádio-Permadur
Dimensões entreferro	1,28x28x25 mm

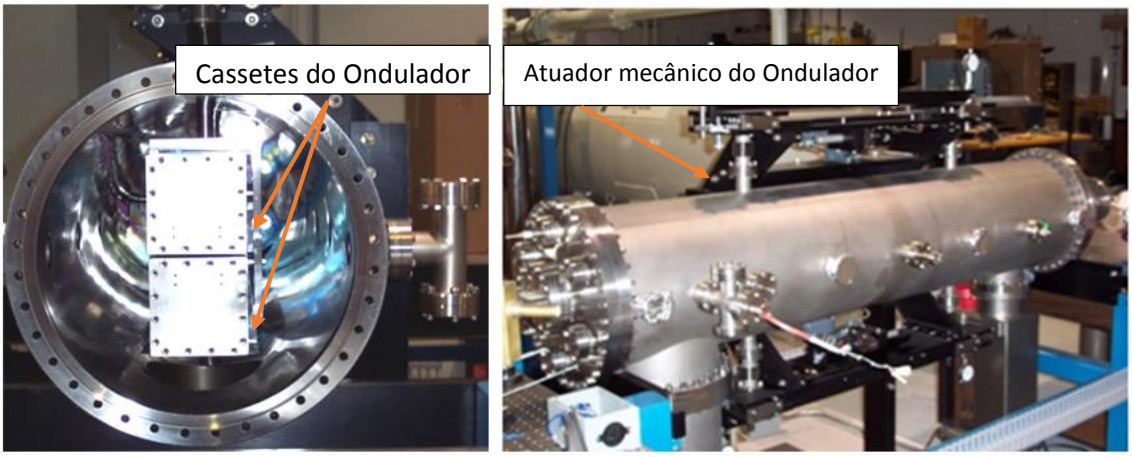

Figura 15 – À esquerda: Vista do interior do Ondulador aberto, é possível visualizar os cassetes que contém os magnetos. À direita: Ondulador fechado, vista lateral (arquivos FEL-CREOL).

Detalhes de um dos cassetes do Ondulador aberto, expondo os magnetos, pode ser visto na Figura 16. É possível observar orifícios nas laterais destes cassetes, onde estão inseridos parafusos de ajustes do entreferro do Ondulador. Estes parafusos são utilizados para alterar a posição vertical dos entreferros, definindo o campo magnético resultante da configuração do Ondulador. Os magnetos são afixados aos cassetes e não permitem ajustes de posição.

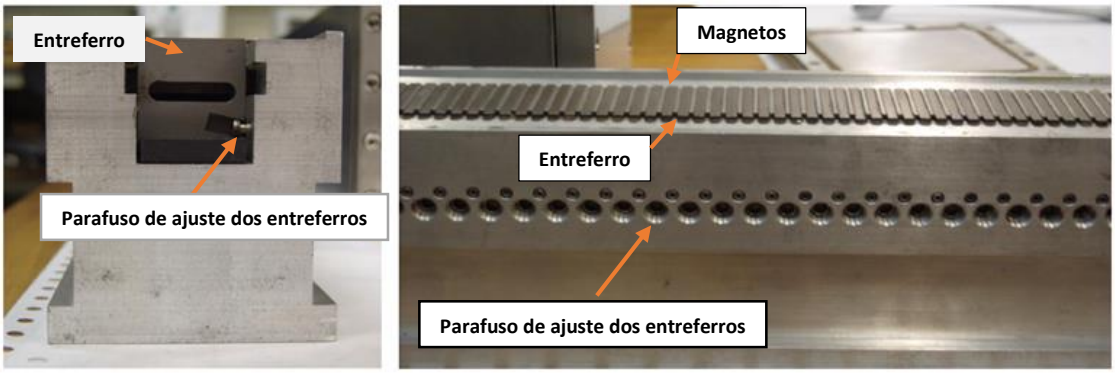

Figura 16 – Cassete do Ondulador, à esquerda a vista frontal e à direita a vista da superfície.

Na Figura 17 está representado o espelho utilizado para a cavidade ressoante do laser. Como o Ondulador emite radiação no infravermelho, o espelho é confeccionado em cobre, pois este material possui a refletância desejada para esta faixa de comprimento de onda.

Figura 17 – Extremidade de um dos lados do cilindro hermético, expondo um dos espelhos da cavidade ressoante.

A caracterização, estudo numérico e a análise deste Ondulador foram temas de outros trabalhos [29, 59].

2.6. Sistema de Controle

Este sistema foi projetado utilizando uma arquitetura computacional distribuída em uma rede privada, sendo composto por dispositivos de hardware e algoritmos utilizados para o controle dos processos do laser. Utiliza a plataforma de hardware CAMAC e computadores industriais para interconectar os módulos, instrumentos e interfaces de controle.

Existem dois computadores servidores neste sistema, que são denominados: *Thunder* e *Droplet*. O *Thunder* é o servidor principal do sistema e possui módulos Conversor Analógico Digital (*Analog to Digital Converter* – ADC), Conversor Digital Analógico (*Digital to Analog Converter* – DAC), Conversor Digital de Entrada e Saída (*Digital Input Output* – DIO) e uma interface GPIB (*General Purpose Interface Bus*) instaladas no barramento ISA (*Industry Standard Architeture*). Este computador é conectado ao CAMAC pelo barramento GPIB e é responsável pelos processos de controle e processamento de dados do laser. O *Droplet* é responsável pelo sistema de diagnóstico e é conectado a um display de led e a um sistema de som para notificação e alarmes.

O CAMAC possui módulos ADC e DAC utilizados para monitorar e controlar a corrente elétrica nos Dipolos e Quadrupolos através do sistema de condicionamento de sinal (Torre de Potência) descrito na seção 2.4.4. O controle destes dispositivos eletromagnéticos se dá através de um sinal de referência (-10V – +10V) providenciado pelo DAC e convertido proporcionalmente em corrente elétrica (-2,5A – +2,5A), pela Torre de Potência, aplicada aos transdutores eletromagnéticos. O monitoramento da corrente elétrica aplicada é fornecido pela Torre de Potência com um sinal elétrico (-10V – +10V) lido pelo ADC proporcional à corrente elétrica aplicada. O CAMAC também possui módulos de relés utilizados para o controle dos Monitores do Feixe de Elétrons.

A plataforma CAMAC utilizada, *BiRa Systems* modelo 6700-SCB, possui 700W de potência [60]. Este chassi possui instalado os seguintes módulos e controladora:

- **Controladora** GPIB *crate controller* modelo 3988 *Kinetic Systems* [61].
- ***Switches*** – Dois módulos de relés com 16 relés cada uma, modelo 3303 *BiRa Systems*.
    - Utilizados para o controle dos monitores do feixe.
- **ADC** – Dois módulos com 32 canais de 16 bits modelo 3516 *Kinetic Systems* [62] com tempo de atualização por canal de 250µS.
    - Utilizadas para o monitoramento da corrente elétrica aplicada aos transdutores magnéticos do caminho óptico do feixe de elétrons.
- **DAC** – Dois módulos com 32 canais de 16 bits modelo 648V *Hytec Eletronics* [63] com tempo de atualização de 200mS.
    - Utilizadas para o controle da corrente elétrica aplicada aos transdutores magnéticos do caminho óptico do feixe.

O computador servidor *Thunder* utiliza o processador Pentium III, possui 256MB de memória RAM e apresenta os seguintes módulos e interfaces instalados:

- Interface **GPIB/ISA** *National Instruments* [64].
    - Utilizada para comunicação com instrumentos e plataforma de Hardware CAMAC.
- **DIO** – PC-DIO96 com 96 canais digitais de entrada e saída da *National Instruments* [65].
    - Utilizada para auxiliar no controle e realizar o monitoramento dos estados dos monitores do feixe de elétrons.
- **ADC** – A1216E fabricada pela *ACCES* [66] com 8 entradas diferenciais (ou 16 simples), 12 bits de resolução e velocidade de aquisição de 120K amostras por segundo.
    - Utilizado para o monitoramento do controle dos motores e servos mecânicos do Ondulador.

- **DAC –** D/A12-16(8) fabricada pela *ACCES* [67] com 8 saídas diferenciais (ou 16 simples), 12 bits de resolução e tempo de resposta por canal de 8µS.
    - Utilizado para o controle dos motores e servos mecânicos do Ondulador.
- Módulo de expansão **ISA PTRC-AT** fabricada pela *ACCES* [68].
    - Módulo para expandir o número de slots ISA disponíveis.

Na Figura 18 é apresentada uma visão em blocos deste sistema de controle FEL-CREOL e no **Anexo – A** é possível verificar um diagrama detalhado.

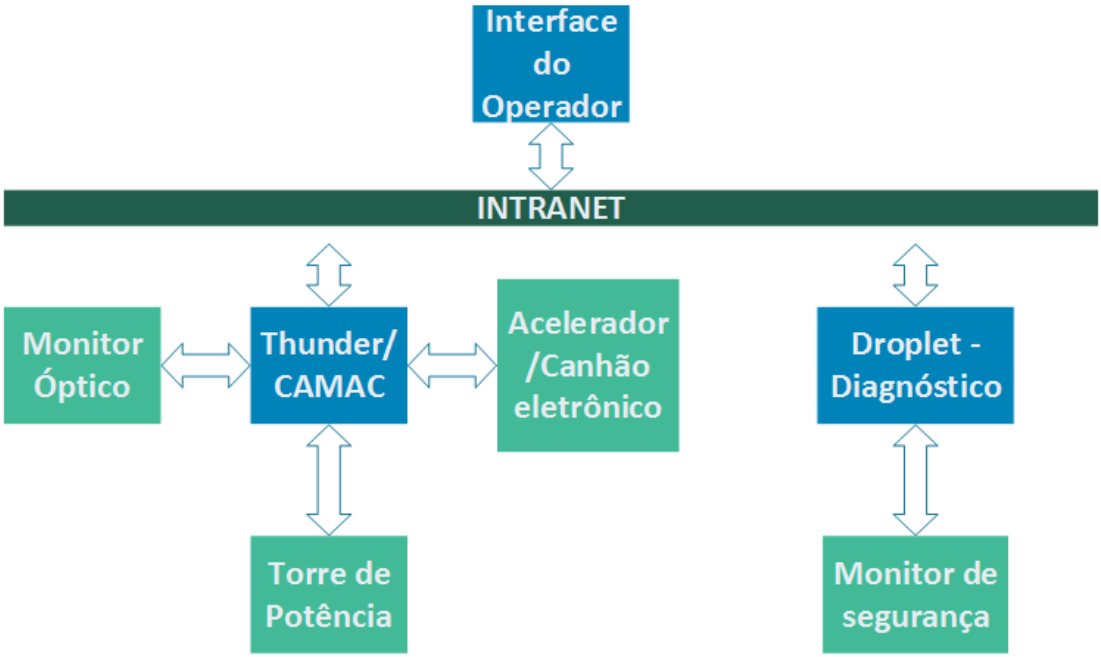

Figura 18 – Diagrama do sistema de controle CREOL.

2.6.1. Programas Servidores

O servidor *Thunder* possui instalado um sistema operacional (*Slackware*) e um conjunto de aplicativos compilados em C/C++ exclusivos para a operação do laser. Estes softwares são baseados na arquitetura cliente-servidor, onde vários programas servidores monitoram e controlam o hardware de acordo com as informações presentes em um banco de dados. Estes programas servidores estão listados a seguir:

- ***CCS (Cohesive Control System) server***

  É o programa servidor principal do sistema CREOL, que atua diretamente no arquivo do banco de dados do sistema localizando, escrevendo e lendo registros com os parâmetros de controle e monitoramento do laser.

- ***Pcaio server***

  Servidor de hardware responsável por ler a tensão em todos os canais da interface ADC/ISA instalada no *Thunder* (endereço de hardware: 0x300[3]) e escrever a informação dos canais no banco de dados do sistema de controle.

- ***Pcaob server***

  Servidor de hardware responsável por aplicar tensão a todos os canais da interface DAC/ISA instalada no *Thunder* (endereço de hardware: 0x320).

- ***Daqserv server***

  Servidor de hardware responsável por ler e enviar informações da interface digital PC-DIO96 (endereço de hardware: 0x280) instalada no *Thunder*.

- ***Camacserv server***

  Servidor de hardware responsável por ler e enviar informações à controladora CAMAC (e a todos os módulos instalados no CAMAC) através da interface GPIB.

- ***Apperture server***

  Servidor de hardware que lê e escreve no banco de dados informações que devem ser lidas ou escritas pelo *camacserv server* relativas aos Monitores do Feixe de Elétrons.

- ***Giptalk server***

  Servidor de hardware utilizado para comunicação com o módulo do acelerador do sistema de aceleração do feixe de elétrons.

- ***Terminal massage server***

  Servidor de hardware responsável por controlar e monitorar a emissão de elétrons pelo canhão de elétrons do sistema de aceleração do feixe eletrônico.

Alguns destes softwares fundamentais para a operação do laser não possuem documentação, código fonte disponível ou não são recompiláveis, prejudicando a compreensão dos processos envolvidos e a adaptação deste sistema a novos projetos.

[3] Os números precedidos por 0x representam um número no formato hexadecimal. Esta convenção será adotada no restante do trabalho.

2.6.2. Painel de Operação

O computador que foi utilizado para o usuário operar o laser (*Human Machine Interface* – HMI) no FEL-CREOL não está disponível para analisar os componentes e os programas instalados, entretanto estão disponíveis arquivos de backup desta máquina. Este computador possuía instalado o Windows 98 como sistema operacional e um programa desenvolvido com a linguagem de programação *delphi* para o controle do laser. O programa cliente lê e escreve no banco de dados do sistema de controle via rede, disponibiliza as informações na tela e fornece meios para que o usuário possa operar os elementos de controle do laser através de elementos gráficos associados aos dispositivos físicos de controle. Na Figura 19 está apresentado o antigo Sistema de Controle do FEL-CREOL. À esquerda da imagem está o rack que contém o computador industrial *Thunder* e a plataforma de hardware CAMAC utilizada para o controle do transporte do feixe eletrônico.

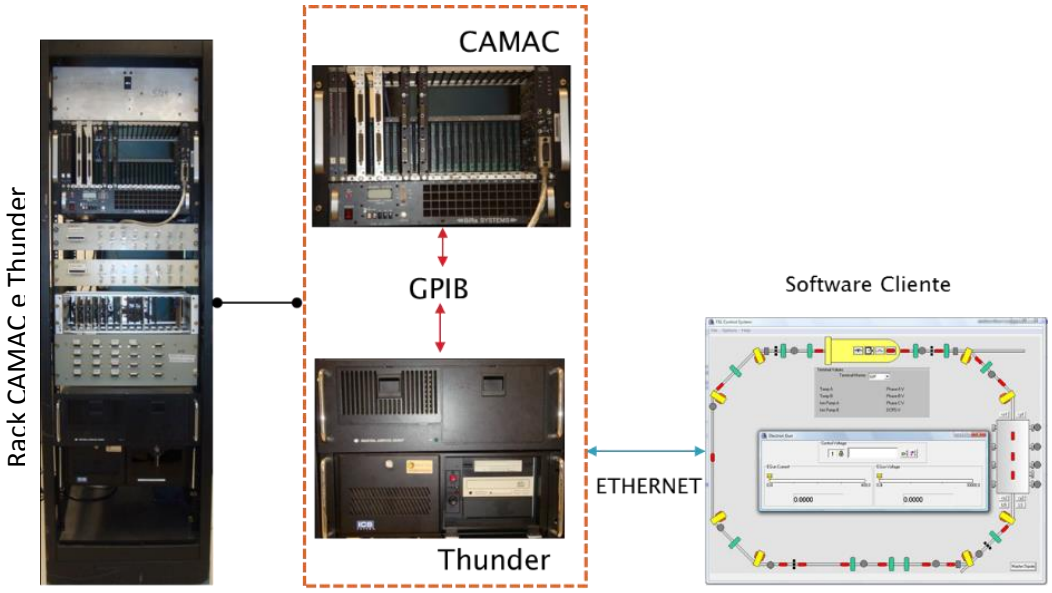

Figura 19 – À esquerda o rack contendo a plataforma CAMAC, os terminais de conexão e o computador Thunder e à direita o Painel de Operação FEL-CREOL.

2.6.3. Limitações do Sistema de Controle

O Sistema de Controle CREOL dificulta atualizações de hardware e de software por ser um sistema de concepção limitada. A plataforma de hardware utilizada CAMAC, o barramento ISA e os sistemas operacionais (*Slackware Linux*, kernel 2.0.34 e Windows

98), possuem pouca disponibilidade no mercado atualmente. A documentação deste sistema é insuficiente para compreender todos os processos de controle envolvidos. O conjunto destes fatores prejudicam a implementação de novos recursos, atualização e adaptação a novos projetos.

O desenvolvendo de um novo sistema de controle, baseado na arquitetura do antigo sistema, garante a liberdade para substituir módulos de hardware e desenvolver novos softwares. A documentação e a caracterização dos componentes deste laser são imprescindíveis para a evolução e continuidade de projetos relacionados.

3. *Projeto e Desenvolvimento*

O sistema de controle é um dos componentes do novo laser que não será reaproveitado do projeto inicial FEL-CREOL devido a sua obsolescência, difícil manutenção e falta de documentação. Nesta etapa da construção deste novo laser foi definido quais serão as características da implementação e da arquitetura deste novo sistema. O software foi projetado com base na arquitetura SCADA e foi programado utilizando a linguagem de programação gráfica LabVIEW.

3.1. Descrição física

O sistema FEL-CREOL, que inspira esta arquitetura é originalmente baseado na plataforma CAMAC, conforme descrito na seção 2.6. Esta plataforma foi muito utilizada no controle de sistemas de Física de Partículas, mas é pouco utilizada atualmente. Para a plataforma de hardware do novo projeto do laser, optou-se por utilizar o padrão PXI devido à disponibilidade no mercado, escalabilidade, documentação e facilidade de operação.

Neste trabalho foi implementado o controle do Sistema de transporte do feixe de elétrons utilizando os componentes de transporte do feixe eletrônico originalmente implementados no FEL-CREOL, como os Dipolos, Quadrupolos e a Torre de Potência que foram descritos na seção 2.4.

3.1.1. Plataforma de Hardware

Neste projeto foi utilizado a plataforma de hardware PXI, que consiste em um aprimoramento do barramento PCI (utilizado em computadores convencionais – IBM/PC) voltado para instrumentação. Este barramento foi desenvolvido para manter compatibilidade e apresentar desempenho superior ao alcançado por computadores convencionais com foco em medição e automação. Esta plataforma é dividida em três partes: Chassi, Controladora e Módulos.

