

## Desenvolvimento de um sistema SCADA para operação de um Laser de Elétrons Livres

*Development of a SCADA system for a Free Electron Laser operation*

João Manoel Barbosa Pereira\*

*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCTI Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil.  
Pontifícia Universidade Católica – PUC/RJ Rua Marquês de São Vicente, 225 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil*

Rubem Caetano<sup>†</sup>

*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCTI Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/Macaé Av. Aluizio da Silva Gomes, 50 – Macaé – RJ – Brasil.*

Ricardo M. O. Galvão<sup>‡</sup>

*Instituto de Física USP – IF USP Rua do Matão, Travessa R, 187 – São Paulo – SP – Brasil.*

Geraldo Cernicchiaro<sup>§</sup>

*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCTI Rua Dr. Xavier Sigaud,  
150 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil.*

*Submetido em 18/09/2015*

**Resumo:** Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de Controle Supervisório e de Aquisição de Dados (*Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA*) para a operação de um Laser de Elétrons Livres (*Free Electron Laser – FEL*) [1] baseado em uma rede Intranet e na linguagem gráfica LabVIEW. O FEL é uma fonte de radiação eletromagnética monocromática, coerente, intensa e sintonizável produzida através da interação de um feixe de elétrons relativísticos com um campo magnético estático ondulado [2]. A operação de um FEL envolve o controle e teste de diversos transdutores (sensores e atuadores) responsáveis pelo transporte, monitoramento e centralização do feixe de elétrons e da qualidade da radiação laser. Os sistemas SCADA se apresentam especialmente adaptados para processos, de média a grande complexidade, que demandam supervisão, escalabilidade, modularidade, monitoramento, automação de processos remotos e conectividade a bancos de dados. O trabalho aqui apresentado visa contribuir para elaboração de uma proposta para construção de um FEL no país, o *Brazilian Free Electron Laser – BraFEL* [3].

**Palavras chave:** SCADA, FEL, Laser de Elétrons Livres, Sistema de Controle, Intranet, LabVIEW, Automação.

**Abstract:** This paper presents the development of a Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) for Free Electron Laser – FEL [1] operation, based on an Intranet network and LabVIEW graphical language. The FEL is a monochromatic, coherent, intense and tunable electromagnetic radiation source produced through the interaction of a relativistic electron beam with undulated magnetic field [2]. An operating FEL involves the control and test of various transducers (sensors and actuators) required for transport, monitoring and centralization of the electron beam and laser radiation quality. SCADA systems are specially adapted for medium to high complexity processes, requiring supervision, scalability, modularity, monitoring, remote processes automation and connectivity to databases. The work presented here aims to contribute to a proposal for development of a FEL in Brazil, the *Brazilian Free Electron Laser – BraFEL* [3]

**Keywords:** SCADA, FEL, Free Electron Laser, Control System, Intranet, LabVIEW, Automation.

## 1. INTRODUÇÃO

Um Laser de Elétron Livres [1], ou FEL, é um sistema relativamente complexo, para geração de radiação laser sintonizável. A amplificação óptica é obtida a partir de um dispositivo magnético de inserção, denominado Ondulador. Este dispositivo é construído de modo a apresentar, em seu eixo axial, um campo magnético ondulado que deflexiona periodicamente a trajetória de um feixe de elétrons relativístico gerado por um Acelerador Eletrostático.

O feixe de elétrons é conduzido, injetado e extraído do Ondulador por meio de campos magnéticos produzidos por transdutores eletromagnéticos, tipo solenoide, tais como Dipolos e Quadrupolos [4]. Conforme ilustrado no diagrama da Figura 1, os Dipolos permitem controlar a deflexão do feixe de elétrons e os Quadrupolos permitem corrigir a divergência do feixe, atuando de forma análoga a lentes ópticas [4,5]. Os campos magnéticos produzidos por esses dispositivos são determinados por sua geometria e controlados através de sua corrente elétrica de alimentação.

O feixe de elétrons se propaga dentro de uma linha de vácuo, de forma a aumentar seu livre caminho médio, minimizando perdas devido ao espalhamento do feixe com moléculas do gás de fundo.

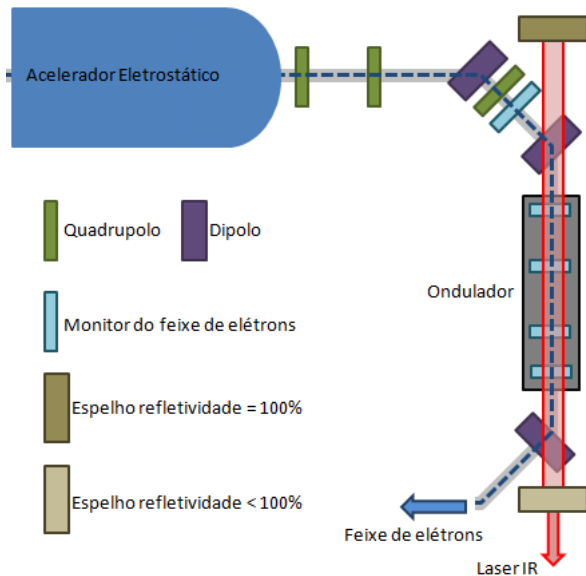


Figura 1 – Esquema do sistema de geração, transporte e injeção do feixe de elétrons no Ondulador de um FEL.

