

Fonte de Alta Tensão para Detectores RPC

High Voltage Power Supply for RPC Detectors

Mario Vaz da Silva Filho,* Mauricio Bochner,† Gabriel Luís Azzi,‡ Fabio Marujo da Silva,§ e Lidyane Pestana¶

Laboratório de Instrumentação Eletrônica (LITELT) do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF),

Rua Dr. Xavier Sigaud 150, CEP:22290-180, Urca, RJ, Brasil

Submetido: 29/10/2019

Aceito: 31/10/2019

Resumo:

Este documento descreve o protótipo da fonte de tensão entre 0 e ± 10 kV, feita no CBPF para alimentar detectores com baixo consumo de corrente, em especial o RPC (“Resistive Plate Chamber”) do projeto MARTA (Muon Array for Tagging Air Shower) e apresenta os resultados preliminares de sua avaliação em bancada. A fonte é constituída por osciladores do tipo Royer ressonante a transformador tipo CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamps), multiplicadores de tensão a capacitor e diodo, e circuitos analógicos e digitais que amostram e controlam as tensões e correntes de saída, monitoram e adquirem dados das variáveis operacionais e ambientais.

Palavras-chave: Palavras chave: RPC, MARTA, Alta Tensão, Oscilador Royer, Arduino, Raspberry Pi.

Abstract:

This document describes the prototype of the 0 to ± 10 kV voltage source made in the CBPF to power low current consumption detectors, in particular the MARTA’s (Muon Array for Tagging Air Shower) Resistive Plate Chamber (RPC) and presents the preliminary results of its bench evaluation. The source consists of CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamps) transformer resonant Royer oscillators, capacitors and diode voltage multipliers and analog and digital circuits that sample and control output voltages and currents, monitor and acquire data on operational and environmental variables.

Keywords: RPC, MARTA, High Voltage, Royer Oscillator, Arduino, Raspberry Pi.

1. DETECTORES RPC [1, 2]

A figura 1-a mostra o corte transversal do detector RPC [1] que inspirou a fonte de alta tensão [2]. É feito de duas placas paralelas, o anodo positivamente carregado em +HV e o catodo negativamente carregado em -HV, separadas por três camadas de isolante de vidro espesso (em azul), separadas por 2 gaps de gás (em rosa). Este se ioniza na passagem de partículas eletricamente carregadas. Uma caixa de acrílico selada (Metacrilate gas-tight box) contém todo o RPC. As ionizações induzem cargas nos eletrodos de leitura (*Sense electrodes*), placas metálicas posicionadas sobre o detector, para aquisição dos sinais (*Pulse*) relacionados à passagem de cargas elétricas na região. Eletrodos de guarda (*Guard electrodes*) separam os *eletrodos de leitura*. Todo o sistema de detecção de partículas fica contido em uma caixa de alumínio selada (*Al box*), aterrada para fins de blindagem eletromagnética: o RPC, sua fonte de alimentação de alta tensão, a eletrônica de processamento e transmissão dos sinais relacionados à detecção de partículas. Um modelo elétrico desse detector como carga da sua fonte de alimentação é dado na

figura 1-b, consistindo das capacitâncias C_{g+} e C_{g-} para terra e C_d inter-eletrodos, com respectivas resistências de fuga R_{f+} , R_{f-} e R_f , e a fonte de corrente I_d resultante da ionização do gás.

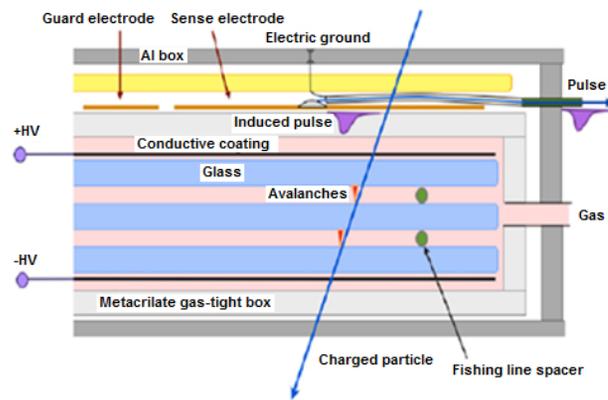


Figura 1a – Corte transversal de um detector RPC.

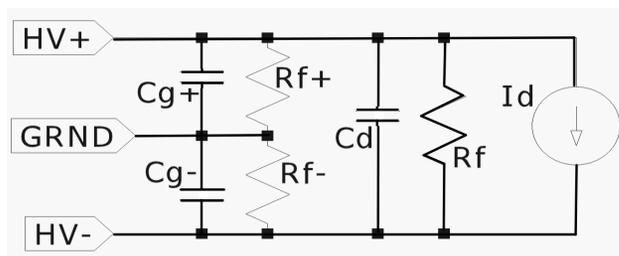


Figura 1b – Circuito eletrônico equivalente.

*Electronic address: mariovaz@cbpf.br

†Electronic address: mauricio@cbpf.br

‡Electronic address: gabriel@cbpf.br

§Electronic address: fmarujo@cbpf.br

¶Electronic address: lidyanepetana@yahoo.com

2. ESPECIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DA FONTE

A fonte HVPS-CBPF, esquematizada na figura 2, gera altas tensões simétricas, podendo ser controladas nos modos independente, localmente ou remotamente, entre 0 e ± 10 kVdc, apresentando à carga, tensões diferenciais entre 0 e 16kV, com precisão melhor do que 1% e corrente máxima controlada em até $5 \mu\text{A}$. A fonte é alimentada com tensões contínuas de $\pm (6 \text{ a } 12 \text{ V}) / 250\text{mA}$. O controle, a supervisão e a aquisição de dados da fonte é feito através de comunicação em padrão I2C/TWI [3] e o acesso remoto por VNC [4].

A fonte é constituída por: dois osciladores na topologia Royer ressonante a transformador tipo CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamps) [5]; dois retificadores multiplicadores de tensão de polaridades opostas [6]; dois circuitos analógicos, um de controle, que estabiliza e coloca limites na saída da fonte, e outro de supervisão, que amostra e condiciona as tensões e correntes na saída para o circuito de controle; um microcontrolador Arduino [7] que executa os algoritmos de controle, leitura e escrita e as conversões analógicas e digitais (ADC e DAC), e a comunicação de dados em padrão I2C/TWI.

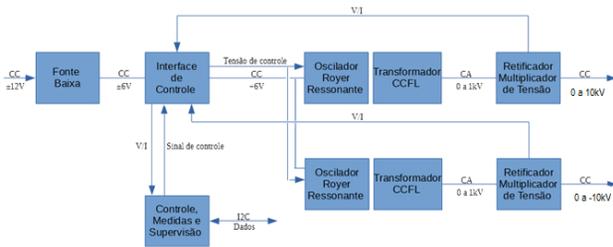


Figura 2 – Diagrama em blocos da fonte HVPS-CBPF.