O **chassi** compreende a estrutura física da plataforma, composto por fontes de alimentação, gabinete e um *backplane*, que consiste em um conjunto de conectores e barramentos de comunicação utilizados para a instalação dos módulos e da controladora da plataforma. O chassi PXI utilizado é fabricado pela *Geotest* (GEOTEST 7100A [69]), em que é possível utilizar até 6 módulos PXI 6U[4] (10,5 pol. – 26,67cm) e 7 módulos PXI compactos 3U (5,25 pol. – 13,34cm), com uma controladora 6U.

Este chassi possui uma unidade de disco DVD-RW e um disco rígido de 160 Gigabytes embutidos para acesso direto pela controladora embarcada, uma fonte de alimentação de 560W, sensores de temperatura e sistema de ventilação forçada. Na parte traseira há conexão de uma porta RJ-45 Ethernet e USB.

A **controladora** é a unidade de controle da plataforma PXI utilizada para integrar os módulos da plataforma e permitir acesso externo através de protocolos de comunicação. A controladora utilizada neste projeto é embarcada, de alto desempenho (Geotest – GX7924 *Controller* [70]), utilizada também para o gerenciamento dos processos de controle do laser e que possui um processador Core2Duo, 2GB de memória RAM e 3 portas Gigabit Ethernet.

A vantagem em possuir uma controladora modular e embarcada é a compactação do sistema e a facilidade de atualização da unidade de processamento sem a necessidade de alterar o chassi e os outros módulos de hardware instalados.

Tabela 3 – Especificações da controladora

Processador	Intel Core 2 Duo T7400 2,16GHz
Ethernet	3 portas Gigabit (2 frontais e 1 redirecionada para o chassi)
USB	3 portas USB 2.0 (2 frontais e 1 redirecionada para o chassi)
Memória RAM	2GB DDR2 expansível até 4GB
Chipset	E7520, 6300ESB
***Onboard* interfaces**	• **SATA** • CompactFlash II
Funções supervisórias e relógios	• Monitor de temperatura • Controle de velocidade dos coolers de ventilação • **RTC** (***R**eal **T**ime **C**lock*)

[4] Esta nomenclatura se refere a medida da largura frontal da interface em múltiplos de uma unidade padrão na informática (**U**). Cada **U** equivale a 1,75 polegadas [84].

Os **módulos** são dispositivos de hardware padronizados para a plataforma e acessíveis ao software do Sistema de Controle pela Controladora. Atualmente existem mais de 450 tipos de módulos para o barramento PXI [71]. Estes módulos normalmente são conversores de sinal, instrumentos e interfaces de comunicação. No chassi PXI utilizado estão instalados três módulos (DAC, ADC e DIO). Na Figura 20 é apresentado um diagrama em blocos da plataforma PXI com os módulos utilizados.

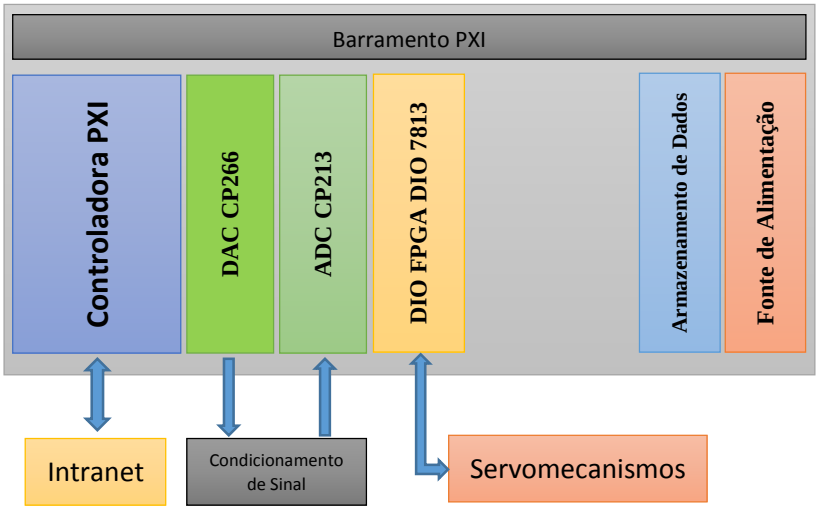

Figura 20 – Diagrama de blocos do sistema PXI utilizado.

- ***Módulo PXI DAC CP266***

Módulo Conversor Digital Analógico *(*DAC – *Digital to Analog Converter)* que possui 64 canais com precisão de ± 1mV, resolução de 16 bits e tempo de atualização dos sinais de saída de 2ms. Os sinais elétricos de saída são diferenciais, fornecendo dois fios para cada canal disponibilizados em um conector blindado de 68 pinos SCSI II para cada conjunto de 32 canais (2 conectores para os 64 canais). Esta interface possui um conector de alimentação auxiliar que pode ser utilizado para conexão externa com tensões de ±15V, ±12V e 5V.

Tabela 4 – Especificações técnicas DAC CP266 [72].

Número de Canais	64
Escala do sinal de saída	± 10V, 5mA por canal
Resolução	16 bits
Precisão	1mV máx.
Impedância de saída	0,5 Ohm
Filtro de saída	2 polos Bessel, 500Hz cutoff
Taxa de atualização dos canais (latência)	2,176ms (34µs por canal)

- ***Módulo PXI ADC CP213***

O módulo Conversor Analógico Digital *(*ADC – *Analog to Digital Converter)* instalado no chassi PXI possui 64 canais diferenciais com resolução de 16 bits. A taxa de leitura é determinada pela seleção da frequência de varredura dos canais (0,0000232Hz – 100KHz) selecionável por software. O pulso de disparo (*trigger*) para início da varredura pode ser interno (proveniente do barramento PXI) ou externo (através de um conector no painel da interface).

Esta interface possui ganho programável (1 – 1000) que permite alterar a escala de operação e possui tensão elétrica de referência interna para calibração dos canais. A calibração dos canais também pode ser executada externamente através de um conector LEMO no painel da interface. O conector também pode ser utilizado para medir externamente a tensão de referência interna da interface.

Esta interface também possui um conector de 16 canais digitais de entrada e saída (DIO) para uso geral e um filtro limitador de 1kHz para os sinais analógicos de entrada.

Tabela 5 – Especificações técnicas da interface ADC CP213 [73].

Número de canais	64 diferenciais
Escala do sinal de entrada	± 10V
Proteção de entrada	± 25V
Impedância de entrada	1 MΩ
Acoplamento de entrada	DC
Resolução	16 bits
Ganho / erro na medida	1 / ± (1,2mV + 0,01%) 10 / ± (120µV + 0,01%) 100 / ± (13µV + 0,01%) 1000 / ± (5µV + 0,01%)
Frequência de leitura interna (por canal)	0,0000232Hz – 100kHz

- ***Módulos PXI DIO Compact-RIO PXI-7813***

Este módulo possui 160 canais digitais bidirecionais de entrada e saída (DIO – *Digital Input Output*) e é reconfigurável (RIO – *Reconfigured Input Output*) como entradas, saídas ou contadores de até 40MHz. Esta interface é implementada com tecnologia FPGA (*Field Programmable Gate Array*) que pode ser reconfigurada com o auxílio do LabVIEW. É de alto desempenho e permite o controle de processos que podem

ser programados diretamente na memória interna, aumentando a eficiência e a velocidade na operação dos processos.

Tabela 6 – Especificações técnicas da interface RIO NI PXI-7813R.

Canais bidirecionais	160
Taxa máxima de *clock*	40MHz
Níveis Lógicos	3,3V; 5V
Faixa máxima de tensão de entrada digital	0V – 5V
Faixa máxima de tensão de saída digital	0V – 3,3V @ 5mA (por canal)
Módulo FPGA	Virtex-II 3M

Neste único chassi PXI será substituída a plataforma CAMAC e o computador *Thunder* da Figura 19 com todos os seus módulos e periféricos responsáveis pelo transporte do feixe eletrônico do antigo Sistema de Controle.

Para o transporte do feixe de elétrons será avaliada a utilização da Torre de Potência e dos transdutores eletromagnéticos (Dipolos, Quadrupolos e Defletores) utilizados no FEL-CREOL. Na Figura 21 está esquematizada a estrutura utilizada para o controle do feixe eletrônico neste sistema.

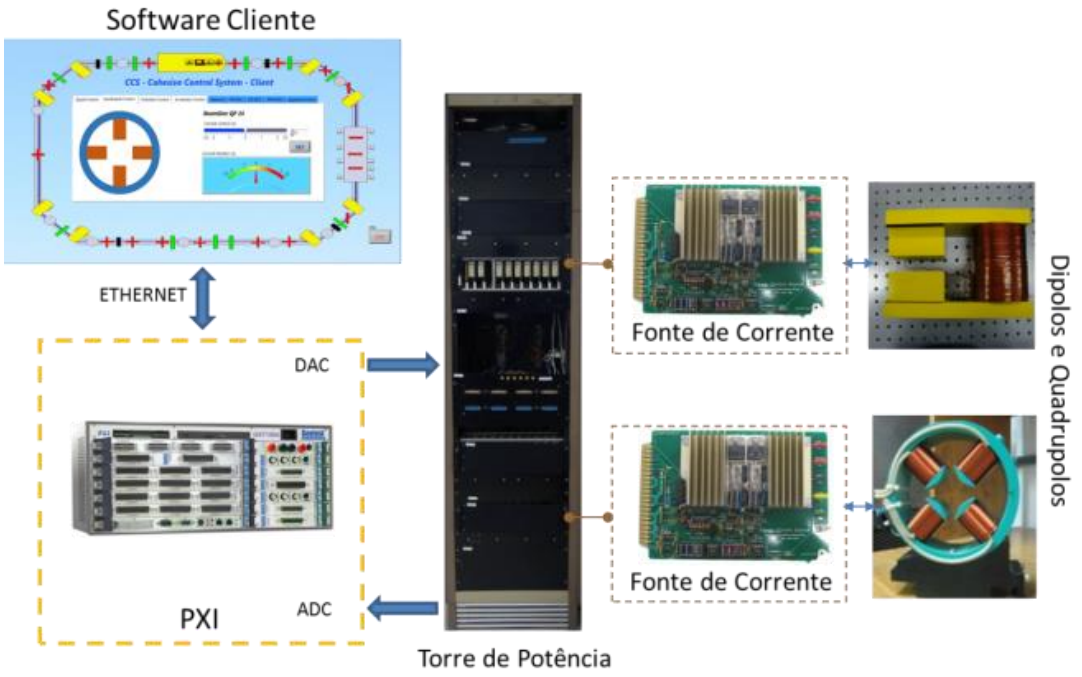

Figura 21 – O Sistema SCADA-FEL controla os Dipolos e Quadrupolos através dos módulos ADC e DAC e Torre de Potência.

3.2. Sistema SCADA-FEL

Para a implementação do novo Sistema de Controle, inspirado no sistema FEL-CREOL, foi desenvolvido um sistema supervisório SCADA com um Banco de Dados modular. O Banco de Dados adotado é baseado em linguagem estruturada SQL (*Structured Query Language*) com o sistema de gerenciamento de banco de dados MySQL. A arquitetura simplificada do sistema SCADA proposto pode ser vista na Figura 22. Neste sistema, a controladora PXI controla os processos relacionados com os módulos de hardware através de programas denominados **Servidores de Hardware** com as informações obtidas no **Banco de Dados** que são acessadas através de um programa **Servidor Principal**.

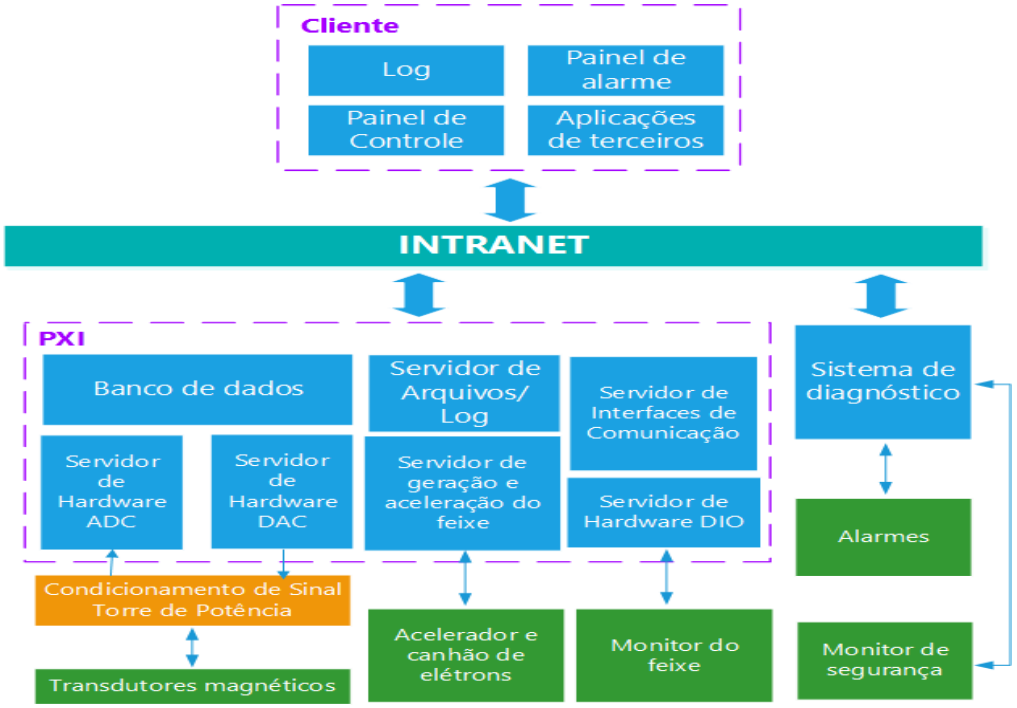

Figura 22 – Esquema simplificado da arquitetura proposta para o SCADA-FEL.

Para a operação das interfaces PXI com o LabVIEW são requeridos a instalação de *drivers* de hardware específicos com suporte ao VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*). VISA é um conjunto de especificações que padronizam a programação de instrumentos e interfaces [74] permitindo que instrumentos de fabricantes diferentes possam ser acessados de maneira semelhante por software.

Para a instalação das interfaces DAC e ADC presentes no chassi PXI com o VISA, foi necessária a utilização de uma ferramenta da *National Instruments* denominada "*VISA Driver Development wizard*". Nesta ferramenta foram especificados alguns valores definidos pelo fabricante da interface (Tabela 7). A instalação das interfaces DIO não necessitou de rotinas especiais, pois todos os drivers necessários foram fornecidos pelo fabricante.

Tabela 7 – Configurações utilizadas para os drivers dos módulos PXI [72, 73].

Campo	CP266	CP213
Manufacturer ID (VID)	0x11F4	0x11F4
Manufacturer Name	"KineticSystems Company, LLC"	"KineticSystems Company, LLC"
Model Code	0x266	0x213
Model Name	"CP266"	"CP213"

3.2.1. Banco de Dados

O Sistema de Controle armazena e disponibiliza todos os parâmetros do laser, como as configurações, curvas de caracterização de transdutores, mensagens de diagnóstico, tabelas e comandos executados em um Banco de Dados. A estrutura dos registros foi inspirada no banco de dados do antigo sistema de controle FEL-CREOL.

O banco de dados FEL-CREOL é baseado em arquivo acessado diretamente pelo servidor principal do sistema (*ccs server*). O novo Banco de Dados utiliza o gerenciador *MySQL* que foi escolhido por ser modular, possuir ampla documentação disponível e exigir poucos recursos de hardware. Este gerenciador também é utilizado no Fermilab [43].

O acesso às informações do Banco de Dados através do *MySQL* é realizado através de uma conexão cliente-servidor via protocolo de transporte *TCP*, da mesma forma que o sistema SCADA desenvolvido está estruturado, o que permite o Banco de Dados ser instalado em outros computadores/sistemas operacionais favorecendo a modularização do conjunto.

A conexão ao Banco de Dados foi implementada utilizando o *LabVIEW* com o *driver* ODBC (*Open Database Connectivity*), que é um protocolo de acesso a

gerenciadores de banco de dados com o objetivo de padronizar os métodos de acesso de maneira semelhante a qual o VISA realiza com hardware.

No **ANEXO – B** é descrito como o Banco de Dados foi desenvolvido e a sua estrutura de registros, bem como o acesso pelo *LabVIEW*. Na Figura 23 são apresentados o diagrama dos elementos do transporte do feixe de elétrons e os *"nomes dos registros"* a que são referenciados no Banco de Dados.

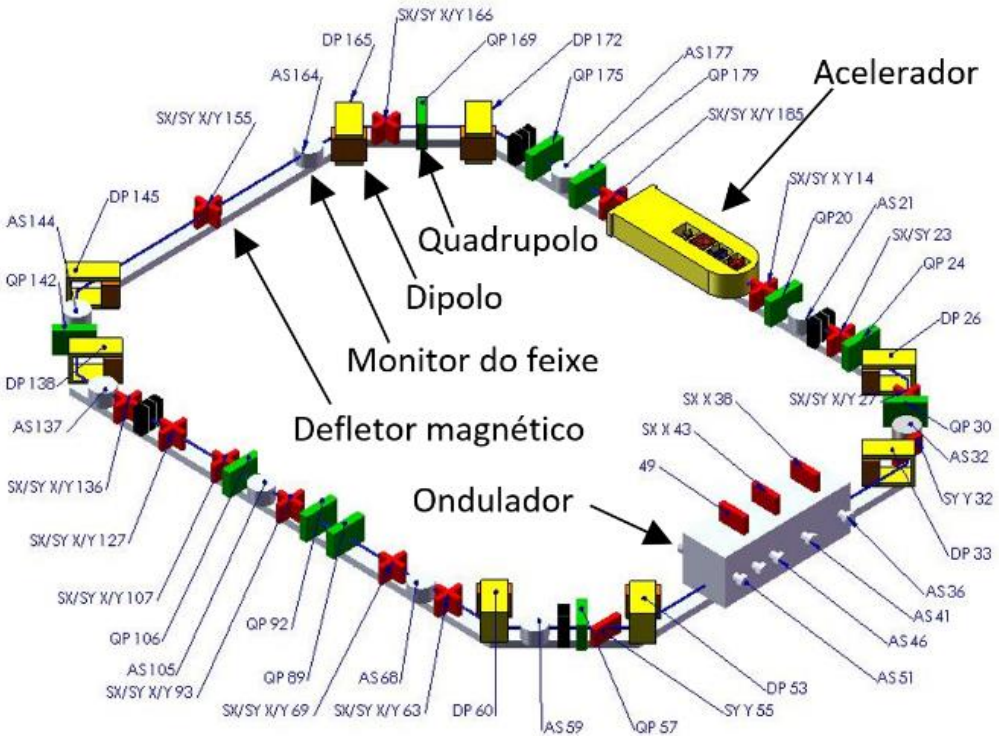

Figura 23 – Diagrama simplificado dos dispositivos principais de controle do feixe eletrônico.