O Ondulador, conforme o esquema representado na Figura 2, é um dispositivo de inserção que apresenta no seu eixo axial um campo magnético estático com ondulação periódica, de período  $\lambda_u$ , constituído por um conjunto de magnetos dispostos alternadamente. O feixe de elétrons relativístico, indicado pela linha em azul, interage com o campo magnético periódico do Ondulador emitindo radiação eletromagnética,

representada pela seta vermelha.

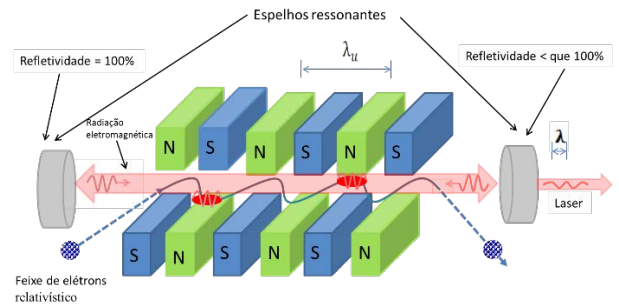


Figura 2 – Esquema simplificado do Ondulador e do mecanismo de funcionamento de um FEL [6].

A equação fundamental de um Laser de Elétron Livres, (1) relaciona o comprimento de onda  $\lambda$  da radiação eletromagnética emitida ao comprimento de onda  $\lambda_u$  e a amplitude  $B_0$  (associados ao campo magnético característico do Ondulador), ao fator de Lorentz  $\gamma$  (associado à energia do feixe de elétrons) e ao parâmetro do ondulador  $K$  (relacionado com a configuração do dispositivo).

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

As outras constantes são  $c$ , a velocidade da luz no vácuo,  $e$  e  $m$ , respectivamente, a carga e a massa do elétron [2].

Conforme o esquema simplificado da Figura 2, quando o feixe de elétrons é injetado no Ondulador, o campo magnético perpendicular à trajetória do feixe, provoca uma deflexão nos elétrons devido à força de Lorentz. Deste modo, os elétrons do feixe relativístico realizam uma trajetória com oscilação periódica no plano, acompanhando o campo magnético ao longo deste eixo, emitindo radiação eletromagnética colimada. A radiação eletromagnética emitida, de comprimento de onda  $\lambda$ , é resultado da interação do feixe de elétrons relativístico com o campo magnético periódico e o modo eletromagnético excitado no próprio feixe de elétrons. Uma cavidade ressonante, formada por um espelho e um semi-espelho, atua criando no eixo óptico uma onda estacionária que interage com o feixe de elétrons, retroalimentando a coerência do feixe [2]. O semi-espelho apresenta transmitância, da ordem de 1 a 2 por cento no comprimento de onda da radiação laser permitindo a sua extração do dispositivo.

Na Figura 3, apresentamos o esquema dos elementos de controle da óptica do feixe de elétrons do sistema proposto. Apenas nos restringindo aos aspectos de produção, transporte e injeção do feixe de elétrons no Ondulador, e o seu eventual reaproveitamento no caso de sistemas realimentados, podemos constatar que o sistema requer o controle de diversos parâmetros e dispositivos físicos, listados a seguir:

- Canhão de elétrons.
- Acelerador Eletrostático.
- 8 Dipolos, 11 Quadrupolos e 17 Defletores.
- Bombas e medidores de vácuo.
- 14 Monitores do feixe de elétrons.

\*Electronic address: joaoman@gmail.com

†Electronic address: rcaetano@gmail.com

‡Electronic address: rgalvao@if.usp.br

§Electronic address: gerald@cbpf.br

A configuração e o monitoramento individual dos dispositivos de controle da óptica do feixe de elétrons demandam um gerenciamento automatizado de certa complexidade e, conseqüentemente, uma arquitetura para o Sistema de Controle de mesma ordem.

Neste trabalho discutimos as principais características de um Sistema Supervisório visando contribuir para o projeto, desenho e construção de um Laser de Elétrons Livres do tipo Realimentado. O Sistema de Controle proposto apresenta uma arquitetura modular e escalonável, o que permite sua adaptação para outras aplicações de mesmo porte. O projeto é baseado em um sistema anterior, implementado no *Center for Research and Education in Optics and Lasers - University of Central Florida (CREOL [7], que operou de 1997 a 2001.* Parte dos objetivos deste trabalho foi construir as ferramentas e protocolos de teste e caracterização dos componentes do FEL-CREOL, visando o reaproveitamento destes elementos no projeto de um novo FEL, para operar na faixa do THz. Realçamos que existem diversos laboratórios de FEL em operação ou em construção em diversas partes do mundo, porém nenhum na América Latina [8].

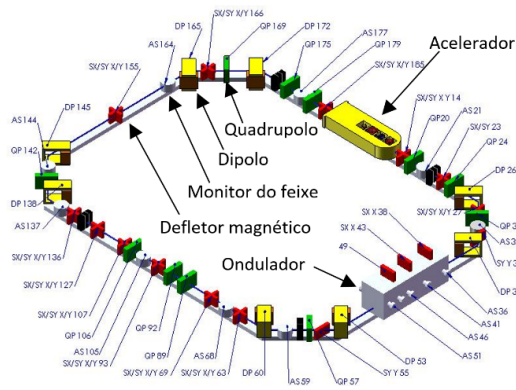


Figura 3 – Diagrama dos principais dispositivos do sistema controle do feixe de elétrons de um FEL realimentado: Dipolos, Acelerador, Defletores magnéticos, Quadrupolos, Ondulador e Monitores do feixe.