A amostragem da corrente e das tensões fornecidas pela fonte é feita, para fins de controle e supervisão, por meio de resistores ‘shunt’ e divisores de tensão, tal como representado de forma simplificada na figura 3.

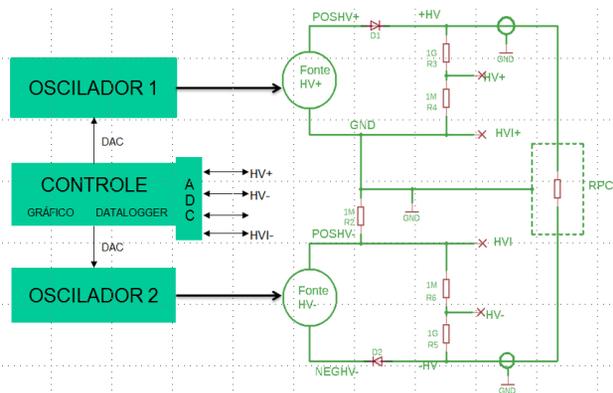


Figura 3 – Interface para ADC do circuito de amostragem das tensões e correntes.

2.1. Protótipo HVPS-CBPF

O protótipo (Figura 4a e Figura 4b) usa o Arduino para realizar o controle da saída, as conversões com ADC e DAC, esta, por PWM [8], e a comunicação I2C para transmissão de dados e comandos tais como SETUP, que define o valor da tensão de saída. Neste protótipo, foi utilizado um mini-

computador Raspberry Pi [9] para enviar o SETUP e receber dados, com interface gráfica dinâmica e “data-logger” registrando em arquivo em disco os valores das variáveis, data, hora e local. Foram instalados também um ADC de 16 bits e 2 DACs de 12 bits com interface I2C para opcionalmente serem controlados diretamente pelo Raspberry PI que neste caso pode efetuar também o algoritmo de controle. O Raspberry PI pode ser conectado à Internet por cabo ou WIFI, e ficar embarcado no rack ou fora deste. O Arduino pode ser substituído pelos conversores DAC e ADC com maior resolução, de forma compatível com as fontes atuais do RPC em teste no CBPF.

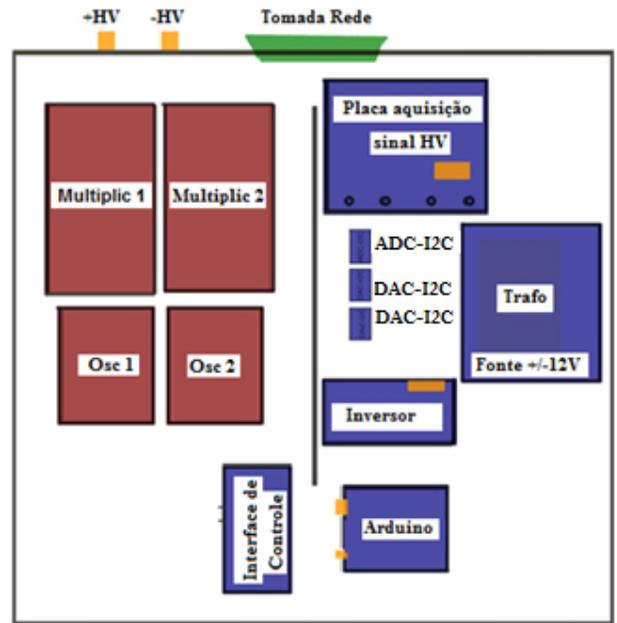


Figura 4a – Protótipo montado em rack de 40 cm x 40 cm.



Figura 4b – Foto do protótipo em bancada.

3. ESQUEMAS ELÉTRICOS E LAYOUT DOS CIRCUITOS USADOS NO PROTÓTIPO

A figura 5 mostra o esquema elétrico do oscilador Royer e o layout da placa de circuito impresso feita na LPKF [10] (máquina de prototipagem que confecciona placas de circuito impresso através do processo de fresagem) no laboratório de prototipagem do CBPF. Vê-se que tem como terminais: PAD 1 e PAD 2, a saída de alta tensão que alimenta o CDVM (retificador multiplicador de tensão); PAD 7, do controle da amplitude; e os PAD 5 e PAD 6, alimentação, respectivamente 6 a 12 volts e 0V ou terra.

Os dois osciladores são idênticos e consistem nos transistores T1 e T2 em topologia Push-Pull no primário do

transformador CCFL. Tais transistores são polarizados pela tensão de controle, por um resistor R2 e por um trimpot, que limita a tensão de saída no secundário, bem como a corrente que pode ser fornecida ao multiplicador de tensão.

Nas figuras 6 e 7 vê-se o retificador multiplicador de tensão negativo, CDVM-. Invertendo a polaridade de seus diodos temos o positivo, ou CDVM+. Ambos utilizam pares em série de diodos UF4007, para suportar tensões reversas acima de 1kV, capacitores disco cerâmico 1nF / 10 kV, tendo como entrada os terminais 1 - 2 e como saída os terminais 8 - 9, ligados ao conector SHV. O divisor resistivo formado por RMV1 e RMV2 entre PADV e PADI amostra a tensão no SHV. As amostras de tensão são PadV e PadI. Já RMI, RMV1 e RMV2 são resistores externos à placa.

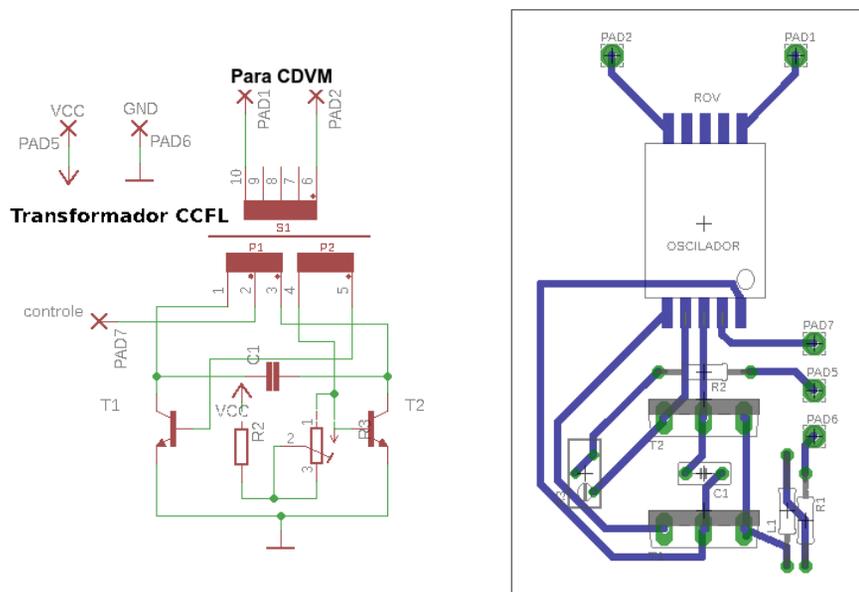


Figura 5 – Placa de circuito impresso do oscilador Royer.