Cada dispositivo do Sistema de Controle possui um registro no Banco de Dados onde são armazenadas as informações de controle e monitoramento. Os programas **Servidores de Hardware** monitoram os registros do Banco de Dados em uma base de tempo pré-definida, localizando alterações nos parâmetros de controle e aplicando estas alterações no dispositivo correspondente. Estes programas também monitoram os dispositivos de hardware identificando alterações e escrevendo estas alterações nos registros do Banco de Dados.

3.2.2. Intranet

A comunicação entre os módulos do sistema SCADA desenvolvido é estabelecida em uma rede local [37] privada e protegida baseada na arquitetura Ethernet, denominada Intranet [45]. Esta arquitetura define o cabeamento, os sinais elétricos utilizados e atribui para cada ponto da rede um endereço físico único, chamado de MAC (*Media Access Control*) [46]. O protocolo Ethernet está localizado na camada de enlace do modelo OSI e na camada física do modelo TCP/IP.

Neste contexto, Intranet se refere a uma rede privada, sem acesso externo, dedicada ao transporte de dados entre os computadores, workstations, servidores de arquivos, Banco de Dados e dispositivos inteligentes do sistema SCADA [45].

3.2.3. Protocolo de Comunicação

O protocolo de comunicação desenvolvido para a comunicação entre os módulos foi inspirado no sistema original do FEL – CREOL [2]. A sintaxe deste protocolo define os pacotes de dados transmitidos no sistema SCADA-FEL pela Intranet.

Todos os pacotes possuem uma sequência de *bytes* contendo um cabeçalho, a mensagem a ser enviada e uma sequência de finalização. No cabeçalho são transmitidas as informações de início do pacote, tamanho e o comando a ser executado pelo programa servidor. A mensagem depende do comando e na finalização são enviados dois *bytes* para verificação de erro e um *byte* de finalização (Figura 24).

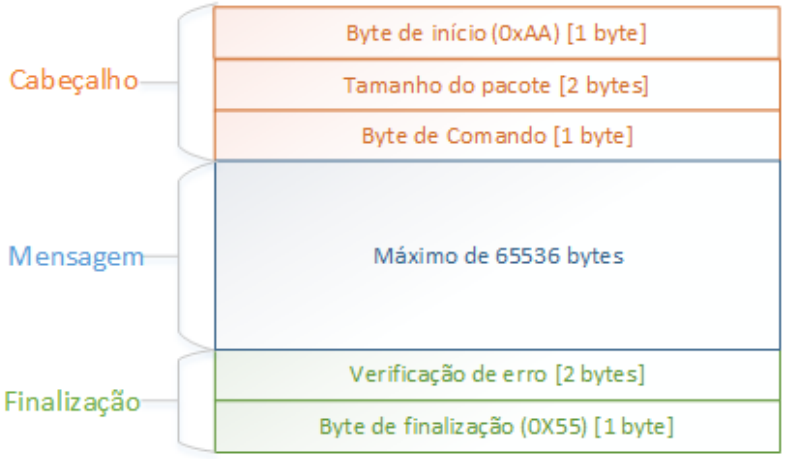

Figura 24 – Estrutura do pacote definido no protocolo de aplicação.

O *byte* de início é definido por ***0xAA*** e o byte de finalização por ***0x55***. O tamanho do pacote é informado por 2 *bytes*, em que o primeiro byte representa o resto da divisão do tamanho do pacote por 256 e o segundo byte é o quociente desta divisão. A verificação do erro ainda não foi completamente definida nesta etapa do trabalho para ser compatível com os programas antigos do FEL-CREOL. Toda vez que algum programa do sistema SCADA recebe algum pacote pela Intranet, procura por estes bytes para verificar se corresponde a um pacote válido, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Composição do cabeçalho e finalização do pacote.

Byte de início		0xAA
Tamanho do pacote	1º Byte	Resto da divisão do tamanho do pacote por 256
	2º Byte	Quociente da divisão do tamanho do pacote por 256
Verificação de erro	1º Byte	Ainda não implementado, utilizando 0x00
	2º Byte	Ainda não implementado, utilizando 0x00
Byte de finalização		0x55

3.2.4. Programa Servidor Principal

O programa servidor principal do sistema SCADA-FEL, *CCS* (*Cohesive Control System*) *server*, foi desenvolvido em LabVIEW e é responsável por estabelecer conexão, receber um comando, executar a tarefa relacionada e retornar a resposta da execução do comando ao programa cliente. Os principais comandos executados pelo servidor são relacionados com leitura e escrita no Banco de Dados do sistema de controle. As informações são recebidas e/ou transmitidas dentro de um mesmo computador ou pela Intranet do sistema SCADA por TCP (*Transmission Control Protocol* – Protocolo de Controle de Transmissão).

Este programa servidor está projetado para executar até 11 comandos diferentes que são necessários para a operação do sistema, estes comandos são recebidos pelo cliente através do protocolo de comunicação estabelecido na seção 3.2.3. O comando a ser executado é determinado por um *byte* de dados de acordo com um código recebido do programa cliente, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Lista de comandos programados no programa servidor do sistema de controle.

Código	Comando
“A”	Salvar o banco de dados em um arquivo no computador servidor
“B”	Carregar o banco de dados de um arquivo no computador servidor

"D"	Finalizar o programa servidor
"G"	Obter "links" de escrita e leitura de um registro no banco de dados
"H"	Associar um "link" de leitura a um registro
"I"	Associar um "link" de escrita a um registro
"R"	Ler os dados de um registro
"W"	Escrever os dados de um registro
"Z"	Diagnóstico: Retorna o mesmo pacote recebido
0x01	Mostrar o tamanho do banco de dados alocado na memória
0x02	Escrever mensagens em um arquivo

Ao executar um comando, o servidor retorna um pacote com a mesma mensagem recebida e no lugar do *byte* de comando um caractere "**S**" se o comando tiver sido executado com sucesso, ou um caractere "**F**" se ocorrer alguma falha na execução. Quando é requisitado um comando de leitura ("**G**" ou "**R**") a mensagem retornada ao cliente contém os dados solicitados.

Se o comando for o de salvar o banco de dados em um arquivo ("**A**"), a mensagem deverá conter o grupo de registros (nomes dos registros, de 21 *bytes*) que serão salvos no início da **mensagem** seguida de um caractere separador "**:**" e o nome do arquivo em que o banco de dados será salvo. Este comando é útil para salvar o estado atual do laser possibilitando diagnóstico ou salvar parâmetros de configurações.

Se o comando for o de carregar o banco de dados de um arquivo salvo no servidor ("**B**"), a mensagem deverá conter apenas o nome do arquivo a ser carregado. Este comando pode ser utilizado para restaurar configurações pré-definidas.

Caso o comando seja o de finalizar o programa ("**D**"), o pacote não precisa ter mensagem, mas precisa ter a finalização. O servidor não retorna nenhuma mensagem neste caso.

Quando o comando requisitado for o de obter "links" de leitura e escrita de um registro ("**G**"), a mensagem deverá conter os 21 *bytes* que identificam o registro no Banco de Dados. O servidor irá retornar o "link" de leitura de 21 *bytes* e depois o "link" de escrita, cada registro é finalizado por um byte "**0x00**" na mensagem do pacote de retorno.

Se o comando for o de associar um link de leitura ou escrita a um registro ("**H**"), a mensagem deverá conter os 21 *bytes* iniciais contendo os caracteres que identificam o registro no Banco de Dados e logo em seguida 21 bytes com o link de leitura ou escrita.

Os "links" são uteis para conectar registros com nomes diferentes mas correlacionados, por exemplo: É interessante associar um "*link*" de um registro com nome de fácil localização no hardware, como "**PXI_ADC_01**" que representa a leitura do canal 01 do **ADC** instalado no **PXI**, com o nome do registro do dispositivo transdutor correspondente, localizado na linha de vácuo do feixe, como **DP138_m**, que representa o registro de monitoramento da corrente elétrica aplicada ao Dipolo 138, conforme Figura 23, na seção 3.2.1. Desta forma, os registros **PXI_ADC_01** e **DP138_m** representam elementos de monitoramento relacionados e o link conecta o elemento de hardware com o dispositivo de controle correspondente.

Os "*links*" também permitem fazer conversões de valores entre os registros, por exemplo: o sinal de monitoramento armazenado no registro **PXI_ADC_01** corresponde ao intervalo de -10 – +10 que está associado com a leitura da tensão elétrica de referência providenciada pela Torre de Potência e representa a corrente elétrica de -2,5A – +2,5A aplicado ao Dipolo 138 armazenada no registro **DP138_m** através das conversões necessárias, mais informações sobre estes processos de conversão podem ser visualizadas no **ANEXO – B**.

Se o comando for o de leitura no registro ("**R**") o primeiro byte da mensagem deve especificar a quantidade de registros que serão lidos, em seguida, deverão vir os nomes de 21 *bytes* que definem o registro ou seus "links" de leitura, um após o outro respeitando a quantidade de registros informados pelo primeiro *byte* da mensagem, conforme Figura 25.

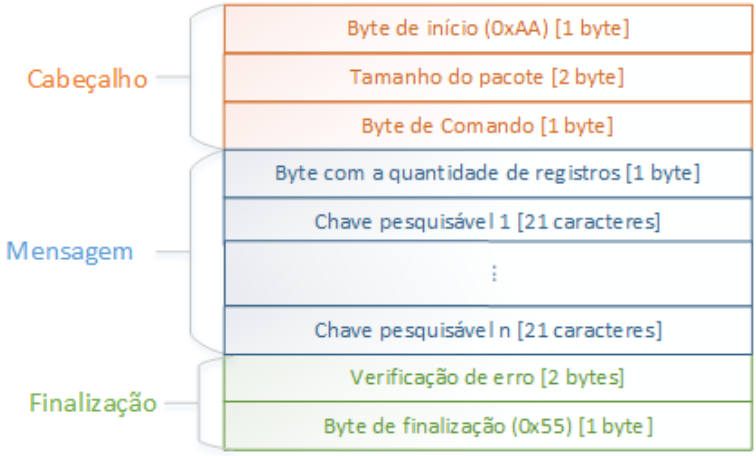

Figura 25 – Formato do pacote utilizado para requisição de leitura entre os módulos do sistema SCADA-FEL.

O programa servidor retornará um pacote contendo na mensagem um *byte* com a quantidade de registros enviados, uma sequência de registros contendo a chave do registro (21 *bytes*) e os dados disponíveis no banco de dados (129 bytes) e a informação de quando este registro foi atualizado no banco de dados (4 *bytes*), conforme representado na Figura 26.

Se o comando for de escrita ("**W**"), a mensagem deverá conter no início a quantidade de registros que serão atualizados e uma sequência com os 21 *bytes* referente ao nome do registro seguido pelos dados do registro, de 129 caracteres.

Se o comando for um comando de diagnóstico ("**Z**"), o servidor irá retornar o mesmo pacote recebido. Isto é útil para a verificação de conexão entre o servidor e o cliente e pode ser implementada no Sistema de Diagnóstico para que este teste possa ser executado constantemente quando o sistema estiver ocioso, afim de verificar problemas de conexão.

Caso o comando for de escrita de uma mensagem em um arquivo (**0x02**), a mensagem deve conter o nome do arquivo e a mensagem a ser gravada separada pelo caractere "**:**". Este comando serve para que o servidor armazene informações, como alguma configuração ou algum erro e pode ser utilizado para diagnóstico futuro.

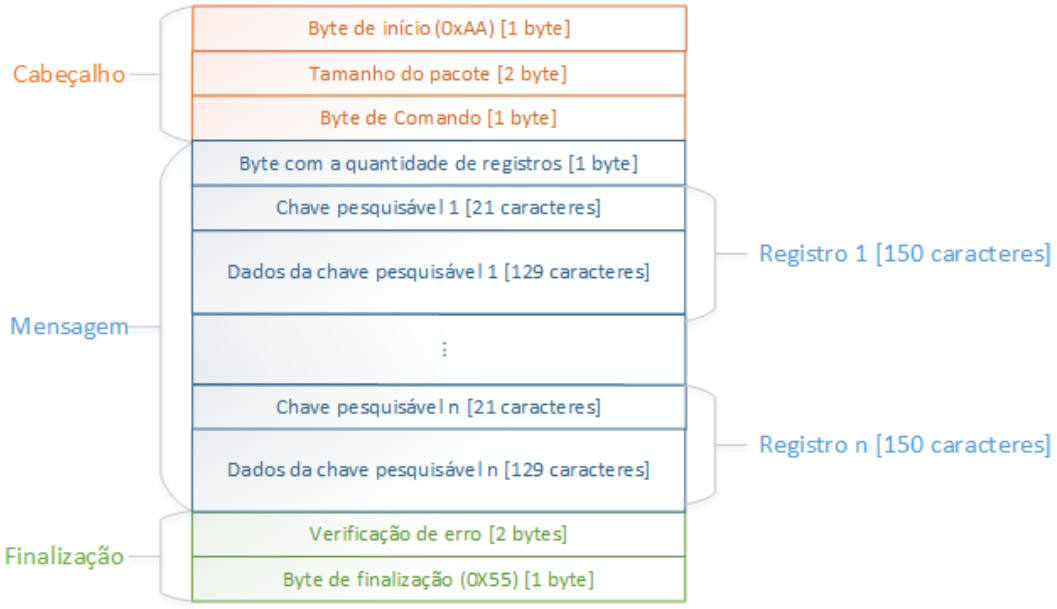

Figura 26 – Formato do pacote de resposta do servidor para um pedido de leitura válido.

Este programa servidor aguarda indefinidamente por uma conexão TCP pela porta **16056**. Quando recebe um pacote válido, executa o comando requisitado e retorna ao programa cliente uma mensagem de confirmação de recebimento.

Para o envio de comandos ao servidor principal com o LabVIEW e através do protocolo de comunicação descrito foi desenvolvido uma rotina que pode ser visualizada no **ANEXO – D**.

3.2.5. Programa Servidor de Hardware

Os servidores de hardware são programas responsáveis por acessar o banco de dados do sistema de controle para configurar e monitorar o hardware com o auxílio de drivers específicos.

Cada servidor de hardware precisa escrever ou ler no Banco de Dados os parâmetros atualizados do respectivo dispositivo de hardware. Neste servidor são estabelecidas as formas de acesso ao dispositivo de hardware e a taxa de atualização dos registros.

No sistema SCADA-FEL desenvolvido foi projetado um servidor de hardware denominado **Servidor dos transdutores magnéticos.** Este programa possui acesso aos conversores DAC (CP266) e ADC (CP213) instalados no PXI, responsáveis por configurar e monitorar o sinal elétrico do sistema de condicionamento de sinal (Torre de Potência). Cada canal destes módulos possuem um registro no banco de dados, cujos nomes foram definidos como:

PXI_ADC_XX, onde **XX** representa o número do canal de 01 a 64.

PXI_DAC_XX, onde **XX** representa o número do canal de 01 a 64.

O algoritmo do **Servidor dos Transdutores**, representado na Figura 27, é responsável por executar os processos relacionados com os transdutores eletromagnéticos (Dipolos, Quadrupolos e Defletores). Possui *drivers* para acesso aos conversores utilizados para configurar e monitorar o sinal elétrico dos circuitos de condicionamento de sinal localizados na **Torre de Potência**.

Este algoritmo atualiza as informações do Banco de Dados em uma base de tempo pré-definida, monitorando os registros de controle e alterando os registros de monitoramento dos transdutores. A base de tempo depende dos parâmetros de controle necessários para a operação do FEL e pode ser alterada dinamicamente, dependendo dos processos envolvidos. No momento em que é identificado alguma alteração nos registros correspondentes aos parâmetros de controle, esta informação é repassada para os módulos de DAC e o sinal elétrico resultante é convertido em corrente elétrica pela **Torre de Potência** para ser aplicada ao transdutor correspondente. Os registros de monitoramento correspondem à corrente elétrica presente nos transdutores, convertidas em tensão pela Torre de Potência e medidos pelo ADC correspondente.

O Sistema de Diagnóstico monitora estes parâmetros e registros do sistema verificando possíveis falhas nos processos executados. De acordo com as situações programadas, o usuário pode ser alertado, algum processo automatizado pode ser executado ou os processos problemáticos podem ser suspensos.

O programa servidor armazena todas as configurações de operação e todos os comandos executados no Banco de Dados para que estes parâmetros fiquem disponíveis para outros programas do sistema SCADA-FEL e para fins de diagnóstico.

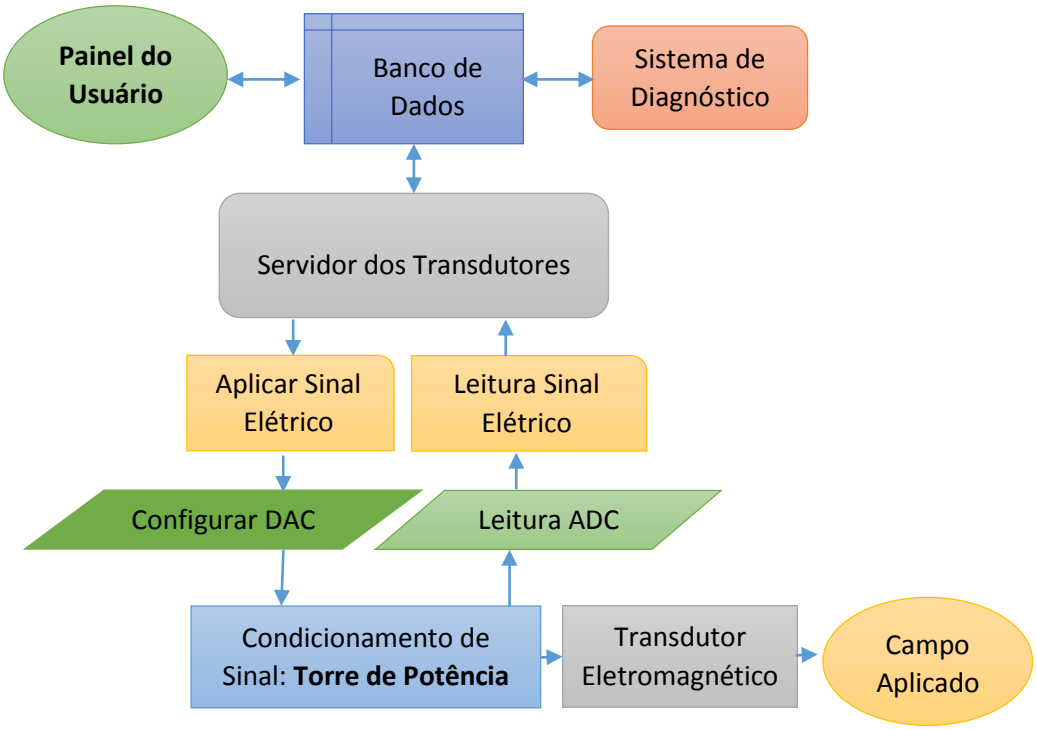

Figura 27 – Algoritmo de configuração e controle do campo dos Dipolos e Quadrupolos

3.2.6. Sistema de Diagnóstico

Este sistema deve monitorar o Banco de Dados através do servidor principal do sistema SCADA-FEL e identificar parâmetros fora dos padrões de controle estabelecidos.