De modo simplificado, um Sistema de Controle computadorizado é dividido em duas partes complementares: Hardware e Software. O Hardware é a parte física do Sistema e é responsável pela conversão de processos programados por software em ações de controle e monitoramento. Engloba todos os transdutores, computadores, interfaces, módulos de expansão, componentes eletrônicos e circuitos elétricos. O Software é responsável pelo processamento das informações supervisórias e por executar algoritmos para controle, diagnóstico e automação de processos através de protocolos específicos.

## 2. SISTEMA SCADA

Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados, SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) é a denominação técnica para o corpo de programas que apresentam uma arquitetura específica voltada para monitorar, controlar e

supervisionar os processos e subprocessos, que envolvam múltiplos parâmetros e variáveis [9]. Os dispositivos e equipamentos que realizam os processos de controle e monitoramento são conectados através de controladores (*drivers*). Neste contexto, os *drivers* são programas de computador dedicados para realizar as operações de comunicação com a função específica de tornar os elementos de hardware acessíveis ao Sistema Supervisório, permitindo o seu controle lógico.

Em princípio, um sistema SCADA deve permitir sua contínua atualização, apresentar robustez, modularidade e confiabilidade. Existem sistemas SCADA proprietários e comerciais disponíveis para várias plataformas e sistemas operacionais em grande parte concebidos para processos industriais. Experimentos científicos, no entanto, demandam por uma arquitetura mais aberta, escalonável e flexível. Isto nos levou a optar por desenvolver um sistema SCADA, (SCADA-FEL), mais adaptável para sistemas de médio porte, programado na linguagem LabVIEW [10,11], baseado em uma arquitetura modular, distribuída e interconectada através de uma rede local (LAN - *Local Area Network*). Sistemas distribuídos permitem paralelizar processos e interconectar diferentes plataformas, sistemas operacionais e dispositivos inteligentes [12].

Conforme ilustrado na Figura 4, 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 [9], e **Camada de Controladores**, que atua diretamente nos transdutores, circuitos e instrumentos através de *drivers* de hardware.

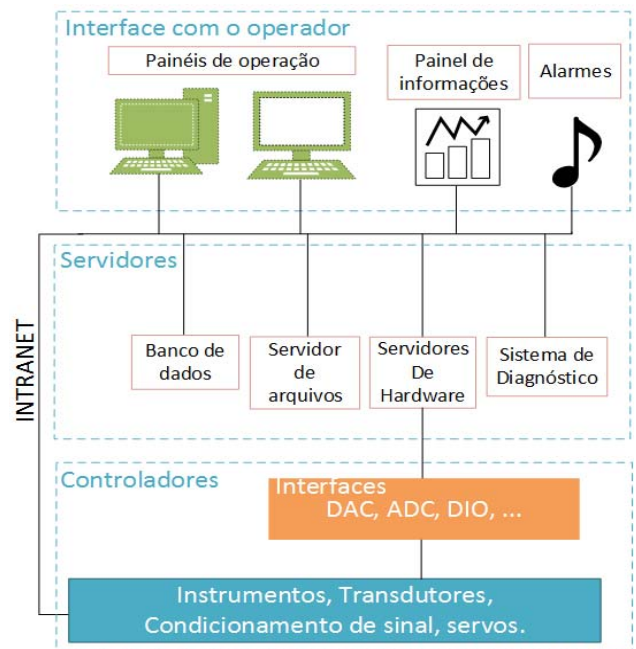


Figura 4 – Arquitetura de um sistema SCADA, dividido em três camadas: Interface com o operador, Servidores e Controladores.

## 2.1. Modelo OSI

A interconexão e comunicação entre os módulos do Sistema de Controle se processa pela utilização de interfaces e protocolos de comunicação.

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.

Neste projeto, adotamos o modelo OSI (*Open Systems Interconnect*). Este é um modelo de referência criado para definir um padrão para a comunicação entre sistemas computacionais e envolve a adoção de sete camadas conceituais [13] ilustradas em azul na Figura 5. 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**, onde estão definidos os parâmetros físicos da transmissão dos dados entre os sistemas de processamento.

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.

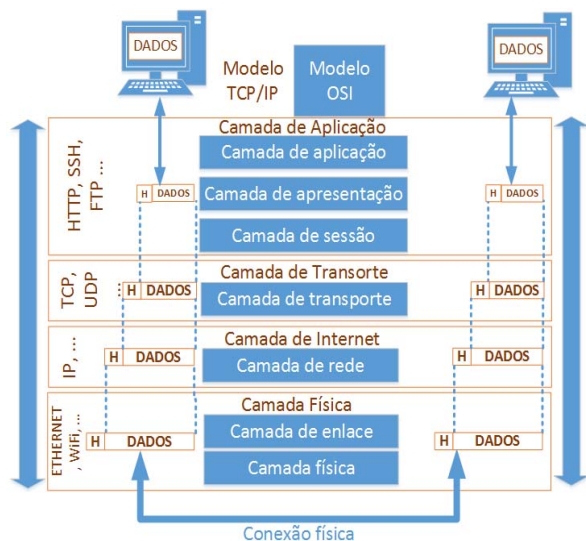


Figura 5 – Fluxo dos pacotes de dados entre as camadas de comunicação do modelo OSI (azul) e TCP/IP (marrom) (a letra “H” representa os cabeçalhos dos protocolos).

O modelo 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 5. Estes modelos permitem que um ele-

mento, ou módulo do processo, possa ser mais facilmente substituído, desde que atenda as especificações das camadas adjacentes.