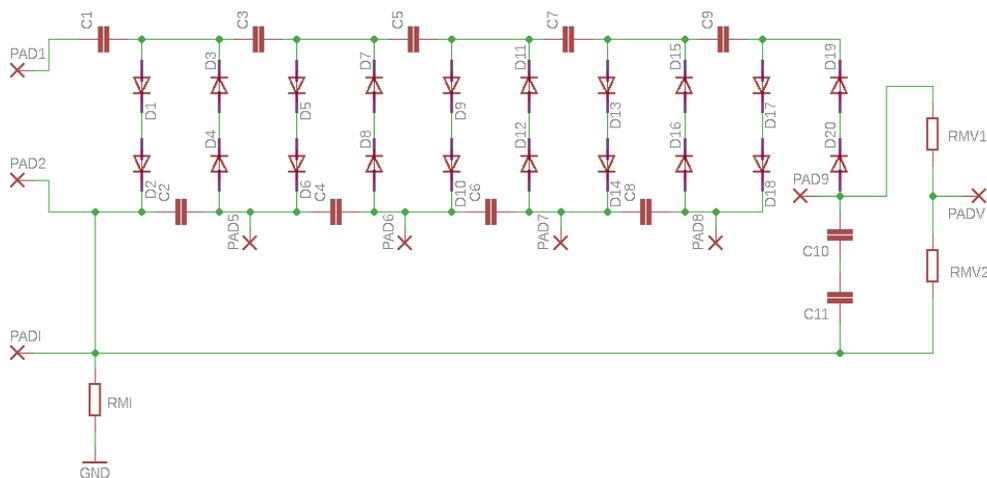


Figura 6 – Esquema elétrico do Retificador Multiplicador de Voltagem Negativo – CDVM.

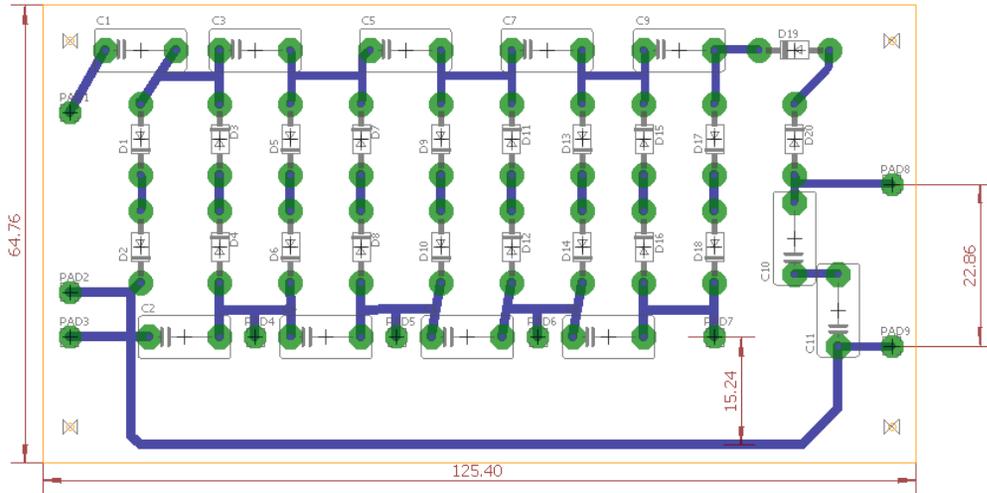


Figura 7 – Layout do Retificador Multiplicador de Voltagem Negativo – CDVM.

As figuras 8 e 9 ilustram o esquema elétrico e o layout do circuito de amostragem da saída original. A figura 10 ilustra o esquema deste circuito remodelado, onde foi excluída a parte referente ao controle da amplitude das oscilações, que passou a ser feita na placa da fonte de baixa tensão, mostrada nas figuras 12 e 13. A figura 11 apresenta o esquema de um circuito alternativo para a medida das variáveis de saída da fonte, usando amplificadores de instrumentação integrados, de precisão, tipo o INA118 [11].

Todos estes circuitos têm ao todo 4 amplificadores para converter as tensões amostradas das correntes e tensões nas saídas positiva e negativa da fonte. Tem em comum o uso de amplificadores operacionais de precisão com baixo offset de tensão e muito baixa corrente de polarização da entrada, realimentados negativamente em configuração clássicas. O uso de filtros de rede de modo comum ajuda a reduzir a interferência eletromagnética conduzida pela alimentação do circuito.

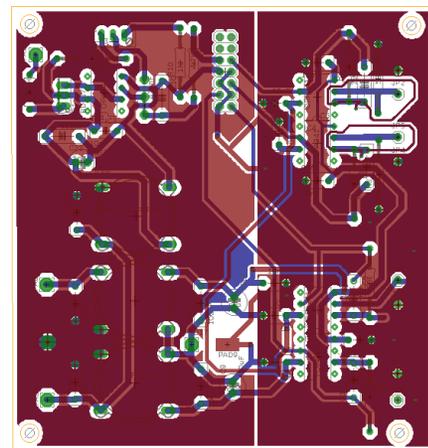


Figura 9 – Layout da placa de leitura e controle.

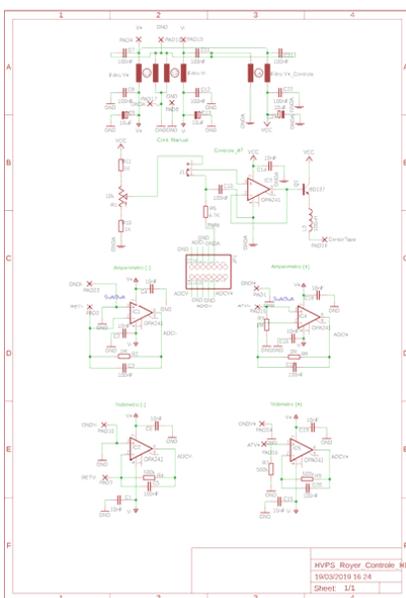


Figura 8 – Placa de leitura e controle original.

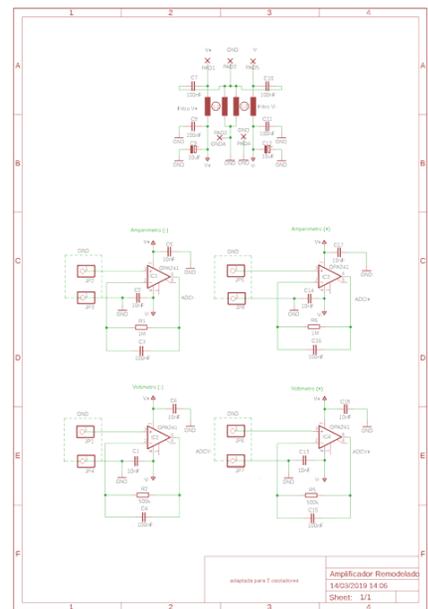


Figura 10 - placa de controle remodelada.