No sistema de controle CREOL, este conjunto de programas estava implementado em um computador específico (*Droplet*) que dispunha de um painel de led e um sistema de som para as notificações. O Sistema de diagnóstico SCADA-FEL ainda não foi completamente implementado no novo sistema de controle e deve ser instalado em um computador independente, o que garante a verificação das linhas de controle e comunicação do sistema SCADA-FEL.

Em situações complexas, como na avaliação de riscos de operação, é importante um Sistema de Diagnóstico inteligente, que possa executar processos com o objetivo de minimizar danos e otimizar processos.

3.3. Monitoramento Magnético

Foi desenvolvido um sistema de monitoramento magnético de baixa frequência para analisar as condições magnéticas ambientais. Este instrumento fará parte do Sistema de Controle desenvolvido, é de baixo custo e poderá ser adaptado para auxiliar na identificação do efeito da interferência magnética no funcionamento de equipamentos científicos. Esta interferência pode ser provocada pela operação de motores elétricos, elevadores, deficiência na blindagem magnética, etc. Em equipamentos sensíveis a estes sinais de interferência, que é caso de sistemas que utilizam feixe eletrônico de baixa energia, como microscópios eletrônicos e deste projeto FEL, são realizadas adequações nas instalações elétricas, utilizações de blindagens eletromagnéticas e instalações de equipamentos de cancelamento de campo eletromagnético ativo [75], contudo é necessário o monitoramento deste sinal de interferência para o diagnóstico.

De acordo com as informações para a instalação de microscópios eletrônicos, é recomendável que estes equipamentos sejam instalados em ambientes com intensidade de ruído magnético menor que 100nT rms [76] e, para a alta resolução nas imagens obtidas por estes aparelhos, a intensidade deve ser menor que 10nT rms [77], uma vez

que intensidades maiores podem causar perda de resolução no equipamento. O nível de 100nT foi utilizado como referência para auxiliar o campo magnético mensurável pretendido com o instrumento desenvolvido. Para fins de comparação, campo magnético de 100nT é provocado pela passagem de corrente elétrica de 0,5A em um condutor retilíneo longo a distância radial de 1 metro.

Para o objetivo de desenvolver este instrumento foi utilizado um módulo de sensoriamento magnético, MicroMag3 [78], escolhido devido a disponibilidade no laboratório e pelo baixo custo. Este módulo que possui três sensores magneto-indutivos, um para cada eixo (XYZ), com resolução de 15nT cada um. O efeito magneto-indutivo está relacionado com a magnetização de um condutor magnético pelo campo magnético produzido pela passagem de corrente elétrica neste condutor. Se a corrente elétrica varia com o tempo, o fluxo magnético induz tensão elétrica no condutor que pode ser medida [79].

O MicroMag3 é um módulo de sensoriamento disponível comercialmente em uma placa de circuito impresso com um circuito integrado de aplicação específica (ASIC – *Application Specific Integrated Circuit*). Este módulo permite a transferência das medidas do campo magnético realizadas pelos sensores para sistemas de processamento através de protocolo de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface* [80]).

De acordo com as informações do manual do modulo [78] é preciso programar o tempo de aquisição das medidas a serem realizadas e existe um compromisso entre a sensibilidade obtida com a taxa de aquisição programada. Na Tabela 10 é possível verificar as configurações de medida possíveis com o MicroMag3. Para resolução de 15nT, o tempo de aquisição deve ser selecionado em 60ms por canal (X, Y ou Z).

Tabela 10 – Configurações do tempo de aquisição do MicroMag3 [78].

Tempo médio de aquisição (1 eixo)	Frequência média de aquisição (1 medida - 1 eixo)	Resolução
500µs	2000Hz	1920nT
1,0ms	1000Hz	960nT
2,0ms	500Hz	480nT
4,0ms	250Hz	240nT
7,5ms	133,33Hz	120nT
15ms	66,67Hz	60nT
35,5ms	28,17Hz	30nT
60ms	16,67Hz	15nT

Para a comunicação com o módulo MicroMag3 foram utilizados um microcontrolador *Atmel* ATmega328 [81] e uma interface conversora USB/Serial para conexão com o computador. Na Figura 28 é apresentado o diagrama de blocos do Sistema de Monitoramento Magnético desenvolvido.

Figura 28 - Diagrama de blocos do Sistema de Monitoramento Magnético.

Para o projeto do *firmware* do microcontrolador foi utilizada a linguagem de programação C. Este programa retorna ao computador, através do barramento USB, medidas da intensidade magnética nos três eixos com os respectivos intervalos de tempo entre as medidas realizadas. Estes intervalos serão utilizados para o cálculo da FFT (*Fast Fourier Transformer*) do sinal medido, permitindo visualizar espectros de frequência do sinal aquisitado.

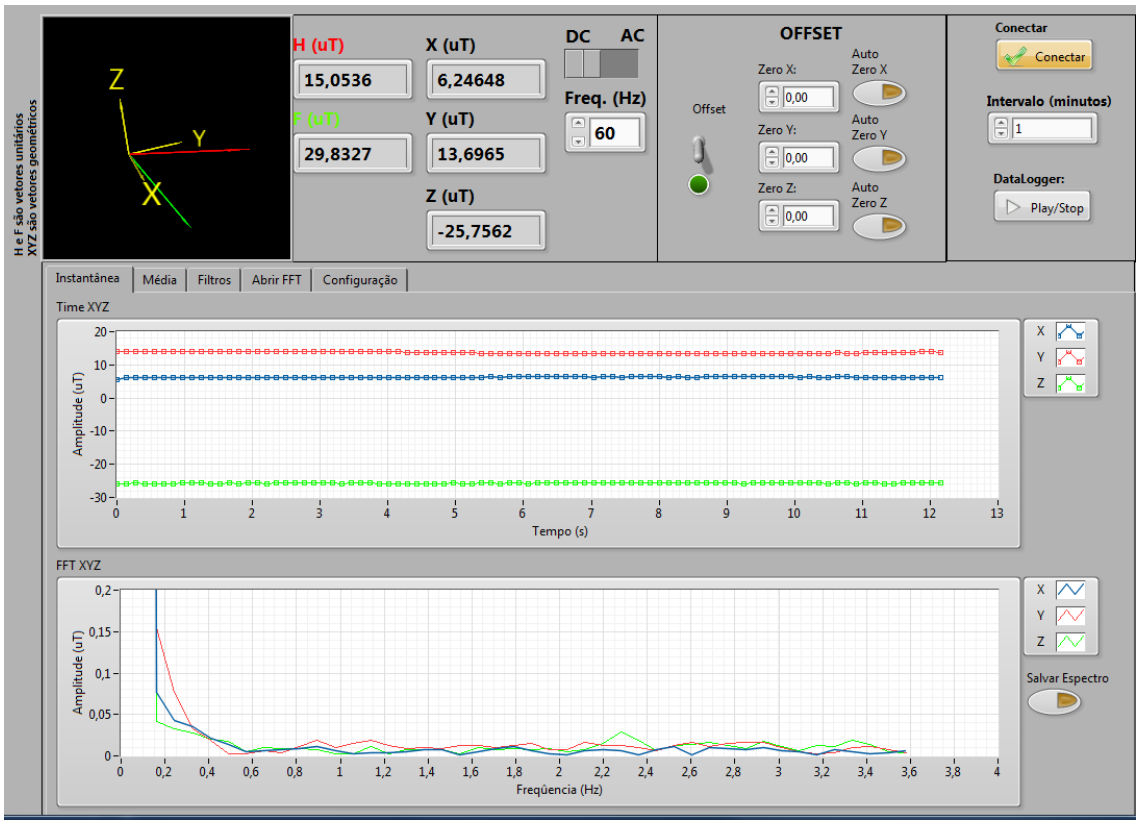

Figura 29 – Painel do sistema de monitoramento magnético.

Foi utilizado o ambiente LabVIEW para o desenvolvimento de uma aplicação para comunicação com o microcontrolador por USB (Figura 29). Este programa é responsável pelo monitoramento das medidas e cálculo da FFT. Para o cálculo da FFT utiliza janela *Hanning* com escala linear. Como este sistema foi programado para medir os três sensores disponíveis no módulo de sensoriamento por vez, o tempo de medida é multiplicado por três e a frequência de aquisição é dividida por três. Pelo teorema de *Nyquist* a frequência máxima dos espectros obtidos corresponde à metade da frequência de aquisição.

A requisição de medidas é realizada quando o programa desenvolvido envia para o microcontrolador um comando de configuração do tempo de aquisição. O microcontrolador armazena noventa medidas por eixo (270 ao total, XYZ) após receber um comando e após as medidas envia estas informações ao computador. Na Tabela 11 estão os comandos atualmente programados no microcontrolador com a configuração de medida que será enviada ao MicroMag3.

Tabela 11 – Configuração da velocidade de aquisição.

Caractere de requisição de medidas	Tempo de aquisição
0	500µs
1	1,0ms
2	2,0ms
3	4,0ms
4	7,5ms
5	15ms
6	35,5ms
7	60ms

Este instrumento de sensoriamento foi projetado para monitorar o sinal magnético por longos períodos, auxiliando no diagnóstico de fontes de ruído desconhecidas e que são intermitentes. Desta maneira, é possível identificar fontes de ruído que atuam em determinados horários do dia.

4. *Discussão dos Resultados*

Nesta seção serão apresentados o painel de controle SCADA desenvolvido e os resultados obtidos com a aplicação do sistema de controle na caracterização magnética dos transdutores eletromagnéticos do laser. No final estão os resultados obtidos com o sistema de monitoramento magnético proposto.

O sistema SCADA-FEL desenvolvido foi aplicado e avaliado na caracterização dos componentes de controle do feixe eletrônico do FEL-CREOL. O estudo visava verificar a viabilidade técnica de se reaproveitar os dispositivos transdutores no projeto de um novo FEL para operar na faixa do THz. Os principais resultados que podemos destacar são: o desenvolvimento e a documentação da arquitetura do hardware e software do Sistema SCADA, validação e testes do SCADA-FEL, construção de uma ferramenta para caracterização, testes e avaliação dos dispositivos do CREOL, testes e caracterização magnética dos Dipolos do CREOL e medidas de interferência magnética de baixa frequência realizadas com o instrumento de monitoramento magnético desenvolvido.

4.1. Painel de Controle

O objetivo principal do Sistema de Controle é fornecer acesso ao usuário para a operação do FEL através de um Painel de Controle. Este programa, representado nas Figura 30 e Figura 31, foi desenvolvido para ser de fácil utilização e possui elementos gráficos facilmente identificáveis por ícones para o controle e monitoramento dos processos.

O Painel de Controle apresenta na tela principal todos os dispositivos de controle do feixe eletrônico com fácil localização física na linha de vácuo do feixe. Ao selecionar um dos dispositivos, através de um terminal *touchscreen*, é apresentada uma aba específica no centro da tela permitindo alterar as propriedades do dispositivo de controle.

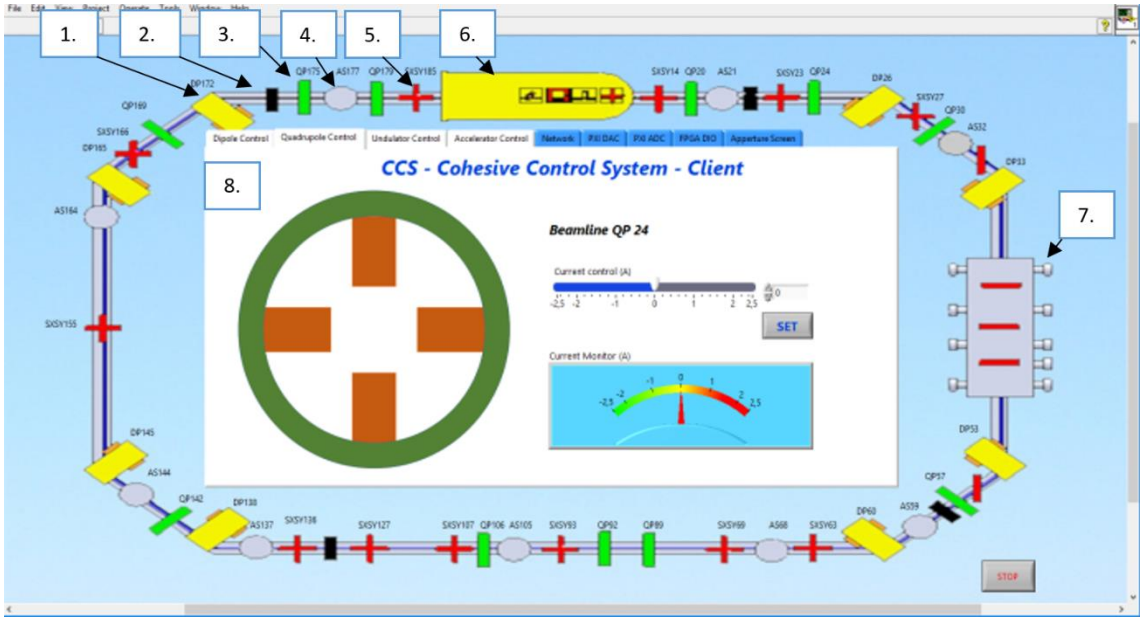

Figura 30 – Painel de Controle do usuário, cada um dos elementos de controle é acessado através do painel *touchscreen.*

Os itens, numerados na Figura 30, identificam os tipos de ícones associados aos dispositivos que podem ser selecionados:

1. ***Dipolo**:* Permite a configuração e monitoramento da corrente elétrica aplicada a cada um dos 8 Dipolos, fornecendo controle sobre a deflexão do feixe eletrônico.

2. ***Monitor de Vácuo**:* Apresenta o monitoramento do nível de vácuo referente aos 4 transdutores conectados à linha de vácuo.

3. ***Quadrupolo**:* Permite a configuração e monitoramento da corrente elétrica aplicada a cada um dos 11 Quadrupolos, atuando no controle da divergência do feixe de elétrons.

4. ***Monitor do Feixe**:* Controle dos dispositivos eletromecânicos para visualização e centralização do feixe de elétrons. Selecionam as três posições mecânicas (*Up*, *Middle* e *Down*) de cada um dos 14 Monitores. Este Processo de alinhamento e colimação é realizado progressivamente em cada um dos Monitores do Feixe, partindo da saída do feixe no Acelerador até o seu retorno. O controle destas posições é realizado por um sistema pneumático associado aos sinais de controle digitais do módulo DIO instalado na plataforma PXI.

5. ***Defletor Magnético****:* Apresenta o controle e monitoramento da corrente elétrica injetada aos 17 Defletores Magnéticos utilizados para realizar ajustes finos na trajetória do feixe. Estes Defletores são solenoides dispostos na linha de vácuo que possuem intensidade no campo magnético inferior aos dos Dipolos e Quadrupolos. São utilizados para pequenas correções no feixe (deflexão e colimação) utilizando a Torre de Potência, o ADC e o DAC PXI para controle e monitoramento.

6. ***Acelerador Eletrostático****:* Associado com a configuração do Acelerador NEC 5SDH-2, permitindo o controle do feixe eletrônico.

7. ***Ondulador****:* Permite aceder aos processos de configuração dos parâmetros mecânicos de posicionamento do Ondulador, como atuadores lineares, servomecanismos e motores.

8. ***Abas de Controle dos dispositivos selecionados***: Cada ícone selecionável é associado a uma aba ou janela, onde é possível alterar e monitorar os parâmetros de controle. A aba, representada no centro da Figura 30, corresponde ao controle de um dos Quadrupolos, onde é possível alterar e monitorar a corrente elétrica que está sendo aplicada ao transdutor. Na Figura 31é possível alterar e monitorar a corrente elétrica de polarização de um dos Dipolos.

Nas outras abas do programa, é possível configurar os outros dispositivos de controle do feixe eletrônico e analisar tecnicamente o funcionamento do hardware do sistema (rede, PXI DAC, PXI ADC e DIO). Atualmente os controles disponíveis no Painel de Controle são os controles dos Dipolos, Quadrupolos e Defletores.

Como o laser ainda não está operacional, não é possível concluir a verificação da devida operação de todos os módulos projetados e desenvolvidos. No entanto, é possível avaliar a arquitetura, a comunicação e a usabilidade do sistema através de uma ferramenta desenvolvida para a caracterização dos transdutores eletromagnéticos, realizando o controle e o monitoramento destes transdutores através do Painel de Controle (Dipolos, Quadrupolos e Defletores).

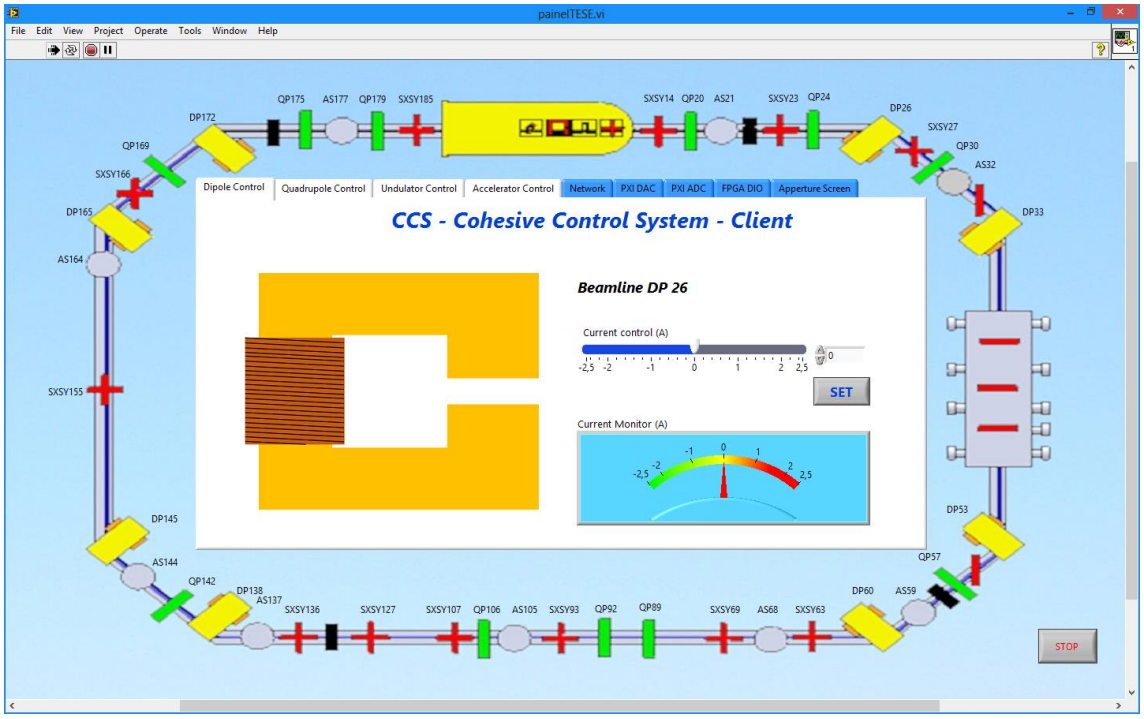

Figura 31 – Painel de Controle, quando acionado o controle de um dos Dipolos eletromagnéticos.