## 2.2. Intranet

Neste contexto, Intranet se refere a uma rede local privada e protegida, baseada na arquitetura de rede Ethernet, denominada Intranet [14]. Esta rede é dedicada para o transporte de dados entre os computadores, workstations, servidores de arquivos, banco de dados e dispositivos inteligentes do sistema SCADA-FEL.

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*) [13]. O protocolo Ethernet está localizado na camada de enlace do modelo OSI e na camada física do modelo TCP/IP.

## 3. DESCRIÇÃO FÍSICA

A execução dos processos físicos de um Sistema de Controle é efetivada por Hardware: computadores, interfaces, instrumentos, sistemas de condicionamento de sinal, transdutores e atuadores. Estes sistemas podem ser compatíveis com diferentes plataformas de Hardware. Estas plataformas consistem em sistemas modulares que fornecem os meios físicos e a potência elétrica necessária para operar e interconectar os módulos através de barramentos padronizados. Os barramentos permitem a conexão dos dispositivos com sistemas de processamento e fazem parte dos protocolos de comunicação.

Alguns exemplos de plataformas de hardware projetadas para instrumentação são: CAMAC (*Computer Automated Measurement And Control*) [15], PXI (*PCI eXtensions for Instrumentation*) [16] e VXI (*VME eXtensions for Instrumentation*) [17].

O sistema CREOL, que serviu de base para este projeto utilizava a plataforma CAMAC. Esta plataforma foi muito utilizada no controle de sistemas de Física de Partículas, mas atualmente é uma tecnologia pouco acessível no mercado. Este trabalho é baseado na plataforma PXI, uma plataforma moderna, com diversos fornecedores e opções de hardware, que é utilizada para interconectar os módulos de controle e monitoramento.

O barramento PXI consiste em um aprimoramento do barramento PCI (utilizado em computadores convencionais – IBM/PC) para instrumentação. Este barramento foi desenvolvido para manter certo nível de compatibilidade e apresentar desempenho superior ao alcançado por computadores convencionais com foco em medição e automação. A plataforma PXI é dividida em três partes:

### • Controladora

É a unidade de controle de uma plataforma PXI utilizada para integrar os módulos da plataforma e permitir acesso externo através de protocolos de comunicação. Neste sistema a controladora utilizada é uma unidade embarcada de alto

desempenho, modelo Geotest – GX7924 *Controller*[18], descrita na Tabela 1, com Sistema Operacional Windows XP e ambiente de desenvolvimento LabVIEW.

<b>Processador</b>	Intel Core 2 Duo T7400 2,16GHz
<b>Ethernet</b>	3 portas Gigabit
<b>USB</b>	3 portas USB 2.0
<b>Memória RAM</b>	2 GBytes DDR2 expansível até 4GB
<b>Chipset</b>	E7520, 6300ESB
<b>On board interfaces</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SATA</li> <li>• CompactFlash II</li> </ul>
<b>Funções supervisórias e relógios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitor de temperatura</li> <li>• Controle dos coolers de ventilação</li> <li>• <b>RTC (Real Time Clock)</b></li> </ul>

Tabela 1 – Especificações da controladora PXI Geotest – GX7924.

### • 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 para a instalação dos módulos e da controladora da plataforma. O chassi PXI utilizado é fabricado pela Geotest (GEOTEST 7100A [19]). Neste chassi é possível instalar até 6 módulos PXI 6U (10,5 pol. ou 26,67cm), 7 módulos PXI compactos 3U (5,25 pol. ou 13,34cm) e uma controladora 6U. Possui também um drive de disco DVD-RW e um disco rígido de 150 Gigabytes embutidos para acesso direto da controladora; uma fonte de alimentação de 560W; sensores de temperatura e sistema de ventilação forçada. Na parte traseira do chassi há uma conexão RJ45 Ethernet e uma conexão USB.

### • Módulos

São dispositivos de hardware padronizados para a plataforma e acessíveis por *drivers*. Atualmente existem mais de 450 tipos de módulos para o barramento PXI[16]. Os módulos PXI utilizados neste trabalho são:

#### ◦ Módulo ADC CP213

Módulo Conversor Analógico Digital (ADC - *Analog to Digital Converter*) que possui 64 canais diferenciais com resolução de 16 bits, taxa de atualização que varia entre 0,0000232Hz e 100KHz, selecionável por software. O pulso de disparo (*trigger*) para início da amostragem pode ser interno (proveniente do barramento PXI) ou externo (através de um conector no painel da interface). Possui ganho programável (1 – 1000), o que permite mudar a escala de operação e dispõe de tensão de referência interna para calibração.

<b>Número de canais</b>	64 diferenciais
<b>Máxima escala de entrada</b>	± 10V
<b>Proteção de entrada</b>	± 25V
<b>Impedância de entrada</b>	1 MΩ
<b>Acoplamento</b>	DC
<b>Resolução</b>	16 bits
<b>Ganho / precisão na medida</b>	$1 / \pm (1,2\text{mV} + 0,01\%)$ $10 / \pm (120\mu\text{V} + 0,01\%)$ $100 / \pm (13\mu\text{V} + 0,01\%)$ $1000 / \pm (5\mu\text{V} + 0,01\%)$
<b>Frequência de leitura (por canal)</b>	0,0000232Hz – 100kHz

Tabela 2 – Especificações técnicas do módulo

ADC CP213 [20].

A calibração dos canais pode ser realizada por meio de um sinal de referência externo através de um conector no painel. Cada canal possui filtro passa baixa de 1KHz.