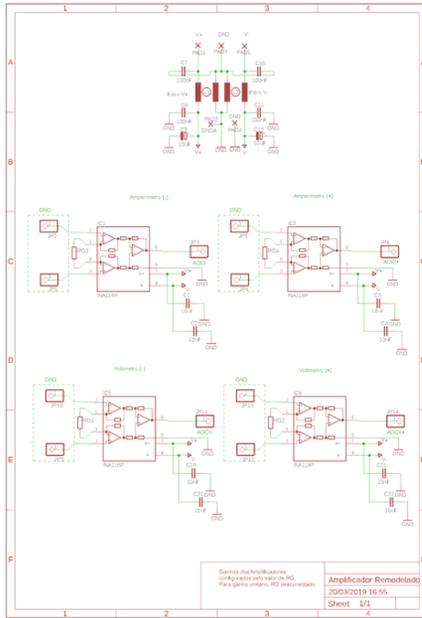


Figura 11 - Esquema alternativo de medição com amplificadores tipo INA.

A placa da fonte, mostrada nas figuras 12 e 13, concentra os circuitos de mais alta corrente, os reguladores que alimentam o sistema e os amplificadores que controlam a tensão dos osciladores.

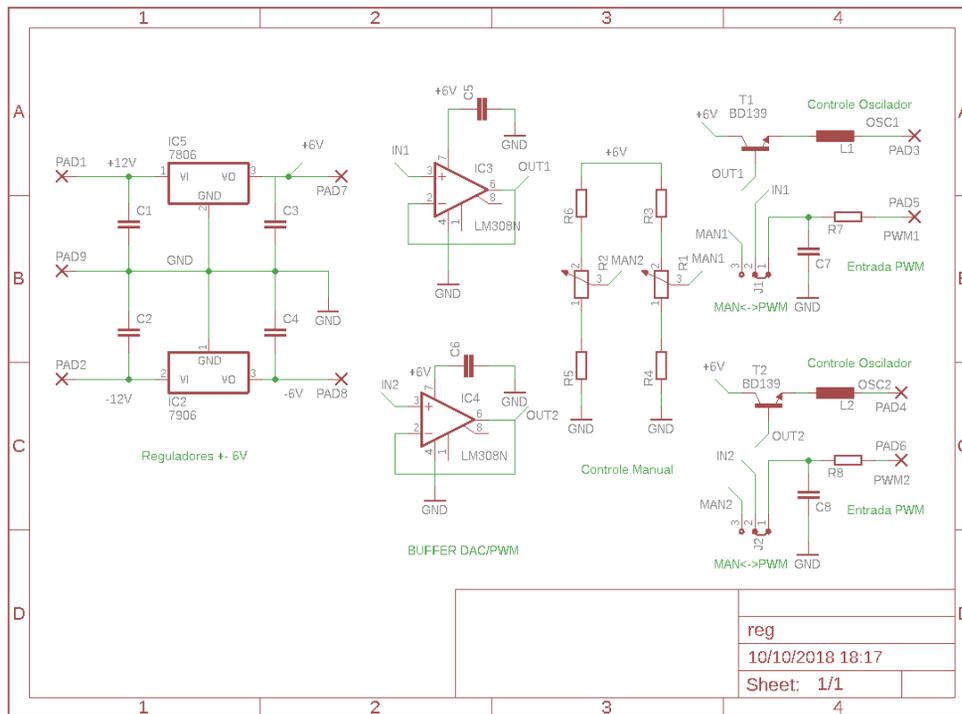


Figura 12 – Esquema elétrico da placa reguladora das baixas tensões e do controle dos osciladores.

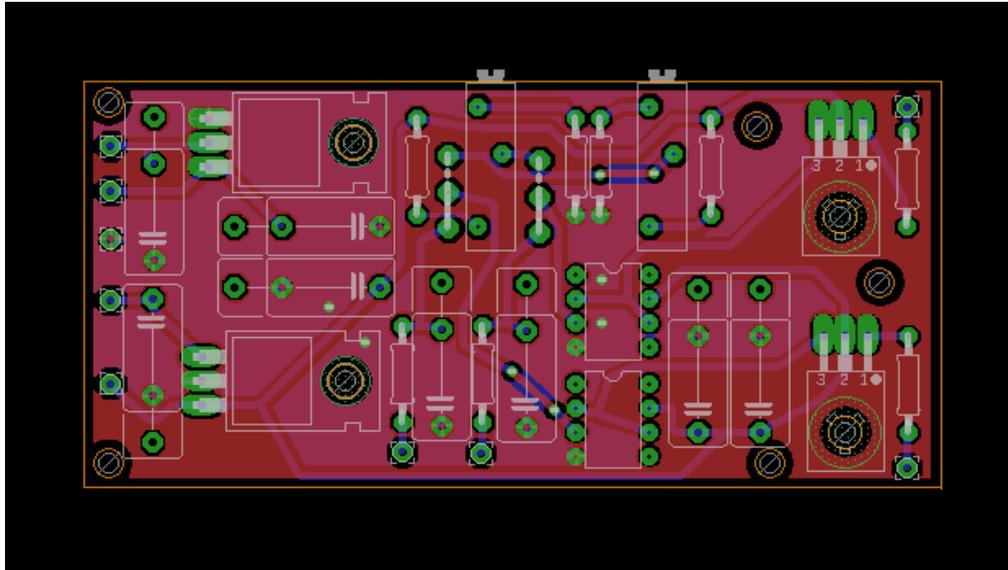


Figura 13 – Layout da placa reguladora das baixas tensões e do controle dos osciladores.

Os circuitos de interface, dados nas figuras 14 e 15, condicionam os sinais em tensão das tensões e correntes

amostradas, invertendo aquelas com valores negativos.