4.2. Caracterização dos Transdutores Eletromagnéticos

Para avaliação e testes nos componentes principais do sistema SCADA-FEL, e para a caracterização dos transdutores eletromagnéticos do FEL, foi desenvolvido um sistema de caracterização que possui uma mesa robótica (Figura 32), um sensor magnético (MLX90215 [82]), uma placa de aquisição de dados (*National Instruments* 6025E [83]) e um computador cliente do sistema SCADA com o Painel de Controle do sistema instalado.

O Painel de Controle foi utilizado para alterar e monitorar a corrente elétrica aplicada aos dispositivos utilizando os módulos PXI DAC e ADC em conjunto com a Torre de Potência. Para o controle da mesa robótica e aquisição das medidas de campo magnético com a placa de aquisição de dados, foi desenvolvido outro programa em LabVIEW.

A caracterização dos transdutores com este sistema implica em avaliar os módulos do Sistema SCADA relacionados com o transporte do feixe eletrônico. O Sistema de caracterização permite testes em todos os conectores, fontes de corrente, módulos DAC

e ADC instalados no PXI, transdutores eletromagnéticos, softwares do Sistema SCADA-FEL desenvolvidos até o momento, Protocolos de Comunicação e Intranet.

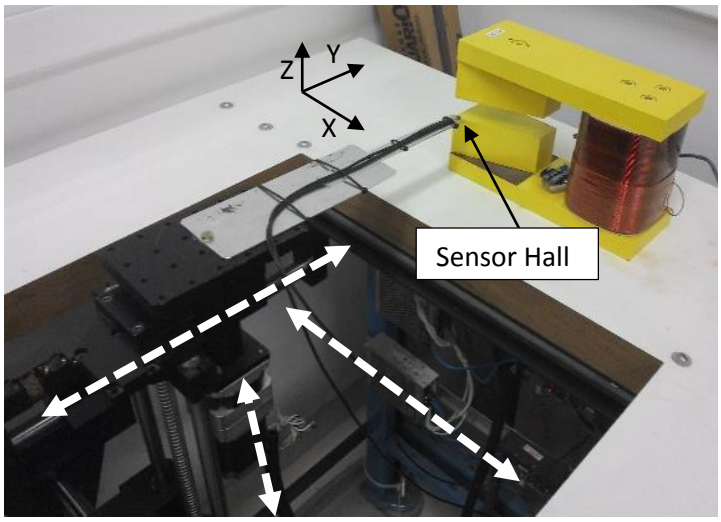

Figura 32 – Foto da mesa robótica XYZ utilizada na caracterização de um Dipolo magnético. As setas indicam o curso dos eixos dos servomecanismos e da ponteira de prova Hall.

As curvas de caracterização dos transdutores obtidas permitem a calibração das fontes de corrente da Torre de Potência e os resultados obtidos serão inseridos no Banco de Dados SCADA-FEL. Isto permite ao sistema fazer a conversão das tensões elétricas de controle (DAC – PXI) com os sinais de monitoramento (ADC – PXI) da medida do campo magnético resultante nos transdutores.

Na Figura 33 é apresentada a histerese de um Dipolo do FEL-CREOL obtida utilizando o sistema de caracterização desenvolvido aplicando corrente elétrica e medindo o campo magnético produzido. Esta medida foi tomada a meia altura do entreferro e no centro da base (XY) do Dipolo.

Na Figura 34 é apresentado o mapeamento magnético obtido no entreferro de dois Dipolos. Estas imagens mostram a uniformidade e a intensidade do campo magnético no plano medidos à meia altura do entreferro dos Dipolos com corrente de polarização fixa de 1A. As cores representam a intensidade do campo magnético no plano XY da mesa robótica.

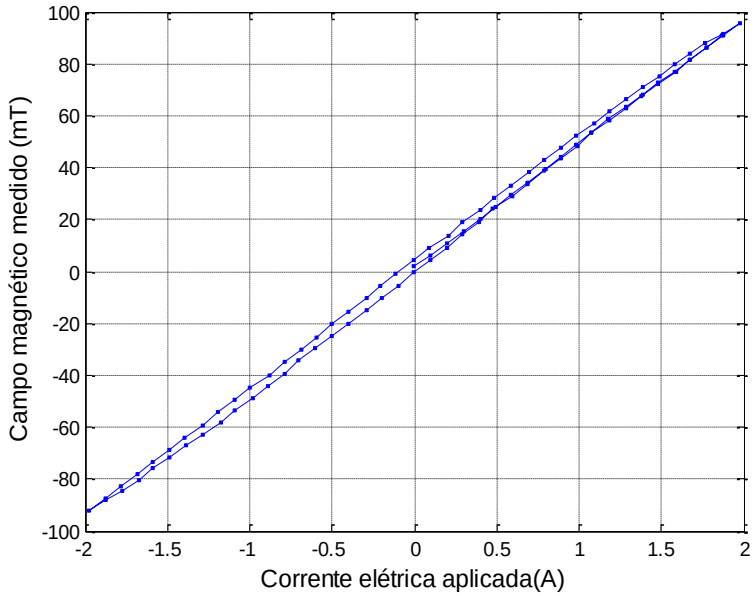

Figura 33 – Curva do campo magnético resultante em função da corrente elétrica aplicada no Dipolo apresentando a histerese deste dispositivo.

Os resultados permitem verificar a efetiva operação, comunicação e a linha de controle entre os módulos do sistema SCADA-FEL desenvolvidos, hardware e o Sistema de condicionamento de sinal relacionados com o controle e monitoramento da corrente elétrica nos transdutores eletromagnéticos.

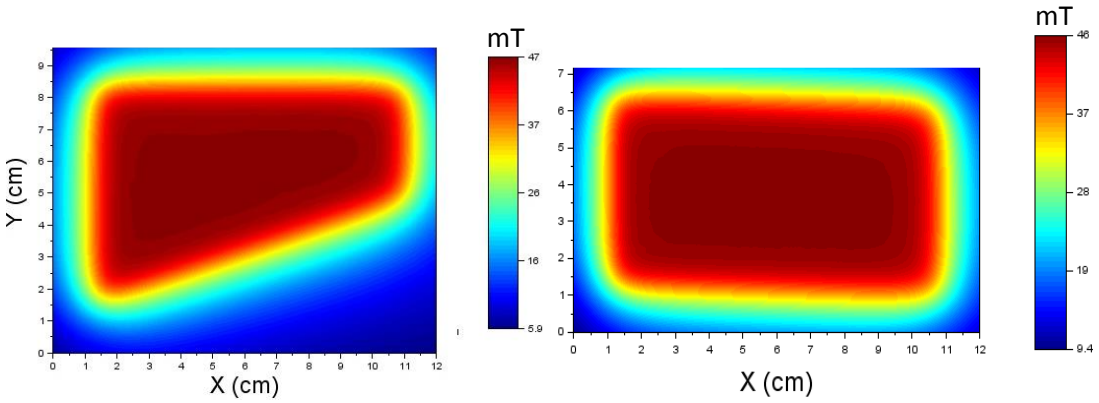

Figura 34 – Mapeamento magnético do entreferro de um Dipolo de base trapezoidal (à esquerda) e retangular (à direita) com corrente elétrica de polarização de 1A.

O Sistema de Caracterização inclui os conectores, fontes de corrente, módulos DAC e ADC, transdutores eletromagnéticos e as rotinas do Sistema SCADA-FEL. As caracterizações magnéticas realizadas nos Dipolos permitem sugerir o reaproveitamento destes dispositivos na elaboração do projeto para um novo sistema FEL.

4.3. Monitoramento Magnético

Para avaliação e caracterização do Sistema de monitoramento magnético desenvolvido foram realizadas calibrações nos sensores utilizando um par de Helmholtz de 25cm de raio que produz campo magnético de 0,49mT/A, uma fonte de corrente programável (Keithley 6221) para polarizar as bobinas no par de Helmholtz e um gaussímetro (F.W. Bell 9950). O par de Helmholtz, apresentado na Figura 35, também foi utilizado para realizar testes e medidas com campo magnético alternado no módulo de sensoriamento magnético.

Na Figura 36 estão mostradas as medidas magnéticas em função da frequência obtidas pelo programa de monitoramento quando houve excitação de 24,5nT (com frequência de 2Hz) e 245nT (com frequência de 52Hz) produzido pelo par de Helmholtz. A diferença no ruído de base foi causada por terem sido utilizadas duas escalas de medidas, 60ms na primeira e 2ms na segunda. Estas escalas alteram a sensibilidade e a frequência que podem ser analisadas pelos sensores, conforme Tabela 10, localizada na seção 3.3.

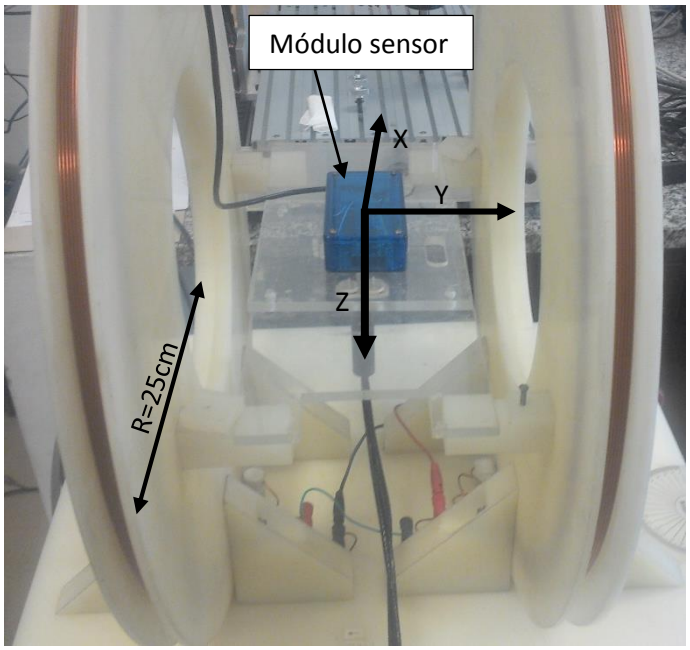

Figura 35 – Par de Helmholtz utilizado para a calibração do módulo sensor e o módulo sensor ao centro.

Para a construção dos espectros apresentados foram utilizadas 90 medidas consecutivas do sinal magnético enviadas pelo microcontrolador ao programa de

monitoramento instalado no computador, o que representa um tempo total de aquisição de 5400ms e 180ms respectivamente. Estes espectros possuem largura de linha de 0,8mHz e 2,3Hz respectivamente.

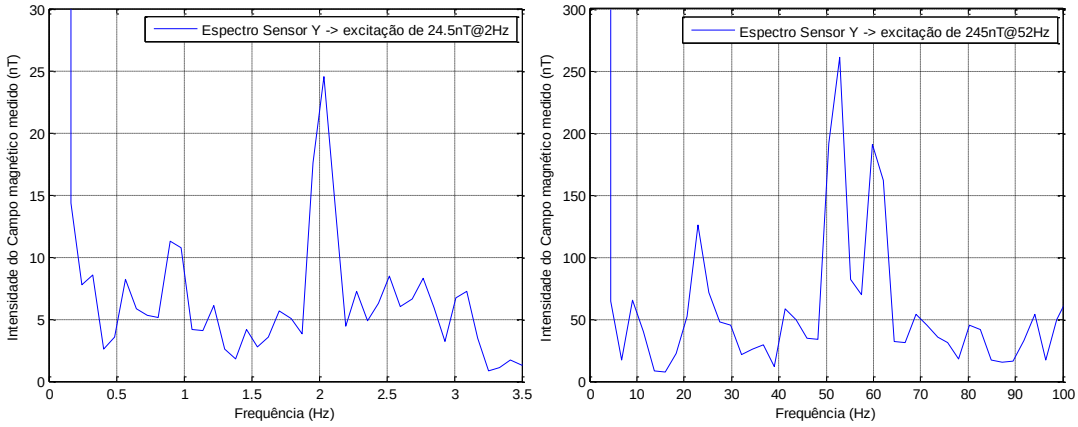

Figura 36 – Espectros do campo magnético para excitação de 25nT em 2Hz com taxa de aquisição de 60ms à esquerda e 245nT em 52Hz e taxa de aquisição de 2ms a direita.

Na Figura 37 é apresentado o monitoramento temporal do espectro de frequência magnética para excitação de 245nT, com a diferença em que houve mudança na frequência de excitação de 10Hz até 100Hz com passos de 10Hz e com intervalos de 10 minutos entre as medidas. Cada linha neste gráfico representa um espectro magnético tomado a cada minuto com a intensidade representada por uma escala de cores. Com este gráfico também é possível visualizar a contribuição do ruído magnético provocado pela instalação elétrica predial (60Hz). Estas medidas utilizaram a escala de 2ms, conforme Tabela 10, que é a escala que permitiu observar a faixa dos 60Hz com maior sensibilidade.

Para verificar a resolução espacial de rotação do instrumento foram realizadas medidas com excitação magnética contínua de 98μT e variação no ângulo dos sensores (em torno de Z, conforme Figura 35) com relação ao campo magnético aplicado pelo par de Helmholtz, em Y. Estas medidas estão na Figura 38, onde é possível verificar que os sensores possuem desvios azimutal e zenital.

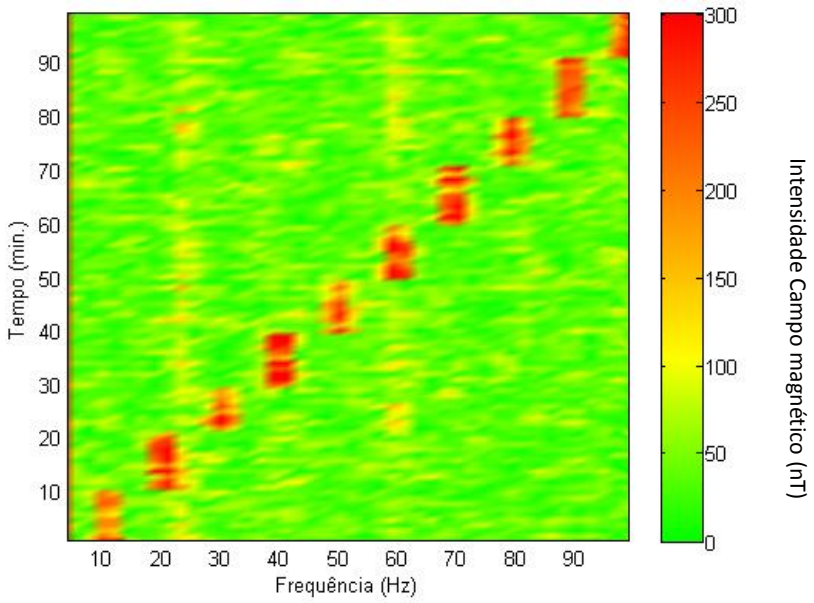

Figura 37 – Espectro magnético com excitação de 245nT e frequência de 10Hz até 100Hz com passos de 10Hz em intervalos de dez minutos.

O intrumento foi aplicado para medidas de ruído magnético sem excitação conhecida e os resultados estão na Figura 39, onde do lado esquerdo estão as medidas do espectro de frequência e do lado direito as medidas de campo magnético contínuo com a escala de medida em 2ms. É possível observar presença de ruído magnético na faixa dos 60Hz em torno de 200nT.

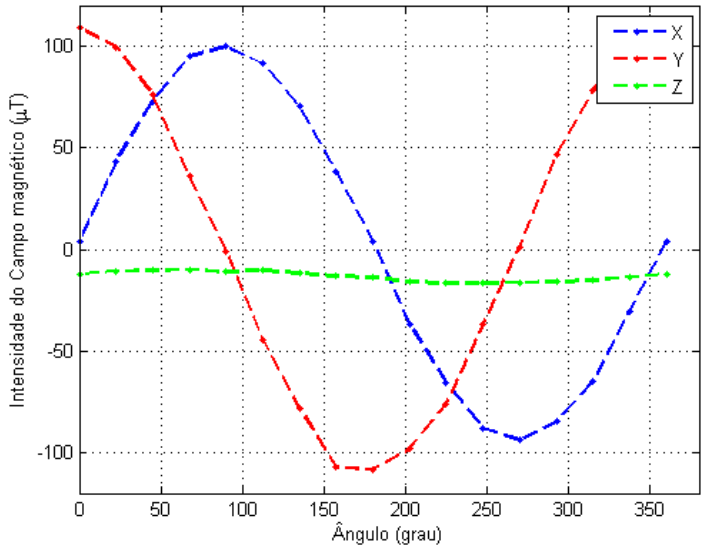

Figura 38 – Intensidade do campo magnético medido pelos sensores do MicroMag3 quando rotacionado em torno de Z.

O gráfico do campo magnético contínuo (Figura 39 à direita) é tomado com uma média das 90 medidas realizadas pelo sensor, cada média representa um ponto no gáfico da direita das medidas presentes em uma linha no gráfico da esquerda.