#### ◦ Módulo DAC CP266

Módulo Conversor Digital Analógico (DAC – *Digital to Analog Converter*) que possui 64 canais diferenciais com resolução de 16 bits, precisão de ± 1mV e tempo de atualização dos sinais elétricos de saída de 2ms. Esta interface possui um conector de alimentação auxiliar que pode ser utilizado para conexão externa com tensões de referência de ±15V, ±12V e 5V.

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

Tabela 3 – Especificações técnicas do módulo DAC CP266 [21].

#### ◦ Módulo DIO Compact-RIO PXI-7813R

Este módulo possui 160 canais digitais bidirecionais de entrada e saída (DIO – *Digital Input Output*) é de alto desempenho e reconfigurável (RIO – *Reconfigured Input Output*). É implementado com tecnologia FPGA (*Field Programmable Gate Array*) que pode ser configurada com o auxílio do LabVIEW. Permite o controle de processos programados diretamente na memória interna da interface, aumentando a eficiência e a velocidade da operação.

<b>Canais bidirecionais</b>	160
<b>Taxa máxima de clock</b>	40MHz
<b>Níveis Lógicos</b>	3,3V; 5V
<b>Faixa de tensão de entrada digital</b>	0V – 5V
<b>Faixa de tensão de saída digital</b>	0V – 3,3V @ 5mA
<b>Módulo FPGA</b>	Virtex-II 3M

Tabela 4 – Especificações técnicas do módulo RIO NI PXI-7813R.

Os sinais elétricos dos módulos de Controle configuram a referência elétrica compatível com os dispositivos de condicionamento de sinal, que por sua vez fornecem a potência elétrica requerida pelos dispositivos transdutores.

Neste trabalho os circuitos de condicionamento de sinal estão centralizados em um gabinete denominado **Torre de Potência**, como mostra a Figura 6. A Torre de Potência reúne o conjunto de 50 placas de fontes de corrente independentes, controladas por tensão elétrica, que recebem o sinal elétrico de tensão de referência dos conversores digital analógico (DAC). Estas proporcionam a corrente elétrica (de até ±2,5A) e a potência necessária para polarizar as

bobinas dos Dipolos e Quadrupolos, fornecendo um sinal de retroalimentação proporcional à corrente real aplicada, que será monitorada pelos conversores analógico digital (ADC).

Os conversores ADC e DAC estão instalados na plataforma PXI e são controlados pelo sistema SCADA-FEL. Na Figura 6 é esquematizado o controle e monitoramento dos transdutores magnéticos através da Torre de Potência e da plataforma PXI.

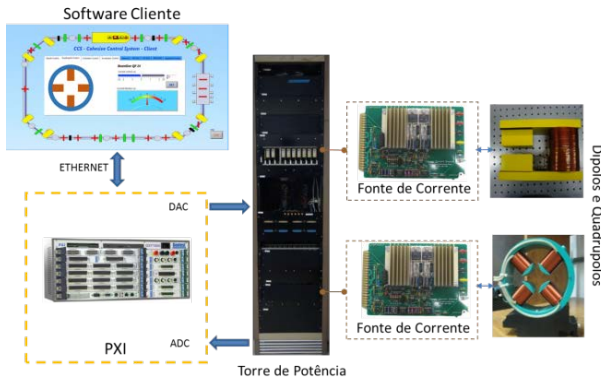


Figura 6 – Esquema do Sistema SCADA-FEL, responsável pelo controle e monitoramento dos Dipolos e Quadrupolos de controle da óptica do feixe de elétrons através dos módulos da plataforma PXI e dos Circuitos de Condicionamento de Sinal localizados na Torre de Potência.

#### 4. SISTEMA SCADA-FEL

Nesta seção descrevemos mais detalhadamente os programas e algoritmos implementados. A Figura 7 apresenta a estrutura de blocos do Sistema SCADA-FEL, que possui um subsistema de Diagnóstico para alertar e atuar caso seja detectada alguma falha de operação nos processos.

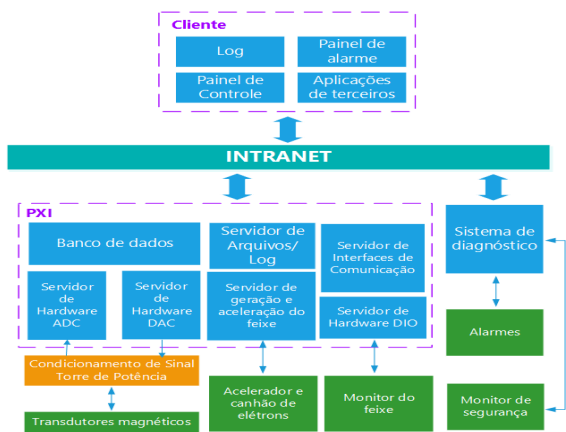


Figura 6 – Diagrama de blocos do Sistema SCADA-FEL.

##### 4.1. Protocolo

O protocolo de comunicação, desenvolvido para a interconexão dos módulos do Sistema SCADA-FEL através da Intranet, foi inspirado, e manteve a compatibilidade, com o

sistema CREOL. A sintaxe deste protocolo define os pacotes de dados desta comunicação.

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 do pacote e o comando a ser executado. A mensagem depende do comando requisitado e na finalização são enviados dois *bytes* para verificação de erro e um *byte* de finalização (Figura 8).