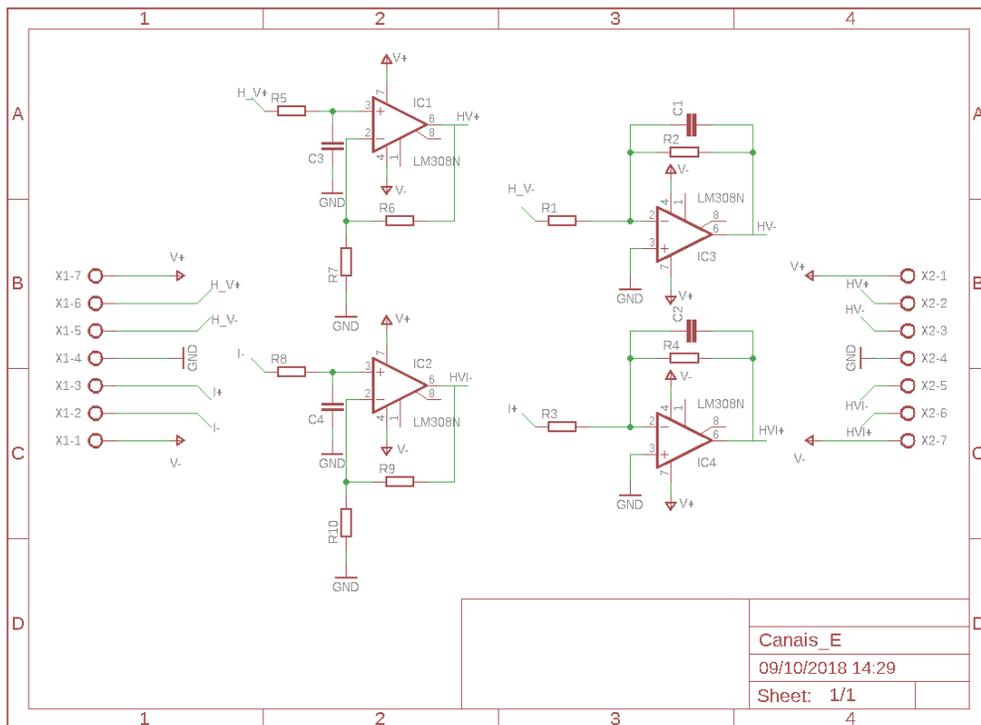
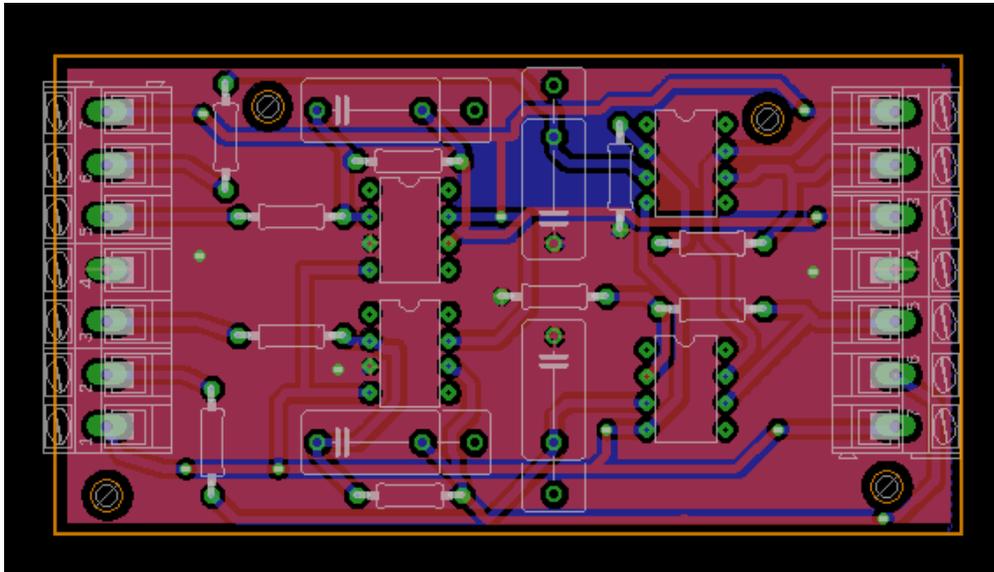


Figura 14– Esquema elétrico da placa de interface para o conversor ADC.



Figuras 15 – Layout da placa de interface para o conversor ADC.

4. INSTRUMENTAÇÃO PARA CONTROLE E MONITORAMENTO REMOTO DA FONTE

A figura 16 mostra as plataformas adotadas, com o Arduino realizando o controle e aquisição de dados da fonte e o Raspberry PI para configurar o Arduino definindo o valor das tensões de saída desejadas (SETUP), além de fazer a

aquisição de dados pela comunicação via I2C/TWI, plotar em tempo real os gráficos das tensões e corrente na saída, escrever eventos em arquivo log e realizar a comunicação com a Internet via VNC. Para compatibilizar os níveis de tensão das 2 plataformas, é usado um conversor de níveis apropriado no enlace do I2C.

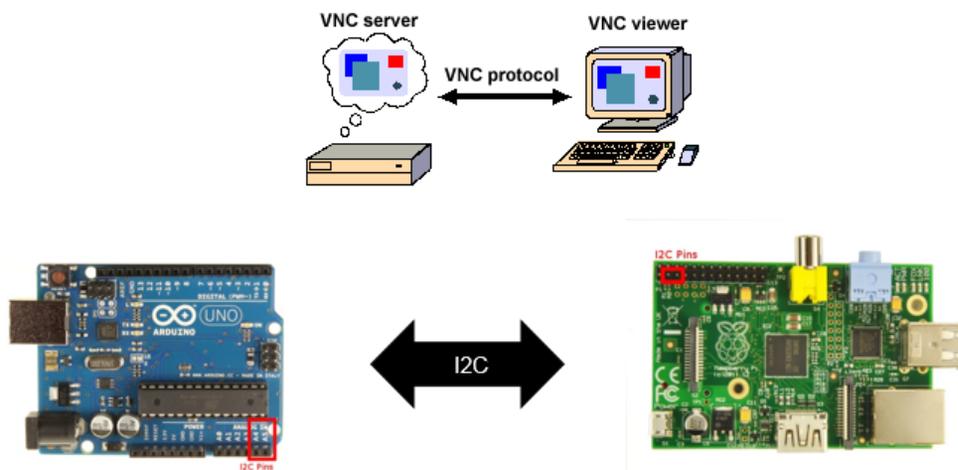


Figura 16 – Microcontrolador e Microprocessador para controle e monitoração da fonte.

4.1. Raspberry PI e suas funções

O modelo usado foi o Raspberry Pi 3 Model B Vi.2 2015 com o sistema operacional oficial Raspbian, que já vem com a linguagem de programação Python [12] instalada. Com o Python 2.7 e bibliotecas nativas e importadas, foi desenvolvido um código de monitoramento onde é possível definir a tensão que a fonte estabilizará (setup), salvar todos os dados de leitura em arquivo ('datalogger'), visualizar os valores de V e I graficamente e monitorar o sistema à

distância através de um protocolo de Internet que permite a visualização de interfaces gráficas remotas através de uma conexão segura, ou seja, acessar todo o conteúdo do Raspberry Pi remotamente através da internet. O microcomputador pode realizar a aquisição de dados de variáveis ambientais, como temperatura, umidade, pressão.

4.2. Arduino e sua função

O Arduino [13] recebe e converte digitalmente as amostras analógicas de tensão e corrente e devolve um sinal de controle em modulação por largura de pulso ou pwm. A IDE do Arduino é instalada no sistema operacional do próprio Raspberry, sendo C/C++ [14] a linguagem de programação usada para essa plataforma. O Arduino opera no modo escravo, aguardando solicitação do Raspberry pela comunicação I2C, o qual fornece a configuração do nível de estabilização da tensão de saída (SETUP) e envia os comandos de leitura e escrita.