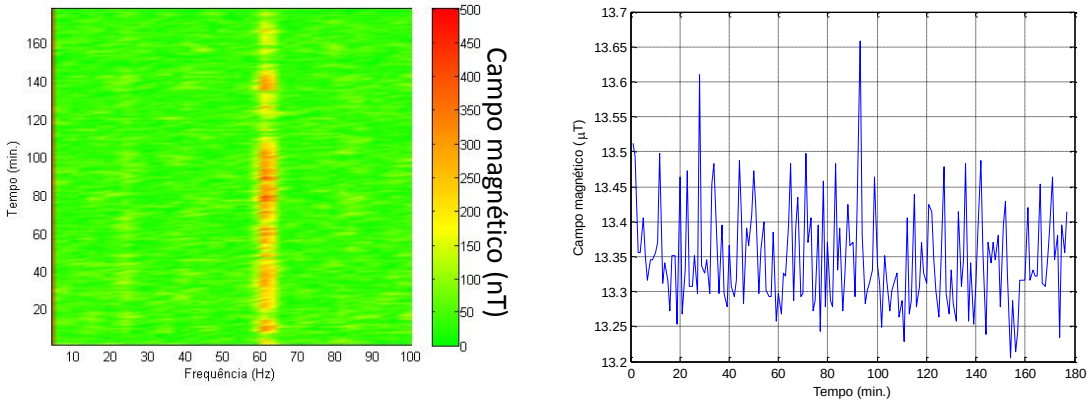

Figura 39 – Medidas de monitoramento do ruído magnético, à esquerda o espectro magnético com a intensidade representada por uma escala de cor e à direita a medida do campo magnético contínuo.

Na Figura 40 são apresentadas as medidas do ruído magnético quando os sensores foram colocados dentro de uma câmara magnética blindada, onde é possível observar que o sinal de 60Hz não é perceptível e o nível de ruído magnético medido no regime contínuo ficou em torno de 100nT.

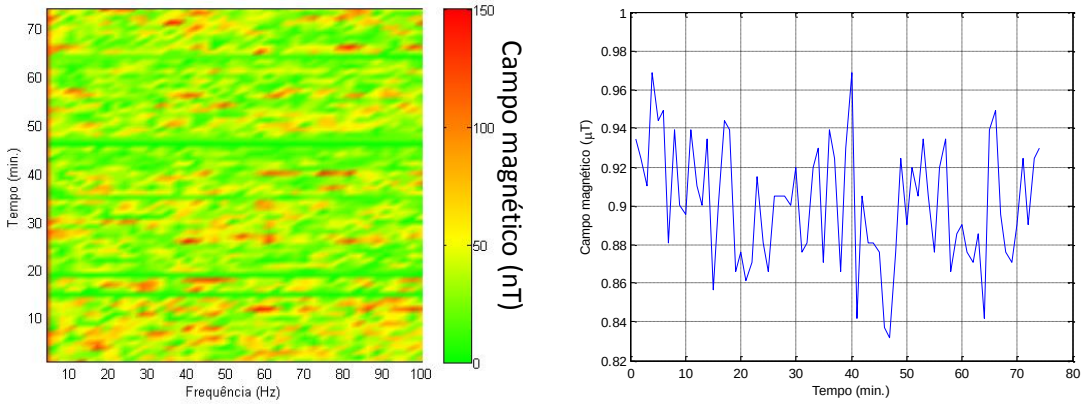

Figura 40 – Medidas de monitoramento magnético utilizando uma câmara blindada.

Para as medidas de monitoramento magnético contínuo, o instrumento foi utilizado no laboratório de instalação do Microscópio Eletrônico de Transmissão JEOL 2100F de 200kV no CBPF e na PUC-Rio, no laboratório de Magnetismo Aplicado a Artes do Departamento de Física. As medidas realizadas no laboratório do CBPF podem ser

visualizadas na Figura 41, que contém os dados de 2 dias, e as medidas realizadas na PUC-Rio podem ser visualizadas na Figura 42, que contém dados de 3 dias. As medidas Z e F representam o módulo do campo magnético no plano XY e XYZ respectivamente.

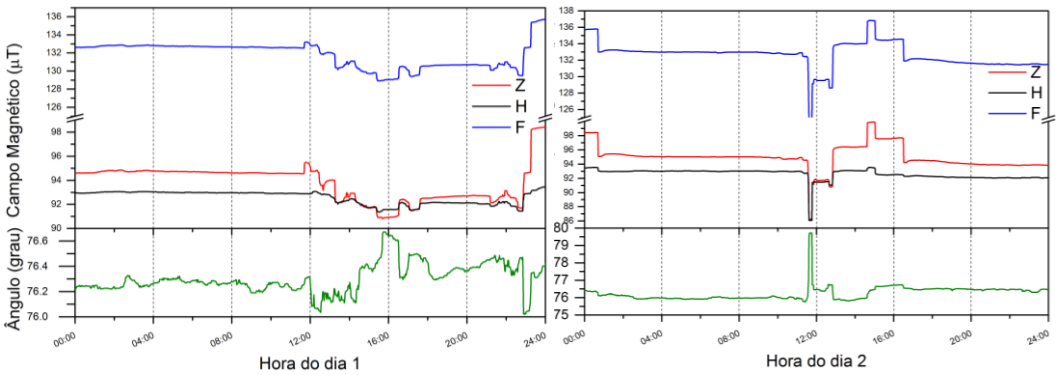

Figura 41 – Monitoramento do campo magnético no CBPF (H representa o módulo dos eixos XY e F representa o modulo dos três eixos XYZ).

Na Figura 43 está apresentado o espectro magnético medido em um período de 13 horas no CBPF.

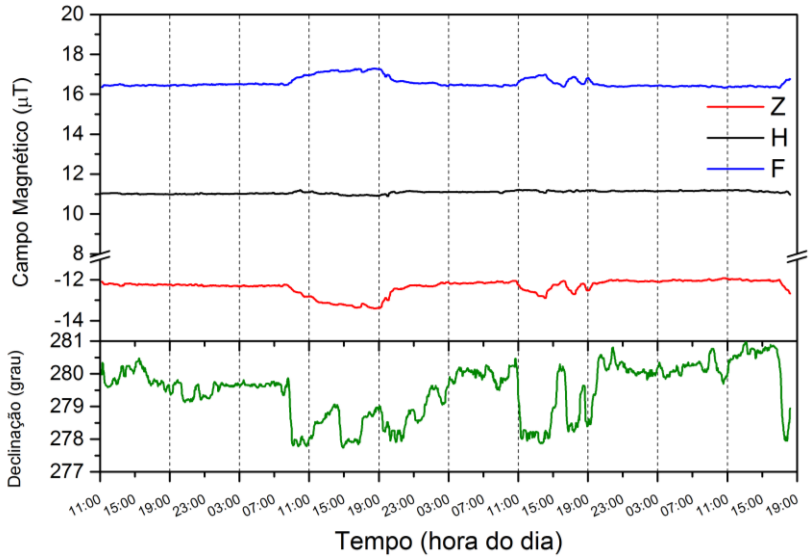

Figura 42 – Monitoramento do campo magnético realizado na PUC-Rio.

O módulo sensor permaneceu na mesma posição e não estava orientado com o campo magnético terrestre na realização destas medidas de monitoramento.

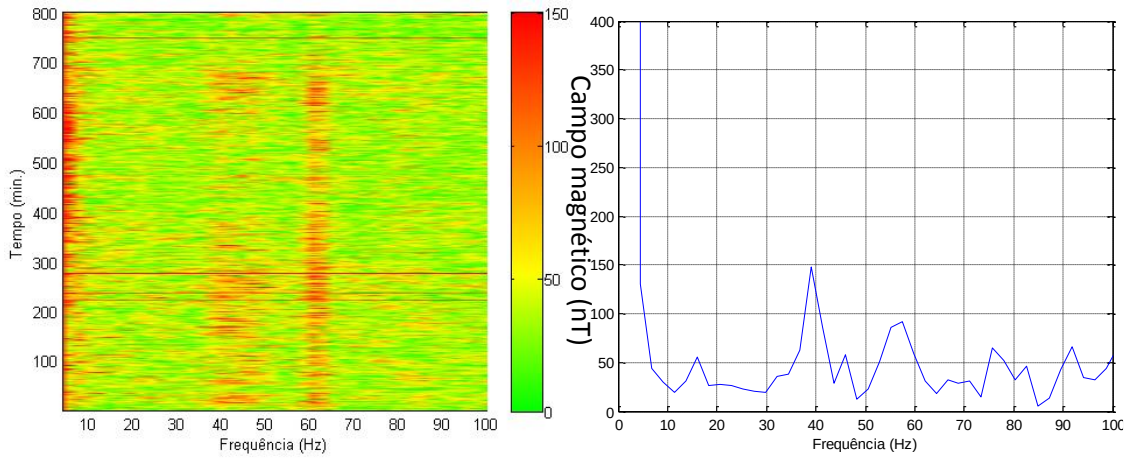

Figura 43 – Espectro magnético com as medidas realizadas no CBPF, à direita um espectro tomado na região central do gráfico da esquerda.

No espectro da Figura 43 é possível observar ruído pertinente em duas faixas de frequência: entre 40Hz e 50Hz e próximo de 60Hz com amplitudes em torno de 100nT.

As medidas realizadas com o instrumento de monitoramento magnético sugerem que o dispositivo desenvolvido pode ser utilizado para detecção e localização de sinais de interferência magnética de baixa frequência. Estas medidas são úteis para obter informações que auxiliam na otimização de equipamentos que utilizam feixe eletrônico de baixa intensidade.

5. *Conclusão*

Neste trabalho apresentamos o desenvolvimento de um sistema SCADA para o controle de um FEL realimentado (SCADA-FEL). A arquitetura de controle implementada é modular, tem estrutura de rede Intranet e é concentrada em Banco de Dados.

O projeto SCADA-FEL permite o controle remoto do sistema FEL e a conexão de dispositivos de forma incremental e orgânica, referindo ao hardware como registros numa base de dados cujos parâmetros são atualizados em um intervalo de tempo pré-definido. Nesta configuração, o processamento pode ser paralelizado, permitindo atualizações constantes de hardware e software, estendendo o tempo de operação do projeto, visando o diagnóstico dos processos e a manutenção.

Este sistema de controle é inspirado em um projeto anterior, CREOL [2], programado nas linguagens C/C++ e Delphi utilizando barramentos e módulos CAMAC. Este projeto é limitado e os componentes operacionais de controle não estão disponíveis atualmente no mercado, prejudicando adaptações a novos projetos e atualizações. O sistema SCADA-FEL apresentado é implementado na linguagem gráfica LabVIEW e na plataforma de hardware PXI. É composto de drivers de hardware, processamento de dados, sistema de diagnóstico e programas do tipo cliente-servidor interligados por protocolos de comunicação. O Banco de Dados utilizado é baseado em rede e emprega a linguagem de consulta estruturada SQL com o gerenciador de banco de dados MySQL. Este gerenciador permite o acesso aos vários registros no banco de dados ao mesmo tempo, otimizando o processo de leitura e escrita dos dados. O critério de escolha destas tecnologias se pauta por sua escalabilidade, expectativa de manutenção, tempo de implementação do protótipo e acessibilidade.

O sistema SCADA-FEL permite atualmente o controle e monitoramento de até 64 dispositivos transdutores eletromagnéticos. Estes dispositivos são associados a 128 elementos de hardware (canais dos módulos ADC-PXI e DAC-PXI) que são conectados a 256 registros no Banco de Dados (2 registros para cada elemento de hardware). A taxa de atualizações destes parâmetros está relacionada com a taxa de leitura e escrita nos canais (tempo mínimo de 34μs nos canais DAC e 10μs nos canais ADC, dependendo da

resolução), com a velocidade da comunicação da rede Intranet, com o tempo de requisição do gerenciador de Banco de Dados e do tempo de operação dos programas envolvidos. O tempo médio de transmissão das informações do servidor ao Painel de Controle, atualmente, é de 200ms, o que poderá ser aprimorado aperfeiçoando a rede intranet utilizando *switches* de 1Gbps e otimizando processos de transmissão e comunicação com o hardware.

O Painel de Controle projetado para a operação do FEL permite conexão remota e apresenta os elementos de controle como ícones selecionáveis em uma interface *touchscreen.* Estes ícones são associados aos dispositivos transdutores de controle e monitoramento do FEL. O Painel de Controle foi desenvolvido para ser instalado em uma máquina cliente conectada à Intranet do sistema SCADA-FEL, na sala de controle do FEL.

Para testes nas linhas de controle e transmissão de dados, o sistema SCADA-FEL foi aplicado na caracterização elétrica e magnética dos transdutores eletromagnéticos e circuitos de condicionamento de sinal do FEL-CREOL. Os resultados se mostraram promissores para a reprodutibilidade, robustez do sistema e para a possibilidade da reutilização dos Dipolos, e circuitos de condicionamento de sinal para o projeto de um novo sistema FEL. Os transdutores e os circuitos de condicionamento de sinal representam um capital investido que poderá representar um importante fator de economia. A caracterização dos transdutores eletromagnéticos do FEL-CREOL, utilizando a ferramenta de caracterização magnética desenvolvida foi tema de outro trabalho de mestrado [59].

Para otimizar o funcionamento do FEL com relação a interferência magnética, que pode alterar a colimação do feixe eletrônico, foi desenvolvido um sistema de monitoramento magnético. Este tipo de interferência magnética também é um desafio recorrente em sistemas de feixe eletrônico de baixa intensidade, como na microscopia eletrônica, causando perda de resolução nestes equipamentos. O instrumento desenvolvido possui um painel de monitoramento gráfico que permite a visualização da direção, da intensidade e do espectro de frequência do campo magnético.

Este instrumento de monitoramento admite medidas de campo magnético nos eixos XYZ, pode auxiliar na localização de fontes de ruído magnético e permite o

armazenamento de informações de monitoramento obtidas em longos períodos de tempo sem interrupção, como semanas, auxiliando na detecção de fontes de ruído intermitentes. Na escala mais sensível o instrumento possui resolução de 15nT, onde é possível obter espectros de frequência de até 3,2Hz com largura de linha de 82mHz. Na escala menos sensível, o instrumento possui resolução de 2µT com espectros de frequência de até 300Hz com largura de linha de 7Hz.

Os resultados obtidos com o dispositivo de monitoramento magnético se mostraram promissores para analisar o ruído magnético ambiental em locais de instalação de sistemas de feixe eletrônico de baixa energia, como no FEL e microscopia eletrônica. Obter informações de interferência magnética pode ser essencial para alcançar desempenho superior nestes equipamentos.

O protótipo de sistema supervisório desenvolvido, SCADA-FEL, pode ter sua arquitetura adaptada para o controle de outros processos complexos ou experimentos científicos com demanda para um sistema aberto, envolvendo a configuração e monitoramento de variáveis e parâmetros físicos da ordem de centenas de elementos com controle de usuários, paradas programadas e gerenciamento remoto, o que representa o estado da arte em sistemas de controle.

O sistema desenvolvido é um importante subsídio para o desenvolvimento de uma proposta de projeto FEL para ser instalado no Brasil e possui como perspectivas futuras o desenvolvimento de Servidores de Hardware e sistemas de condicionamento de sinal relacionados ao Monitoramento Magnético, Monitores do Feixe de elétrons, Sistema de Vácuo, Acelerador eletrostático, Canhão de elétrons e dos servomecanismos relacionados com a alteração mecânica do gap do Ondulador para a operação do FEL. Estes servidores e subsistemas já estão previstos na arquitetura SCADA-FEL apresentada.

6. *Referências*

[1] C. A. Brau, "Free Electron Laser," Academic Press, 1990.

[2] L. R. Elias, I. Kimel, L. Delbert, D. Anderson, T. Mufit e Z. Zhong, "A compact cw free electron laser," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,* vol. 304, pp. 219-223, 1991.

[3] G. Dattoli, A. Renieri e A. Torre, "Lectures on the Free Electron Laser Theory and Related Topics," Roma, World Scientific Pub Co Inc, 1993, pp. 117-124.

[4] G. Ramian, "The World Wide Web Virtual Library: Free Electron Laser research and applications.," 03 fevereiro 2015. [Online]. Available: http://sbfel3.ucsb.edu/www/vl_fel.html. [Acesso em 30 julho 2015].

[5] S. Harris, "Lasers in Medicine," *SPIE Professional,* January 2011.

[6] K. Jakubczak, "Lasers - Applications in Science and Industry," December 2011.

[7] W. T. Silfvast, "Laser Fundamentals," Cambridge University Press, 2008.

[8] M. J. Weber, "Handbook of Laser Wavelengths," Berkeley, CRC Press, 1998.

[9] N. B. Abraham e F. T. Arecchi, Physics of New Laser Sources, New York: Springer, 1984.

[10] Stuke, "Dye Lasers: 25 years," vol. 70, Springer, 1992.

[11] R. W. Solarz e P. J. A., "Laser Spectroscopy and its applications," Marcel Dekker, INC., 1987.

[12] F. J. Duarte, "Tunable Lasers Handbook," New York, Academic Press, 1995.

[13] F. J. Duarte e L. W. Hillman, Dye Laser Principles, New York: Academic, 1990.

[14] C. S. Adams e A. I. Ferguson, "Frequency doubling of a single frequency Ti:Al2O3 laser using an external enhancement cavity," *Optics Communications,* vol. 79, pp. 219-223, 1990.

[15] P. F. Moulton, "Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al2O3," *Journal of the Optical Society of America B,* vol. 3, pp. 125-133, 1986.

[16] A. Mendez e T. F. Morse, Specialty Optical Fibers Handbook, Academic Press, 2011.

[17] J. Hecht, "FIBER LASERS: Fiber lasers: The state of the art," 01 04 2012. [Online]. Available: http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-48/issue-04/features/the-state-of-the-art.html. [Acesso em 04 August 2015].

[18] J. Madey, "Stimulated Emission of Bremsstrahlung in a Periodic Magnetic Field," *J. Appl. Phys.*, vol. 42, p. 1906, 1971.

[19] G. Ramian, "FREE ELECTRON LASERS - Table," 03 february 2015. [Online]. Available: http://sbfel3.ucsb.edu/www/fel_table.html. [Acesso em 04 08 2015].

[20] J. Clarke, "Insertion Devices - Introduction to Synchrotron Radiation," [Online]. Available: https://www.cockcroft.ac.uk/wp-content/uploads/2014/12/Lecture-1.pdf. [Acesso em 04 10 2015].

[21] P. L. Kapitza e P. A. M. Dirac, "The reflection of electrons from standing light waves," *Mathematical Proc. Cambridge Philosophical Soc.*, vol. 29, pp. 297-300, 1933.

[22] H. Dreicer, "Kinetic Theory of an Electron-Photon Gas," *Phys. Fluids*, vol. 7, p. 735, 1964.

[23] R. H. Pantell, G. Soncini e H. E. Puthoff, "Stimulated Photon-Electron Scattering," *IEEE J. Quantum Eletronics*, vol. 4, p. 905, 1968.

[24] J. Madey, H. A. Schwettman e W. Fairbank, "A free-electron laser," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vols. %1 de %2NS-20, p. 980, 1973.