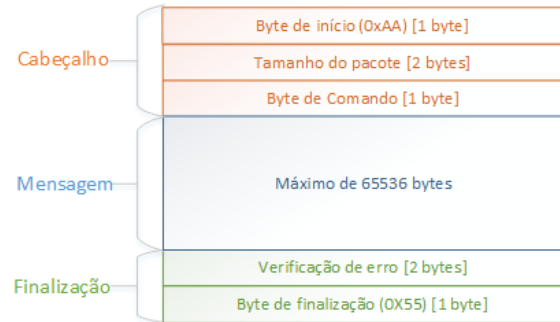


Figura 8 – Estrutura do protocolo de comunicação do sistema SCADA-FEL.

O tamanho do pacote (2 bytes) é definido como o resto da divisão do tamanho do pacote por 256 (primeiro byte) e o quociente desta divisão (segundo byte).

O servidor SCADA-FEL está programado para executar até 11 comandos diferentes, conforme a Tabela 5. Ao executar um comando, o servidor retorna um pacote com a mensagem. No lugar do *byte* de comando o servidor retorna o caractere “S”, se o comando tiver sido executado com sucesso, ou o caractere “F” se tiver ocorrido alguma falha na execução.

Código	Comando
“A”	Salvar o banco de dados em um arquivo no servidor
“B”	Carregar o banco de dados de um arquivo no servidor
“D”	Finalizar o programa servidor
“G”	Obter “links” de escrita e leitura 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
0x02	Escrever mensagens em um arquivo

Tabela 5 – Lista de comandos do Sistema de Controle.

##### 4.2. Banco de Dados

O Banco de Dados do SCADA-FEL utiliza um sistema de gerenciamento de banco de dados denominado MySQL. Este sistema faz uso da linguagem de consulta estruturada SQL (*Structured Query Language*).

Este banco de dados permite o acesso por uma conexão

cliente-servidor via TCP/IP, da mesma forma que o sistema SCADA-FEL está estruturado. Isto permite que o banco de dados possa ser instalado em outros computadores ou sistemas operacionais, favorecendo a modularização do conjunto.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema SCADA-FEL desenvolvido foi aplicado, e avaliado, na caracterização dos componentes de controle do feixe eletrônico do FEL-CREOL. Este estudo visava verificar a viabilidade técnica de se reaproveitar os dispositivos transdutores no projeto de um novo FEL para operar na faixa do THz e como um laboratório aberto. Para elencar os principais resultados obtidos e, por se tratar do desenvolvimento de um instrumento científico, podemos destacar:

- Desenvolvimento e Documentação da arquitetura do Hardware e Software de um Sistema SCADA.
- Validação e testes do Sistema SCADA-FEL.
- Construção de uma ferramenta para caracterização, testes e avaliação dos dispositivos do CREOL.
- Teste e Caracterização magnética dos Dipolos do CREOL.

### 5.1. Painel de Controle

O Painel de Controle, apresentado na Figura 9, consiste em uma interface gráfica que permite ao operador configurar processos e alterar os parâmetros do experimento. Por exemplo, caso se identifique a necessidade de alterar a convergência, via Quadrupolo, ou a posição, via Dipolo, do feixe de elétrons, o usuário do sistema pode selecionar o elemento

de controle e/ou monitoramento do feixe através de ícones associados a estes dispositivos.

Este programa é instalado em uma máquina cliente na sala de controle do sistema FEL, conectado ao SCADA-FEL via Intranet. O Painel de Controle permite selecionar remotamente os elementos de controle, e monitoramento do feixe, através de ícones associados a estes dispositivos e processos. O Painel de Controle apresenta, em sua tela principal, um esquemático interativo com os dispositivos. Os dispositivos são representados por ícones em um gráfico associado à localização física dos elementos do sistema de transporte e injeção do feixe de elétrons. Ao selecionar um dos dispositivos, através de seu ícone no terminal *touchscreen*, é apresentada uma aba específica no centro da tela, permitindo alterar as propriedades dos parâmetros de controle do dispositivo selecionado.

Os itens, numerados na Figura 9, identificam os tipos de ícones associados aos dispositivos e elementos de controle 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:

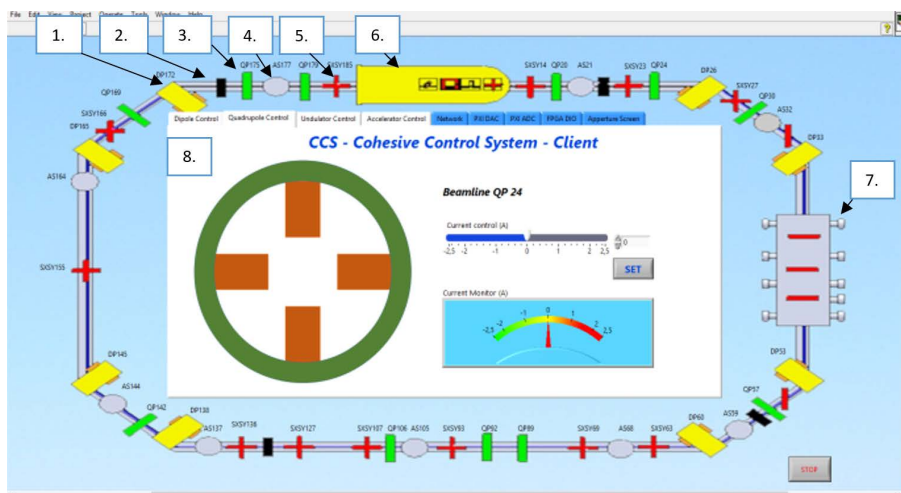


Figura 9 – Painel de controle do usuário. Cada um dos elementos de controle é acessado através do painel *touchscreen*. (1) 8 Dipolos, (2) 4 Medidores de vácuo, (3) 10 Quadrupolos, (4) 4 Monitores do feixe, (5) 17 Defletores magnéticos, (6) Acelerador Eletrostático, (7) Ondulador.