O código carregado no Arduino (firmware) implementa um sistema de controle em malha fechada, por aproximações sucessivas [15], atualizando o valor da tensão de saída. Pode

também operar com o controle desativado apenas em leitura ou também em modo manual através de potenciômetros. O sistema conta com supervisão por alarmes para:

- 1 - Sobrecorrente, atualmente de $2 \mu\text{A}$ para tensão em rampa e $1 \mu\text{A}$ para tensão constante.
- 2 - Overflow para quando o sistema de controle esgotar potência capaz de levar a saída até o valor desejado.

4.3. Desenvolvimento da automação

O diagrama de blocos na Figura 17 mostra a interação do sistema sob controle, no caso a fonte de HV com o Arduino, e este, com o Raspberry, via comunicação I2C.

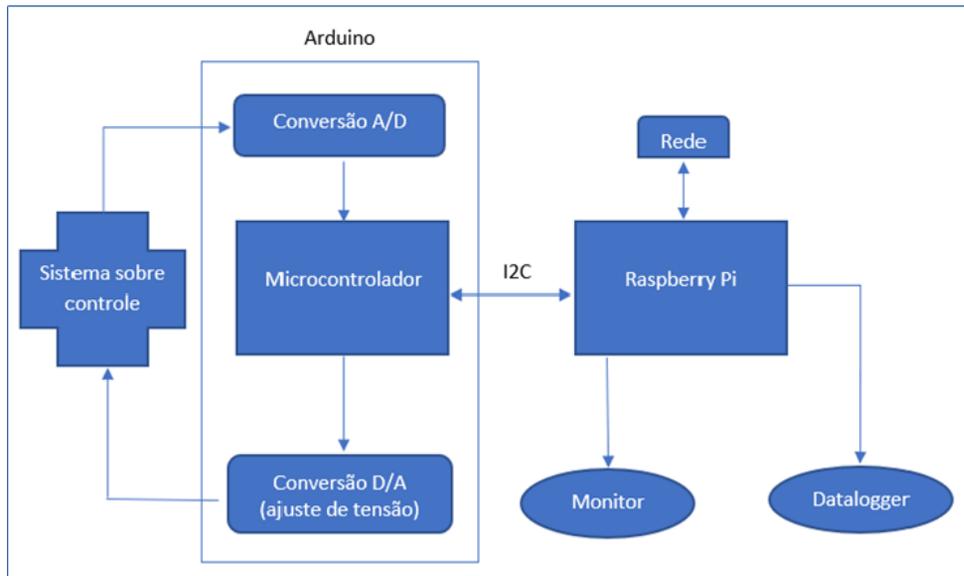


Figura 17 – Controle da fonte por software.

O Arduino recebe amostras do valor de tensão e corrente da fonte, através de seu conversor A/D-10 bits, e controla a tensão de saída em malha fechada tendo como referência o 'Setup' recebido.

O Raspberry realiza a interface sistema/usuário. O usuário configura o 'setup' escolhido (nível de tensão desejado para a estabilização da fonte e de corrente máxima). A partir daí o microcontrolador calcula uma variável de controle que atua no hardware, em malha fechada.

É possível acompanhar todo o processo de estabilização gráfica e numericamente, em tempo real, através de um monitor ligado ao Raspberry. Paralelamente todos os dados são salvos em um documento com formato.txt contendo as informações com a respectiva data/hora da leitura já formatados para outros softwares de análises de dados.

A Figura 18 mostra o algoritmo e o software de controle e monitoração em tempo real das tensões e da corrente de saída.

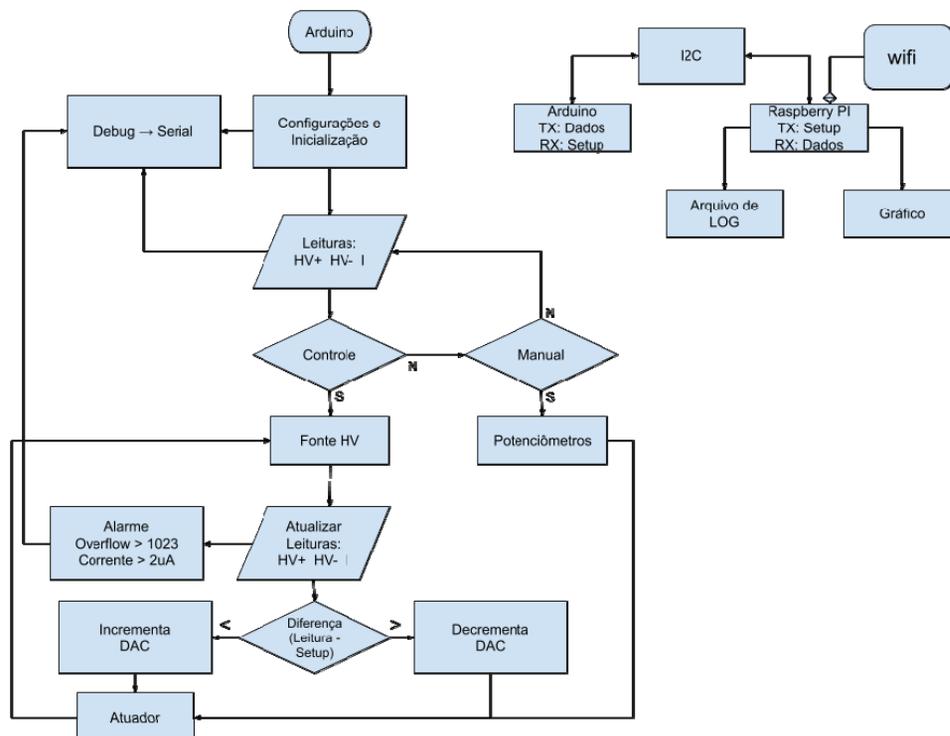


Figura 18 - Diagrama do sistema de controle Raspberry/Arduino.

5. CARACTERIZAÇÃO

5.1. Equipamentos utilizados para ensaio de bancada e desenvolvimento:

- Fonte estabilizada Hikari HK-3003D
- Multímetro Agilent 34461A
- Multímetro Fluke 87 True RMS
- Osciloscópio Tektronix TBS 1062
- Ponta de prova HV (x 1k)
- Raspberry PI III conectado à Internet e monitor
- LPKF Protomat C60 - Prototipadora Mecânica
- LTSPICE - software de simulação [16]

- VNC (Virtual Network Computing) - Protocolo para visualização/controlado remotos.

5.2. Teste de Estabilidade

As medidas de transiente no tempo, de tensão e corrente, à temperatura de 25°C, com carga de 6G Ω desde zero até a estabilização no valor indicado no SETUP ($\pm 5\text{kV}$), valor este escolhido devido às limitações de potência e de isolamento da montagem atual, tiveram como resultado o apresentado na figura 19. Na configuração do software de controle se estabeleceu esta subida lenta de tensão. Em teste, no período de 5h, sem carga e desligando-se o controle logo após atingido o valor do SETUP, mediu-se um desvio máximo de 22 volts na média da tensão de saída, e 1,66 μA para corrente na saída, pela aplicação de 10kV na carga de 6GΩ.