[25] V. Sukhatme e P. Wolff, "Stimulated Compton scattering as a radiation source - theoretical limitations," *J. Appl. Phys.*, vol. 44, p. 2331, 1973.

[26] F. Hopf, P. Meystre, M. Scully e W. Louissel, "Classical Theory of a FREE-ELECTRON LASER," *Optics Communication*, vol. 18, pp. 413-416, september 1976.

[27] J. Tanabe, Iron Dominated Electromagnets Design, Fabrication, Assembly and Measurements, World Scientific Pub Co Inc, 2006.

[28] J. Orloff, "Charged Particle Optics," CRC Press, 2008.

[29] R. Caetano, J. Pereira, R. Galvão e C. G., "Modelagem dos dispositivos magnéticos de um Laser de Elétrons Livres," *Notas técnicas do CBPF*, vol. 5, nº 2, pp. 1-11, julho 2015.

[30] H. Motz, "Undulators and 'free-electron lasers'," *Contemporary Physics*, vol. 20, pp. 547-568, 1979.

[31] Hofman, "The physics of Synchrotron radiation," Cambridge University Press, 2004.

[32] K. Halbach, "PERMANENT MAGNET UNDULATORS," *Journal de Physique Colloques,* vol. 44, pp. (C1)211-(C1)216, 1983.

[33] M. D. J. R. P. Schmüser, Ultraviolet and Soft X-Ray Free-Electron Lasers - Introduction to Physical Principles, Experimental Results, Technological Challenges, Springer, 2009.

[34] H. Onuki e P. Elleaune, Undulators, wigglers and their applications, Taylor & Francis Inc., 2003.

[35] J. A. Clarke, "The science and Technology of Undulators and Wigglers.," Oxford Science Publications, 2004.

[36] P. Schmüser, M. Dohlus, J. Rossbach e C. Behrens, Free-Electron Lasers in the Ultraviolet and X-Ray Regime, Springer, 2014.

[37] K. Mess, "Accelerator Control," *Computer Physiscs Communications,* vol. 61, pp. 115-132, 1990.

[38] D. Gurd, S. O. O. Ridge, TN e USA, "Accelerator Control and Global Networks - State of the Art," em *Proceedings of LINAC 2004*, Lübeck, 2004.

[39] F. Lenkszus, "State-of-the-art developments in accelerator controls at the APS," em *Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference*, New York, 1999.

[40] E. S. McCrory, O. Krivosheev, L. Michelotti e J.-F. Ostiguy, "Modeling of the Fermilab Accelerators," em *International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems*, Trieste, 1999.

[41] C. Stern, E. Olsson, M. Kroupa e R. Westervelt, "A Control System for Accelerator Tuning Combining Adaptive Plan Execution with Online Learning," em *Proceedings of the 17th IEEE Particle Accelerator Conference*, Voncouver, 1997.

[42] B. Frammery, "The LHC Control System," em *10th ICALEPCS Int. Conf. on Accelerator & Large Expt. Physics Control Systems*, Geneva, 2005.

[43] J. Patrick, "Evolution of the Fermilab Control System," em *Proceedings of ICALEPCS2003*, Gyeongju, 2003.

[44] A. Daneels e W. Salter, "What is SCADA?," em *International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems*, Trieste, Italy, 1999.

[45] D. Bailey e E. Wright, "Practical SCADA for Industry," Perth, Elsevier, 1995.

[46] A. S. Tanenbaum, "Computer Networks," Amsterdam, Prentice-Hall International, Inc., 1989.

[47] IEEE Nuclear and Plasma Sciences Society, "IEEE Standard Modular Instrumentation and Digital Interface System (CAMAC)," 1982.

[48] National Instruments Corporation, "O que é PXI?," [Online]. Available: http://www.ni.com/pxi/whatis/pt/. [Acesso em 23 Junho 2014].

[49] W. Boyes, "Instrumentation Reference Book," Washington, Walt Boyes Editor, 2002.

[50] B. R., B. M. Neil, A. C. J. Paes, L. d. Salvo e R. Galvão, "A Far Infrared Super Radiant FEL," *Int J Infrared Milli Waves,* vol. 28, pp. 699-704, May 2007.

[51] M. Tecimer, *Thesis - TIME - Domain Analysis and technology of THz - Free Electron Lasers,* Tel-Aviv, 2004.

[52] A. W. Chao e M. Tigner, "Handbook of Accelerator Physics and Engineering," World Scientific Publishing Co., 1999.

[53] National Eletrostatic Corp., "Labs with Pelletrons," December 2009. [Online]. Available: http://www.pelletron.com/link2.html. [Acesso em 05 August 2015].

[54] M. K. Sundaresan, "Handbook of Particle Physics," CRC Press, 2001.

[55] F. Hinterberger, "Eletrostatic accelerators," *CAS - CERN Accelerator School and KVI: Specialised CAS Course in Small Accelerators,* pp. 95-112, 24 Maio 2005.

[56] R. J. Van de Graaff, "Tandem Eletrostatic Accelerator," *Nuclear Instruments and Methods 8,* pp. 195-202, 1960.

[57] B. Reinard e W. B. Herrmannsfeldt, "The design of Electron and Ion Guns," *Proc. EBIS Symposium,* 2004.

[58] A. Moutinho, M. E. S. Fronteira e S. M. A. I. Cunha, "Tecnologia de Vácuo," Lisboa, Universidade nova de lisboa, 1980.

[59] R. Caetano, Dispositivos Magnéticos de um Laser de Elétrons Livres Realimentado, Rio de Janeiro, RJ: Dissertação de mestrado profissionalizante - CBPF, 2015.

[60] BiRa Systems Inc., "Model 6700 Powered CAMAC Crate (700 Watts)," [Online]. Available: http://www.bira.com/products/camac/7700.pdf. [Acesso em 23 Junho 2014].

[61] KineticSystems Corporation, "Model 3988-G3A/D3A GPIB Crate Controller," Dezembro 1997. [Online]. Available: http://www.kscorp.com/support/secure/manuals/3988.pdf. [Acesso em 23 Junho 2014].

[62] KineticSystems Company, LLC, "Model 3516-C1B 32-channel, Scanning A/D Converter Instruction Manual," 26 Abril 2005. [Online]. Available:

http://www.kscorp.com/support/secure/manuals/3516C1B.pdf. [Acesso em 23 Junho 2014].

[63] Hytec Eletronics Ltd., "Multiple Output 2 x 16 Channel DAC 648 16 Bit DAC," [Online]. Available: http://www.hytec-electronics.co.uk/DataSheetHtml/648.html. [Acesso em Junho 23 2014].

[64] National Instruments Corporation, "High Performance GPIB Interfaces for ISA," [Online]. Available: http://www.ni.com/pdf/products/us/4gpib672-674.pdf. [Acesso em 23 Junho 2014].

[65] National Instruments Corporation, "PC-DIO-96/PnP User Manual," Setembro 1996. [Online]. Available: http://www.ni.com/pdf/manuals/320289c.pdf. [Acesso em 23 Junho 2014].

[66] ACCES I/O products inc, "Model A1216E User Manual," [Online]. Available: http://accesio.com/MANUALS/A1216E.PDF. [Acesso em 23 Junho 2014].

[67] Access I/O products inc, "Model D/A12-16(8) User Manual," [Online]. Available: http://accesio.com/MANUALS/DA1216.PDF. [Acesso em 23 Junho 2014].

[68] ACCES I/O products, inc., "PTRC-AT ISA BUS Expansion Kit," [Online]. Available: http://accesio.com/go.cgi?p=../isa/ptrc_at.html. [Acesso em 23 Junho 2014].

[69] Marvin Test Solutions, Inc., "GX7100 Series," [Online]. Available: https://www.marvintest.com/PXI/Products/PXI-Chassis-3U-6U-Chassis-GX7100-GX7100-Series.aspx. [Acesso em 23 Junho 2014].

[70] I. Marvin Test Solutions, "GX7924 - 6U Core 2 Duo 2.16GHz PXI Controller," [Online]. Available: https://www.marvintest.com/Product.aspx?model=GX7924. [Acesso em 23 Junho 2014].

[71] National Instruments Corporation, "PXI Specification Tutorial," 16 Julho 2012. [Online]. Available: http://www.ni.com/white-paper/2877/en/pdf. [Acesso em 23 Junho 2014].

[72] KineticSystems Company, LLC, Model CP266 Single-width, 6U CompactPCI User's Manual, 2006.

[73] DynamicSignals, LLC, Model CP213 32/64/128-Channel, 16-bit CompactPCI/PXI ADC User's Manual, 2007.

[74] IVI foundation, *VXI Systems Alliance - VPP-4.3: The VISA Library*, 2015.

[75] D. A. Muller, E. J. Kirkland, M. T. G., J. L. Grazul, L. Fitting e M. Weyland, "Room design for high-performance electron microscopy," *Ultramicroscopy*, vol. 106, pp. 1033-1040, October–November 2006.

[76] JEOL, "Glossary of TEM terms," [Online]. Available: http://www.jeol.co.jp/en/words/emterms/search_result.html?keyword=field. [Acesso em 01 10 2015].

[77] D. A. Muller e J. Grazul, "Optimizing the enviropment for sub-0.2 nm scanning transmission electron microscopy," *Journal of electron Microscopy*, pp. 219-226, 2001.

[78] PNI Sensor Corporation, "MicroMag User Manual," March 2010. [Online]. Available: http://www.precisionnav.com/system/files/MicroMag%20User%20Manual.pdf. [Acesso em 4 February 2014].

[79] P. Ripka, "Magnetic Sensors and Magnetometers," London, Artech House, 2001, pp. 350-367.

[80] STMicroeletronic, "TN0897 - Techical Note - ST SPI protocol.," Septenber 2013. [Online]. Available: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/technical_note/DM00054618.pdf. [Acesso em 04 february 2014].

[81] Atmel Corporation, "ATmega328 datasheet," 10 2009. [Online]. Available: http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf. [Acesso em 15 julho 2014].

[82] Melexis, "MLX90215 Position Programmable Linear Hall Effect Sensor," November 2012. [Online]. Available: http://www.melexis.com/Asset/MLX90215-Datasheet-DownloadLink-4758.aspx. [Acesso em 08 August 2015].

[83] National Instruments, "DAQ 6023E/6024E/6025E User Manual," 2000.

[84] National Instruments, "PXI 1056 3U/6U Chassis Dividers," 01 11 2013. [Online]. Available: http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/A536AF9E393B19FF8625719B007ECEB2. [Acesso em 06 August 2015].

ANEXO A – Sistema de Controle FEL-CREOL

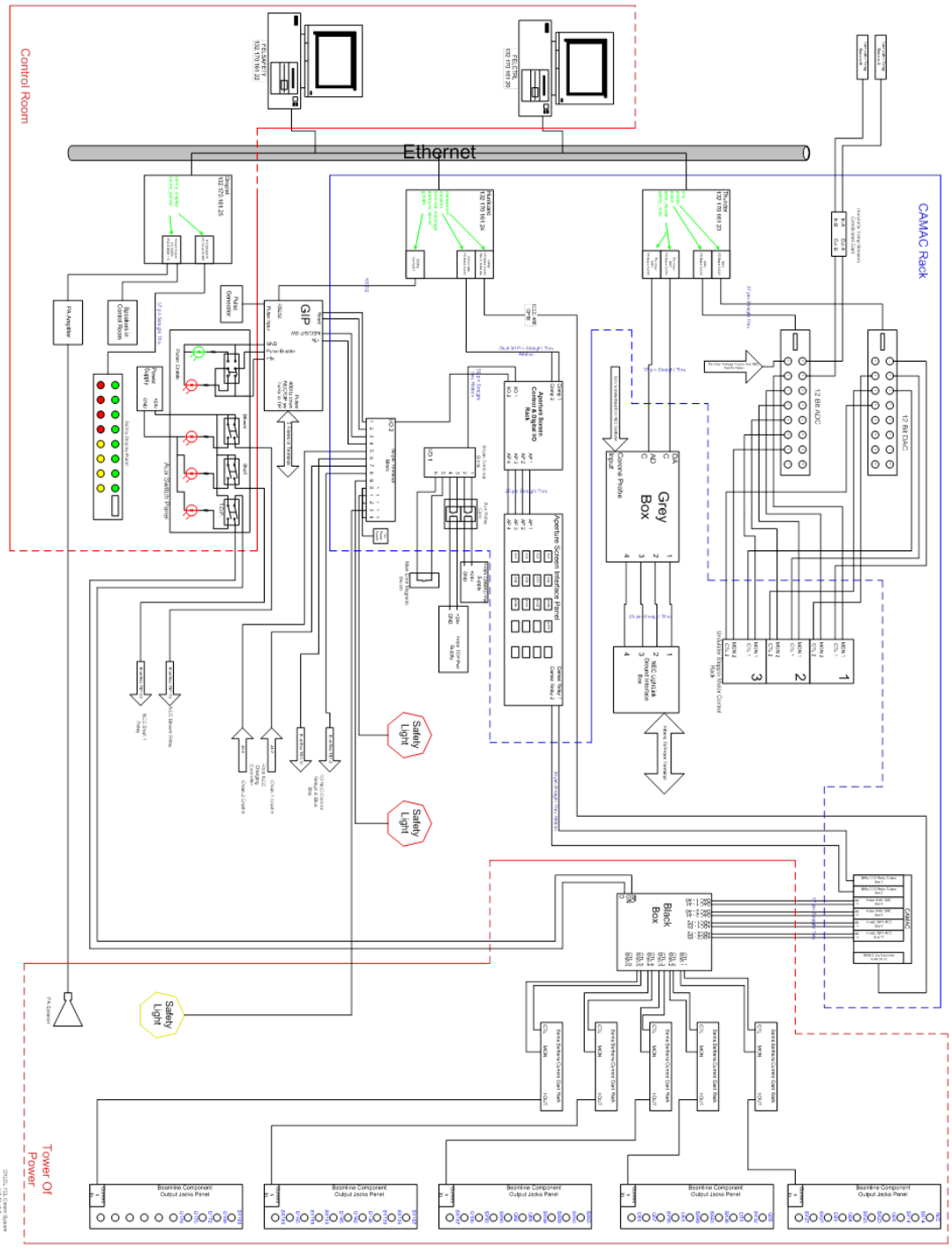

Diagrama obtido nos arquivos do FEL-CREOL

ANEXO B – Banco de Dados do Sistema de Controle

Cada registro da tabela deste banco de dados possui 12 campos (colunas), conforme a Figura 44. O primeiro campo (“*name”*) possui 21 caracteres e é o campo do nome do registro, cujo registro representa um elemento de controle ou monitoramento do laser. Por exemplo: O registro representado pelos caracteres *“PXI_ADC_09”* contém as informações do canal 9 do módulo ADC instalado no PXI.

O segundo campo, *“state”*, mostra a situação atual do dispositivo. Se o dispositivo ao qual o registro está associado estiver operacional o *“state”* dele valer “1”, se estiver desligado “0”.

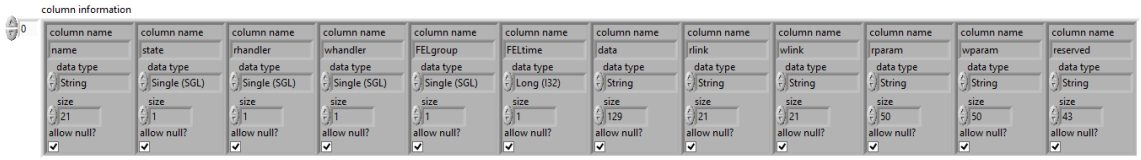

Figura 44 – Formato das colunas na tabela “FEL” do novo banco de dados.

Os campos *“rhandler”* e *“whandler”* informam uma possível conversão do campo *“data”* que será realizada pelo programa servidor central para facilitar a leitura/escrita dos dados pelo usuário dependendo dos parâmetros informados pelo *“rparam”* e *“wparam”*. Se estes códigos não existirem no registro, o servidor central retorna ou escreve os dados brutos contidos no campo “data”. Os parâmetros possíveis para *“rparam”* e *“wparam”* estão na Tabela 12 e na Tabela 13.

Tabela 12 – Códigos e parâmetros "rhandler" e "rparam".

Código “rhandler”	**Formato do parêmetro “rparam”**	**Descrição**
1	LS:HS:S_ZV:LV:HV	Converte os dados em escala linear de LS até HS com passagem pelo zero em S_ZV. Os dados podem assumir valores de LV até HV.
5		Converte dados de 16 bits para um valor em ASCII de -10 até +10 com 4 casas decimais
6		Converte um valor em ASCII de -10 até +10 com 4 casas decimais em dados de 16 bits.
10	“down”=rparam “middle”=rparam+1 “up”=rparam+2.	Converte dados em “down”, “middle” ou “up”, determinados pelo valor em “rparam”
11	“closed”=rparam “open”=rparam+1 “UNDETERMINED”=rparam+2.	Converte os dados em “closed”, “open” ou “UNDETERMINED”, determinados pelo valor em “rparam”
30		Converte o dado binário (0 ou 1) em “enabled” ou “disabled”

Tabela 13 – Códigos e parâmetros "whandler" e "wparam".

Código “whandler”	Formato do parêmetro “wparam”	Descrição
1	LS,HS,S_ZV,LV,HV	Colocar os dados em escala linear de LV até HV com passagem pelo zero em S_ZV. Os dados podem assumir valores de LS até HS.
500		Converte um valor em ASCII de -10 até +10 com 4 casas decimais em dados de 16 bits.
30		Converte “enabled” ou “disabled” em um dado binário (0 ou 1).

O campo *“FELgroup”* representa o grupo de registros ao qual o registro pertence. Por exemplo: O grupo 1 pode representar a leitura de todos os canais de uma placa ADC, ou seja, cada canal de uma placa ADC possui um registro e estes registros possuem em comum o grupo.

O campo *“FELtime”* guarda a informação com uma marca de tempo da última vez que este registro foi atualizado. A marca de tempo é uma função disponível em várias linguagens de programação que, normalmente, retorna um valor em segundos desde as 00:00 horas do dia 1 de janeiro de 1970 até o momento em que a função é solicitada.