A posição *UP* permite a passagem livre do feixe eletrônico sem qualquer interação; na posição *MIDDLE* o dispositivo posiciona mecanicamente o sensor que monitora o sinal elétrico induzido pela passagem do feixe eletrônico pelo dispositivo, e na posição *DOWN* uma tela fluorescente é interposta a trajetória do feixe, permitindo sua visualização, via câmeras CCDs. Este processo é feito progressivamente em cada um dos Monitores do Feixe durante o processo de inicialização, centralização e colimação do feixe de elétrons. 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:** Apresentam o controle e monitoramento da corrente elétrica injetada aos 17 Defletores Magnéticos utilizados para realizar ajustes finos na trajetória do feixe.
6. **Acelerador Eletrostático:** Associado com a configuração do Acelerador NEC 5SDH-2, permitindo a configuração dos parâmetros do feixe eletrônico.
7. **Ondulador:** Permite a 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 9 corresponde ao controle de um dos Quadrupolos, onde é possível alterar e monitorar a corrente elétrica que está sendo aplicada ao transdutor.

## 5.2. Algoritmos

O algoritmo do **Servidor dos Transdutores**, representado na Figura 10, é responsável por executar os processos relacionados com os transdutores eletromagnéticos (Dipolos, Quadrupolos e Defletores magnéticos). Possui acesso através de *drivers* específicos aos conversores DAC e ADC 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 configurável, monitorando os registros de controle e alterando os registros de monitoramento dos transdutores. 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 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 e para fins de Diagnóstico.

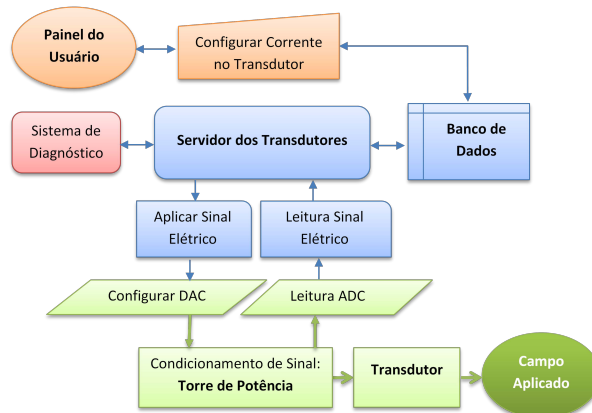


Figura 10 – Algoritmo de configuração e controle do campo magnético nos Dipolos, Quadrupolos e Defletores magnéticos.

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.

## 5.3. Transdutores

Para testes e caracterização dos transdutores magnéticos do CREOL, foi desenvolvido um subsistema de caracterização acoplado ao SCADA-FEL, que permite controlar uma mesa robótica de coordenadas XYZ, um sensor magnético (MLX90215) e uma placa de aquisição de dados modelo 6105E, da *National Instruments*, conforme Figura 11.

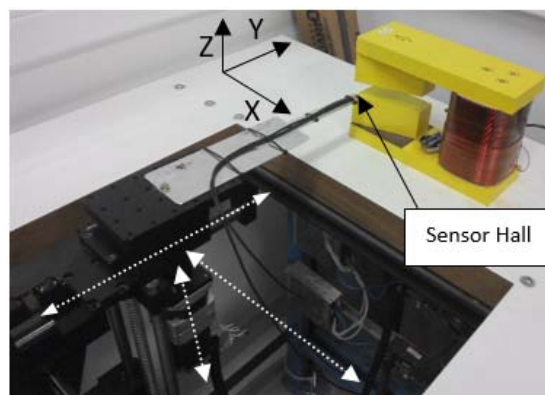


Figura 11 – Fotografia da mesa robótica XYZ utilizada na caracterização de um Dipolo magnético. As setas indicam o curso dos eixos dos servomecanismos e da ponteira de prova Hall.

Os parâmetros para configurar, polarizar e caracterizar os transdutores magnéticos são definidos através do Painel



de Controle SCADA-FEL, atuando via plataforma PXI, nos módulos ADC, no DAC e na **Torre de Potência**.

A curva de caracterização dos transdutores e a calibração das fontes de corrente da **Torre de Potência** são inseridas no Banco de Dados do sistema para que o SCADA-FEL possa calibrar e realizar a conversão dos sinais elétricos de controle. Na Figura 12 está apresentado o gráfico da corrente elétrica aplicada em relação ao campo magnético produzido em um dos Dipolos do FEL. Neste gráfico é possível visualizar a uma pequena histerese do núcleo do Dipolo, que deverá ser levada em consideração na calibração e implementação de algoritmos automatizados para o controle do feixe.

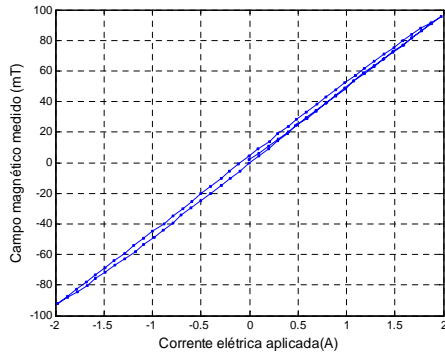


Figura 12 – Gráfico do campo magnético em função da corrente elétrica aplicada ao Dipolo.

Na Figura 13 é exibido o mapeamento magnético do entreferro de um dos Dipolos trapezoidais do transporte do feixe de elétrons. Esta imagem mostra a uniformidade e a intensidade do campo magnético no plano, medido à meia altura do entreferro do Dipolo com corrente de polarização de 1A.