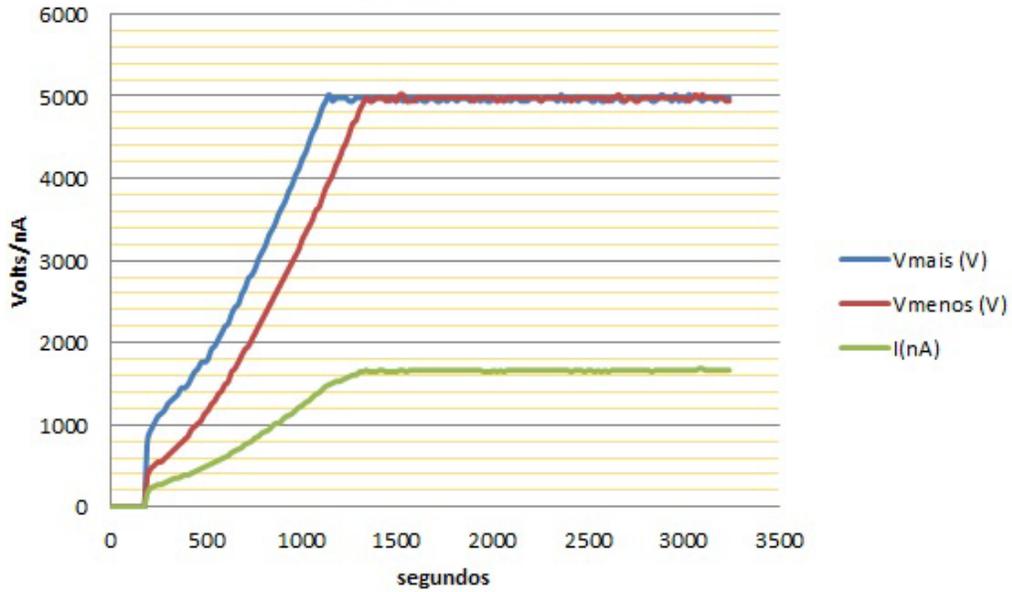


Figura 19 – Transiente até a estabilização das tensões e corrente na saída da fonte.

A Figura 20 mostra a variação (valor atua menos valor anterior na amostragem) das tensões na saída, registrado no arquivo log do Raspberry Pi. Observa-se uma variação máxima após a estabilização de 40 volts, valor exagerado devido à precisão limitada da conversão digital no Arduino e da transmissão para o Raspberry Pi.

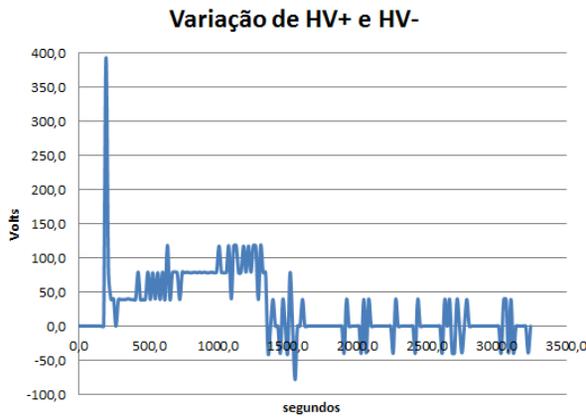


Figura 20 - Gráfico da variação de HV até estabilização em 10KV.

A figura 21 ilustra o gráfico do ripple da tensão de saída em função da alta tensão aplicada. As leituras foram feitas na saída da alta tensão, através de capacitor de 10nF/10kV ligado ao osciloscópio com entrada em AC, impedância de 10MΩ e com carga de 6 GΩ. A tabela 1 mostra, um ripple inferior a 0,6 V / kV, ou 0,1 V / μA na saída.

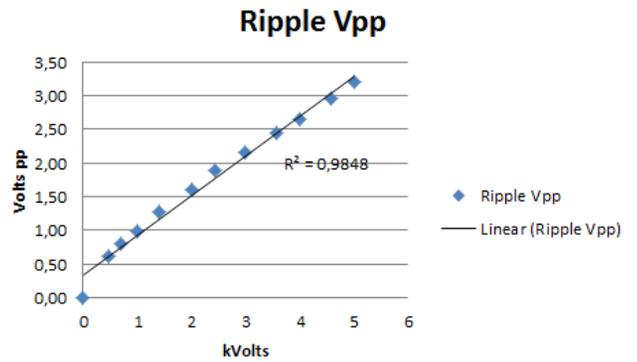


Figura 21 – Ripple de tensão de saída.

Variável	Max	Min	Erro %
V+ volts	5019	4980	< 0,4
V- volts	4980	4941	< 0,4
Ifuga nA	168,6	162,7	-

Tabela 1 – Variações máximas de tensão na saída e corrente de fuga.

A figura 22 e a tabela 2 mostram o resultado das medidas da estabilidade no tempo das tensões na saída (Vmais e Vmenos em Volts — sobrepostos na figura), da corrente de fuga sem carga (I em nA x 10) e com a temperatura dada em graus centígrados com valores multiplicados por 10 (tmp= °C x 10).

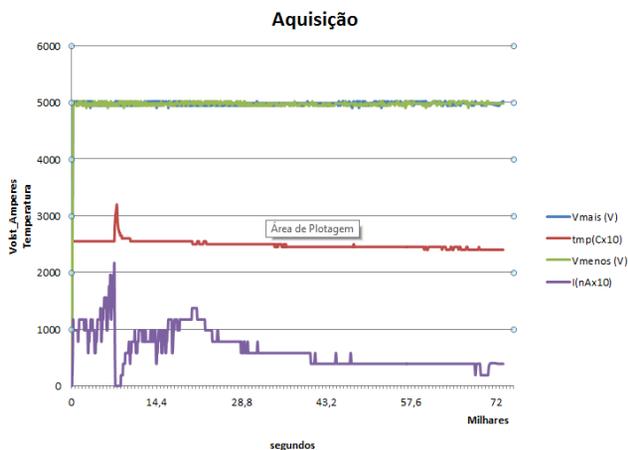


Figura 22– Teste de estabilidade com variação de temperatura.

	Volts V+	Volts V-	nA x 10 I	oC T
AVG	4975	4975	722	251
MAX	5019	5019	2150	320
MIN	4901	4901	0	240

Tabela 2 – Variações na saída da fonte durante 20 h com variação forçada de temperatura

6. CONCLUSÃO

Foi projetado e construído um protótipo de fonte simétrica de alta tensão com baixo custo, estabilizada e controlada localmente por um microcontrolador Arduino, e controlada remotamente através de um microcomputador Raspberry Pi 3. A fonte foi caracterizada experimentalmente e demonstrou atender às especificações de projeto para alimentar sensores tipo RPC com monitoração e controle local e remoto. As medidas demonstraram estabilidade e regulação melhor do que 0,4% ao longo de 20 h, e baixo consumo (160 a 250 mA), para variações de temperatura ambiente entre 20 e 30 graus centígrados.