Os campos *“rlink”* e *“wlink”* representam os links de leitura e escrita que estão associados ao registro. Estes links servem para facilitar a compreensão dos registros, sem que precise ser lembrado onde o elemento está conectado fisicamente. Por exemplo: O registro de nome *“beamline_dp2*” pode facilmente ser associado ao Dipolo 2 que está no caminho óptico do feixe. Este registro possui como links de escrita o campo *“PXI_DAC_7”* e como link de leitura o campo *“PXI_ADC_14”*. Os registros *“PXI_DAC_7”* e *“PXI_ADC_14”*, podem ser interpretados como os canais 7 e 14 das placas DAC e ADC que estão instaladas no PXI. Estas placas controlam (*PXI_DAC_7*) e monitoram (*PXI_ADC_7*) a corrente do Dipolo. Quando o usuário pede uma informação de leitura com nome de registro *“beamline_dp2”* o servidor encontrará um link de leitura associado a este registro e fará uma nova pesquisa, agora ao registro *“PXI_ADC_14”*, e retornará os dados deste segundo registro. De forma semelhante, se o usuário requisitar escrita de dados ao registro de nome *“beamline_dp2”*, o servidor encontrará no banco de dados um link de escrita direcionado ao registro *“PXI_DAC_7”* e então o servidor localizará este registro e escreverá os dados recebidos neste segundo registro.

Além destes campos, um campo de 43 caracteres foi reservado para futuras implementações. Nas figuras abaixo estão os diagramas base desenvolvidos em LabVIEW para a comunicação com o Banco de Dados.

Na Figura 45 está representado o diagrama do programa em LabVIEW utilizado para construir uma tabela no Banco de Dados do Sistema de Controle.

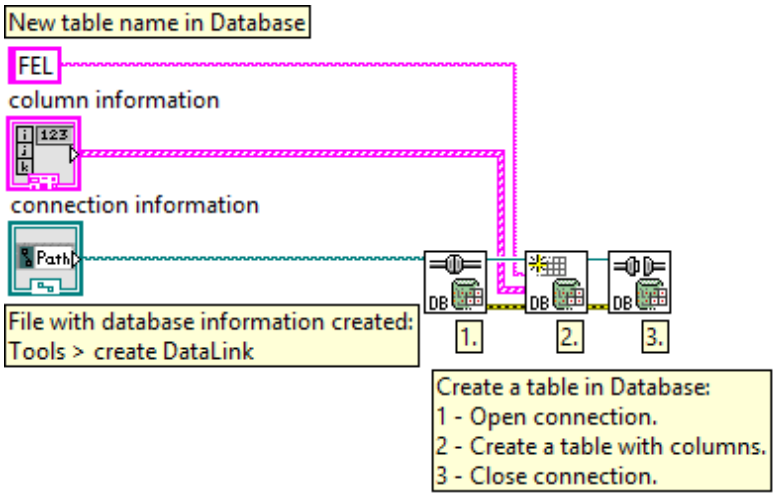

Figura 45 – Utilizando o LabVIEW para criar uma tabela em um Banco de Dados.

Na Figura 46 está representado o diagrama para realizar atualizações nos registros do Banco de Dados.

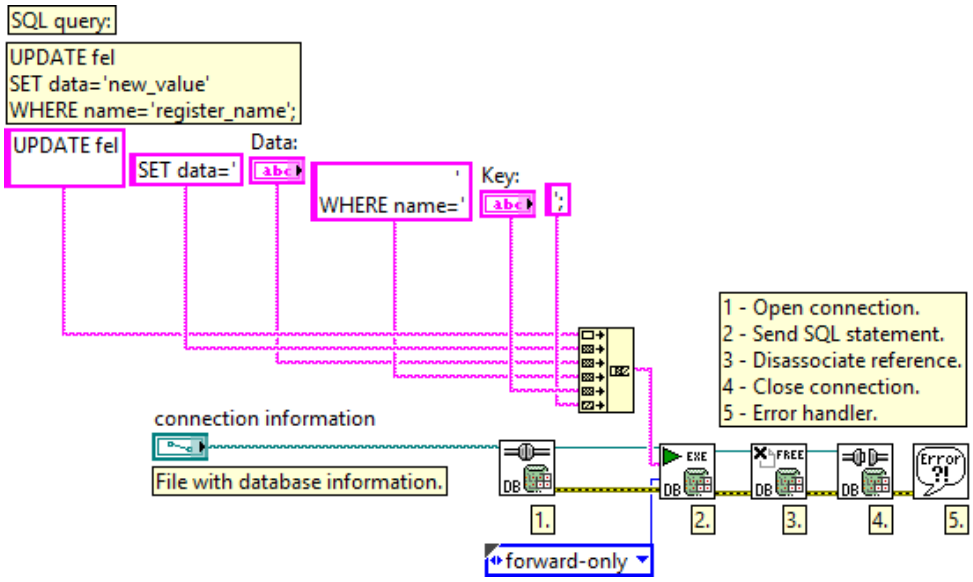

Figura 46 – Atualização de um registro no banco de dados utilizando a linguagem SQL e o LabVIEW.

Na Figura 47 está representado o diagrama utilizado para realizar leitura no banco de Dados do Sistema de Controle.

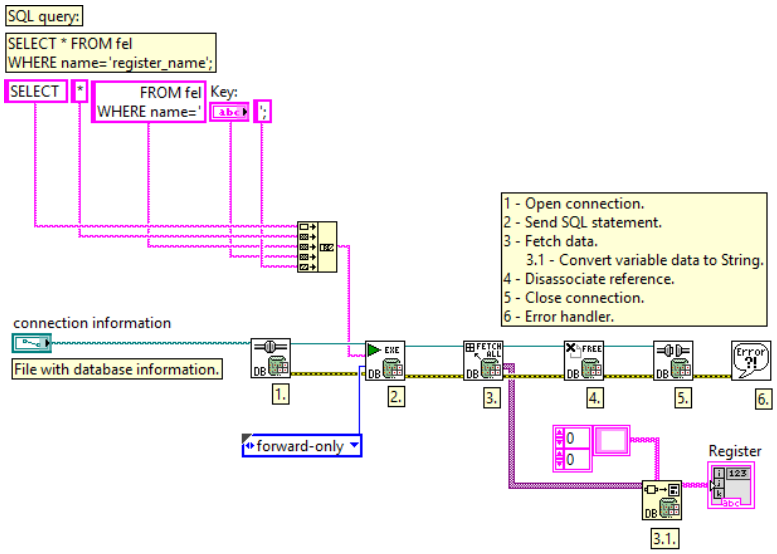

Figura 47 – Leitura de um registro no banco de dados utilizando a linguagem SQL e LabVIEW.

O formato do Banco de Dados e a modularização do sistema permite a atualização incremental do projeto, pois os elementos de hardware são relacionados a registros na base de dados.

ANEXO C – Diagramas dos módulos DAC e ADC

Para realizar uma leitura no módulo CP213 utilizando a DLL fornecida pelo fabricante é necessário chamar a função *ks213_init* para inicializar o módulo e informar a taxa de aquisição com as funções *ks213_setConversionClock* e *ks213_setScanClockRate*. Estas funções definem a precisão das medidas que serão realizadas nos módulos ADC, quanto mais rápido forem as medidas menor será a precisão. É preciso informar também os limites de tensão que serão lidos pelo módulo com a função *ks213_setAnalogChannelInputVoltageRange* esta limitação é importante para acelerar o processo de varredura dos canais. A varredura nos canais é realizada com a função *ks213_getScans*. Estas funções podem ser acessadas pelo LabVIEW através de alguns *"virtual instruments"*.

Na Figura 48 temos o diagrama de blocos utilizado para fazer a varredura dos canais deste módulo utilizando o LabVIEW.

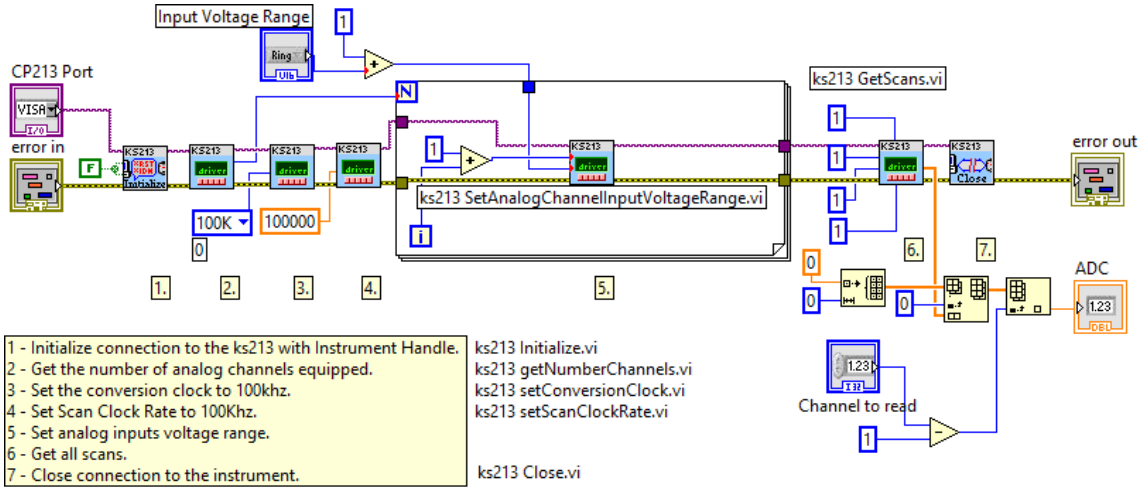

Figura 48 – Diagrama de blocos utilizado para fazer uma varredura pelos canais da ADC à taxa de 100Khz.

Para o módulo **CP266** também foi fornecida uma DLL e para alterar a tensão na saída de um canal é necessário inicializar o módulo com a função *ks266_init* e definir a tensão que será colocada no canal com a função *ks266_set_single_chan_voltage*, estas funções também podem ser acessadas pelo LabVIEW através de alguns *"virtual*

intruments" fornecidos. Na Figura 49 é apresentado o diagrama de blocos utilizado para alterar a tensão de um dos canais do módulo **CP266**.

Além de ler as tensões do módulo **CP213**, o servidor de hardware deste módulo precisa escrever continuamente no banco de dados em registros diferentes as informações de cada canal deste módulo. O processo de escrita no banco de dados foi detalhado na Figura 46. Os nomes dos registros definidos para este módulo obedecem a seguinte sintaxe:

PXI_DAC_XX, onde XX representa o número do canal de 01 a 64.

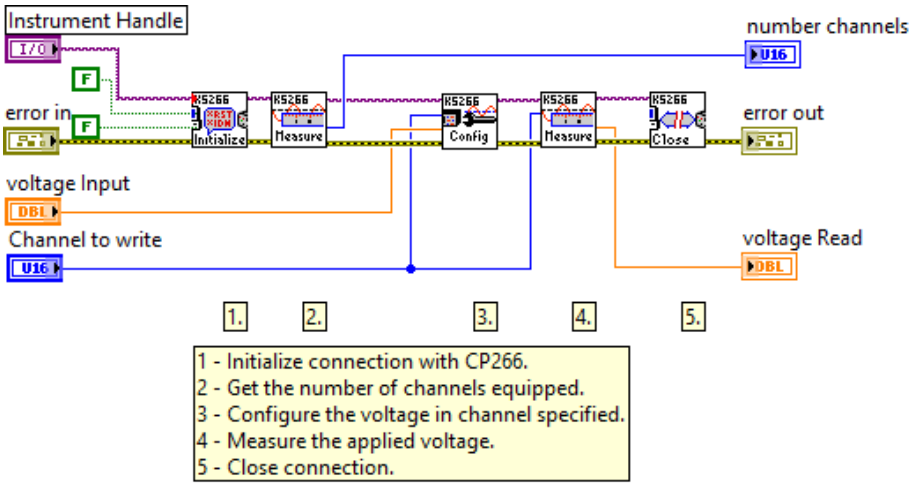

Figura 49 – Diagrama de blocos utilizado para mudar a tensão de saída de um canal do módulo PXI CP266.

A atualização dos parâmetros de hardware no Banco de Dados do sistema depende das configurações do dispositivo e da operação do FEL.

ANEXO D – Diagrama do protocolo de comunicação

Para enviar um comando de leitura (“R”) ou de escrita (“W”) no banco de dados do sistema de controle através do servidor principal (CCS) é utilizado um diagrama de blocos semelhante ao que está disponível na Figura 50.

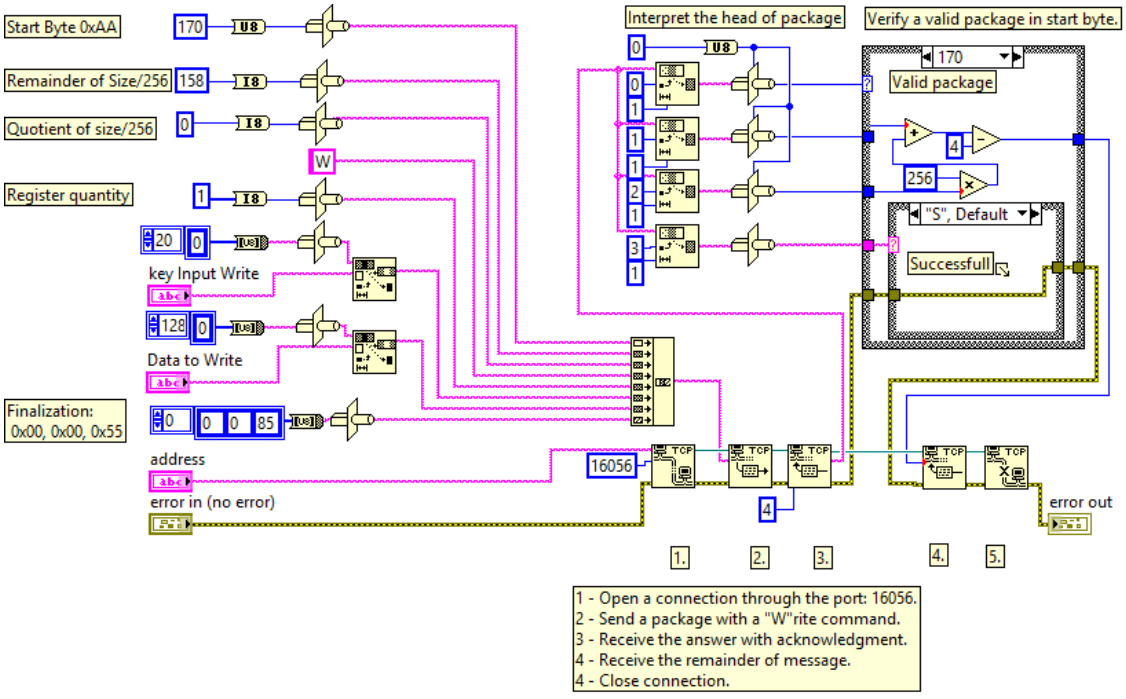

Figura 50 – Diagrama de blocos do programa LabVIEW utilizado para escrita de um registro no banco de dados do sistema de controle.

Com este diagrama é possível atualizar os registros do banco de dados mediante comunicação TCP/IP com o servidor principal (CCS – *server*). Na variável “*Key Input Write*” podem ser colocados os nomes dos registros que serão atualizados.

ANEXO E – Firmware do instrumento de monitoramento magnético

```
/*
MicroMag3 Interface

Este programa utiliza comunicação SPI para se comunicar com
um módulo MicroMag3 instalado em um Arduino UNO e
é utilizado em conjunto com uma aplicação desenvolvida em LabVIEW
para analisar, obter espectros e processar as informações de
campo magnético nos eixos XY e Z. Para isto, o AtMega328 envia
as informações de campo magnético e tempos de captura dos sinais,
para a realização de FFT's no LabVIEW.

versão do compilador: 1.0.5-r2
Data: 01/09/2015
Autor: João Manoel B. Pereira
*/

#include "Spi.h" //Esta biblioteca eh necessaria para a troca de informa
                 //coes, desenvolvida por Ted Carancho - www.AeroQuad.info

// Parametros dos pinos do microcontrolador utilizados para a comunicacao
// com o MicroMag3
#define RESET 8
#define DRDY 9
#define WAIT 3
#define XAXIS 0
#define YAXIS 1
#define ZAXIS 2

//Este parametro determina a quantidade de pontos que serah enviada por pacote
// de informacoes ao LabVIEW. Para futuras versoes: Incluir como variavel no
Lab
// VIEW.
#define lenght 90

int x[lenght];        // Vetor com o campo magnetico que serah enviado X
int y[lenght];        // Vetor com o campo magnetico que serah enviado Y
int z[lenght];        // Vetor com o campo magnetico que serah enviado Z
float heading = 0;
// Vetores com os tempos de aquisicao entre as medidas
unsigned long timeX[lenght], timeY[lenght], timeZ[lenght];
byte conf; //Variavel de configuracao do MicroMag3

String inputString = "";
boolean stringComplete = false;

int readAxis(byte axis){
int measurement;

digitalWrite(RESET, HIGH);
delayMicroseconds(WAIT);
digitalWrite(RESET, LOW);

// Envia um byte de comando (axis), favor olhar a documentacao do MicroMag3

Spi.transfer(axis);

while(digitalRead(DRDY) == LOW);
return (Spi.transfer(0xFF) << 8) | Spi.transfer(0xFF);
}

void setup() {
Serial.begin(115200); //Comunicacao serial em 115200
pinMode(DRDY, INPUT);
pinMode(RESET, OUTPUT);
digitalWrite(RESET, LOW);

inputString.reserve(100);
conf = 0x70;
```

```
}

void loop() {

 if (stringComplete) {

   //Interpreta os parametros de configuracao do LabVIEW
    switch (inputString[0]) {
      case  '0':
      conf = 0x00;
      break;
      case '1' :
      conf = 0x10;
      break;
      case '2':
      conf = 0x20;
      break;
      case '3' :
      conf = 0x30;
      break;
      case '4' :
      conf = 0x40;
      break;
      case '5':
      conf = 0x50;
      break;
      case '6':
      conf = 0x60;
      break;
      default :
      conf = 0x70;
      break;
    }

    //Requisita as medidas e tempos
    for (int i=0;i<lenght;i++) {
      timeX[i]=micros();
      x[i] = readAxis(conf + 0x01);
      timeX[i]=micros()-timeX[i];

      timeY[i]=micros();
      y[i] = readAxis(conf + 0x02);
      timeY[i]=micros()-timeY[i];

      timeZ[i]=micros();
      z[i] = readAxis(conf + 0x03);
      timeZ[i]=micros()-timeZ[i];
    }

    //Envia as informacoes para a porta Serial
   for (int i=0;i<lenght;i++) {
    Serial.print(x[i]);
    Serial.print(",");
    Serial.print(timeX[i]);

    Serial.print(",");

    Serial.print(y[i]);
    Serial.print(",");
    Serial.print(timeY[i]);

    Serial.print(",");

    Serial.print(z[i]);
    Serial.print(",");
    Serial.println(timeZ[i]);
   }

    stringComplete = false;

    inputString = "";
 }

}

//Verifica se existe alguma requisicao na porta serial
```

```
void serialEvent() {
  while (Serial.available()) {
    char inChar = (char)Serial.read();
    inputString += inChar;
    if (inChar == '\n') {
      stringComplete = true;
    }
  }
}
```