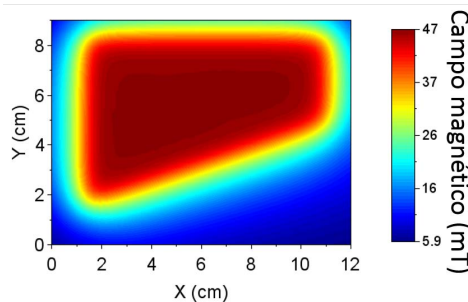


Figura 13 – Mapeamento magnético do entreferro de um Dipolo de base trapezoidal com excitação de 1 A, à meia altura entre os polos. As cores representam a intensidade do campo magnético (conforme escala à direita em miliTesla) no plano de medida XY.

Os resultados permitem verificar a efetiva operação,

comunicação e a linha de controle entre os módulos do Sistema SCADA-FEL, Hardware e o Sistema de condicionamento de sinal.

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

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, é apresentado a proposta e o desenvolvimento de uma arquitetura SCADA para controle de um FEL realimentado (SCADA-FEL). O projeto é inspirado em um sistema anterior CREOL [7], programado nas linguagens C/C++ e Delphi, utilizando a plataforma de hardware CAMAC. A nova arquitetura foi projetada para ser implementada na linguagem gráfica LabVIEW e uma tecnologia mais atual, baseada em módulos e barramento PXI. O critério de escolha destas tecnologias se pauta por suas características técnicas, maior oferta de módulos e de disponibilidade no mercado.

O sistema SCADA-FEL tem uma estrutura de rede Intranet, é composto de um Banco de Dados de tempo real, drivers de hardware, sistema de diagnóstico, processamento de dados e protocolos de comunicação. O Painel de Controle apresenta os dispositivos transdutores como ícones selecionáveis individualmente, através de uma interface para configuração e monitoramento via tela *touchscreen*. A arquitetura modular proposta permite a atualização e a ampliação incremental do projeto e facilita sua manutenção.

O SCADA-FEL foi utilizado para caracterização elétrica e magnética dos transdutores eletromagnéticos e circuitos de condicionamento de sinal. Os resultados mostraram a reprodutibilidade e robustez das linhas de controle e sugerem a viabilidade técnica para reaproveitamento dos transdutores, Dipolos, Quadrupolos e circuitos de condicionamento de sinal para o projeto de um novo sistema FEL.

O protótipo de sistema supervisor desenvolvido pode ser adaptado para outros projetos de controle de processos, ou experimentos científicos, com demanda para uma arquitetura aberta, envolvendo a configuração e monitoramento de variáveis e parâmetros físicos da ordem de centenas de elementos.

- [1] C. A. Brau, "Free Electron Laser", Academic Press, 1990.  
 [2] G. Dattoli, A. Renieri, A. Torre, "Lectures on the Free Electron Laser Theory and Related Topics", Roma, World Scientific, 1993, pp. 117-124.  
 [3] R. Bonifacio, B. Mc Neil, A. C. J. Paes, L. de Salvo e R. M.

O. Galvão, "A Far Infrared Super Radiant FEL", Int J Infrared Milli Waves, vol. 28, pp. 699-704, 2007.

- [4] J. Tanabe, "Iron Dominated Electromagnets Design, Fabrication, Assembly and Measurements", Stanford Linear Accelerator Center, 2006.

- [5] J. Orloff, "Charged Particle Optics", CRC Press, 2008.
- [6] R. Caetano, J. Pereira, R. Galvão e G. Cernicchiaro, "Modelagem dos dispositivos magnéticos de um Laser de Elétrons Livres", Notas técnicas do CBPF, 09 2015.
- [7] L. R. Elias, I. Kimel, L. Delbert, D. Anderson, T. Muft e Z. Zhong, "A compact cw free electron laser", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, pp. 219-223, 1991.
- [8] G. Ramian, "The World Wide Web Virtual Library: Free Electron Laser research and applications.", 03 fevereiro 2015.
- [9] A. Daneels e W. Salter, "What is SCADA?", em International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, Trieste, Italy, 1999.
- [10] N. Bharatia e N. D. Thakur, "Design and implementation of labview based SCADA for textile mills", IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, vol. 3, nº 5, 05 2014.
- [11] B. Somasundaram, S. K. Darun, D. Sharmila, B. Banu Rekha e S. K. Manoj, "SCADA Application Development Using LABVIEW", International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), vol. 3, nº 2, Agosto 2013.
- [12] K. H. Mess, "Accelerator Control", Computer physics Communications, pp. 155-132, 1990
- [13] A. S. Tanenbaum, "Computer Networks", Amsterdam, Prentice-Hall International, Inc., 1989.
- [14] D. Bailey e E. Wright, "Practical SCADA for Industry", Perth, Elsevier, 1995.
- [15] IEEE Nuclear and Plasma Sciences Society, "IEEE Standard Modular Instrumentation and Digital Interface System (CAMAC)", 1982.
- [16] 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].
- [17] W. Boyes, "Instrumentation Reference Book", Washington, Walt Boyes Editor, 2002.
- [18] 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].
- [19] 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].
- [20] DynamicSignals, LLC, "Model CP213 32/64/128-Channel, 16-bit Compact PCI/PXI ADC User's Manual", 2007.
- [21] KineticSystems Company, LLC, "Model CP266 Single-width, 6U Compact PCI User's Manual", 2006.