Embora existam atualmente outras opções de plataformas adequadas ao sistema, como por exemplo, o ESP32 [17], foi apresentada uma opção futura de montagem em Rack e controle pelo Raspberry Pi atuando local e remotamente através de ADC (16 bits) e DACs (12 bits) por I2C. Com este protótipo foram entendidos, para melhorias futuras (apêndice), os procedimentos para aprimorar a confiabilidade da comunicação evitando falhas e conflitos, bem como procedimentos de isolamento [18] para reduzir ainda mais as correntes de fuga, atualmente estabilizadas na ordem de 40nA a 10kV.

Também está em estudo, a implementação da montagem do módulo gerador de alta tensão (conversor DC/DC) junto ao RPC, dispensando assim, o uso de cabos de alta-tensão que se tornam críticos para valores acima de 3kV.

Bibliography

- [1] G.Anastasia, Detectores RPC para experimentos de raios cósmicos, tese de mestrado, Instituto de Física da UNICAMP, 15/02/2000, Campinas, SP. Visto em 30/09/2019 em http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/277295/1/Guidi_Anastasia_M.pdf
- [2] O.C.Lippmann, Caracterização de RPC's para o projeto MARTA, tese de mestrado, CBPF, 09/10/2017, Rio de Janeiro, RJ. Visto em 30/09/2019 http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/dissertacaoDeMestrado_2018-11-06-16-51-28ZGlzc2VydGFjYW9EZU1lc3RyYWRv.pdf
- [3] <https://www.arduino.cc/en/Reference/Wire>. Visto em 30/09/2019
- [4] <https://www.realvnc.com/pt/connect/download/viewer/>
- [5] M.Vaz, M.Bochner: Conversor CC-CC para Alta Tensão Utilizando Oscilador Royer Ressonante, [dx.doi.org/10.7437/NT2236-7640/2018.03.008](https://doi.org/10.7437/NT2236-7640/2018.03.008), CBPF, Rio de Janeiro. Visto em 30/09/2019 http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/notasTecnicas_2018-12-10-15-58-52bm90YXNUZWNuaWNhcw==.pdf
- [6] M.Vaz, G.L.Azzi, Estudo de Multiplicadores de Tensão a Diodos e Capacitores, [dx.doi.org/10.7437/NT2236-7640/2018.03.010](https://doi.org/10.7437/NT2236-7640/2018.03.010), CBPF, Rio de Janeiro. http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/notasTecnicas_2018-11-13-14-48-27bm90YXNUZWNuaWNhcw==.pdf Acesso 30/09/2019
- [7] Arduino <https://www.arduino.cc/en/Guide/HomePage> - acesso em 27/09/2019.
- [8] PWM <https://www.citissystems.com.br/pwm/> - acesso em 16/05/2019
- [9] Raspberry Pi <https://canaltech.com.br/hardware/saiba-tudo-sobre-o-raspberry-pi-3-59065/> - acesso em 16/05/2019
- [10] <https://www.anacom.com.br/pt-br/produtos/eda/eletronica-prototipagem-rapida.html> - acesso em 16/08/2019
- [11] <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/847620/TI1/INA118.html> - 16/08/2019
- [12] Python <https://eusoudev.com.br/python-como-surgiu/> - acesso em 16/05/2019
- [13] Arduino Duemilanove <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardDuemilanove> - acesso em 16/05/2019
- [14] C/C++ <https://imasters.com.br/back-end/sera-que-devo-aprender-cc-se-ja-sei-outras-linguagens> - acesso em 16/05/2019
- [15] Aproximação sucessiva <https://www.passeidireto.com/arquivo/26863294/fundamentos-de-controle-de-processos/13> - acesso em 16/05/2019
- [16] <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>, acesso em 27/09/2019.
- [17] ESP32 https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp32/overview_ acesso em 27/09/2019.
- [18] <https://www.quimatic.com.br/produtos/manutencao-eletrica/fita-isolante-liquida/> - acesso em 27/09/2019.

Apêndice: Projeto para implementação futura: protótipo HVPS-CBPF2

Nas figuras seguintes são mostrados o arranjo dos elementos da construção do próximo protótipo HVPS-CBPF2, a ser montado em um módulo NIM duplo, utilizando circuitos impressos – PCI, produzidos e testados no CBPF, dos

osciladores a transformador CCFL; dos multiplicadores a capacitor-diodo de voltagem positiva e negativa; e do circuito de medida que condiciona as tensões e correntes saídas das fontes para o circuito de controle que estabiliza essas voltagens. Será inserido um sensor de temperatura analógico ou digital cuja leitura será enviada via I2C juntamente com os dados de V e I para processamento, plotagem e armazenamento. Outros sensores poderão ser inseridos, como umi-

dade e pressão, e as tensões e correntes da alimentação externa. O protótipo terá apenas conversores ADC e DAC, com comunicação de dados I2C no lugar do Arduino do protótipo aqui apresentado que será usado como fonte de bancada para o CBPF. O novo protótipo será também montado em uma caixa de alumínio de maneira semelhante às fontes originais do RPC, para uso neste detector.

Montagem da Fonte HVPS-CBPF-2 em módulo NIM

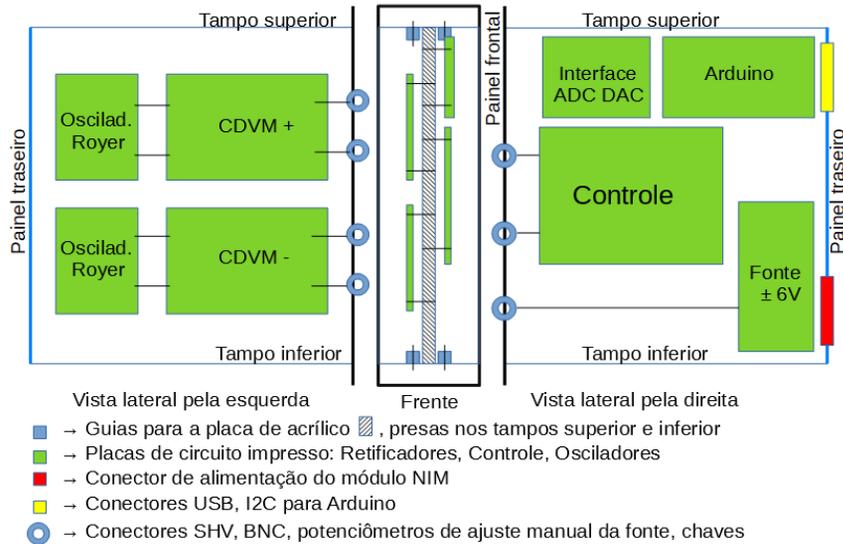


Figura A1 – Montagem da fonte em bastidor NIM duplo.

Montagem da Fonte HVPS-CBPF-2 em módulo NIM

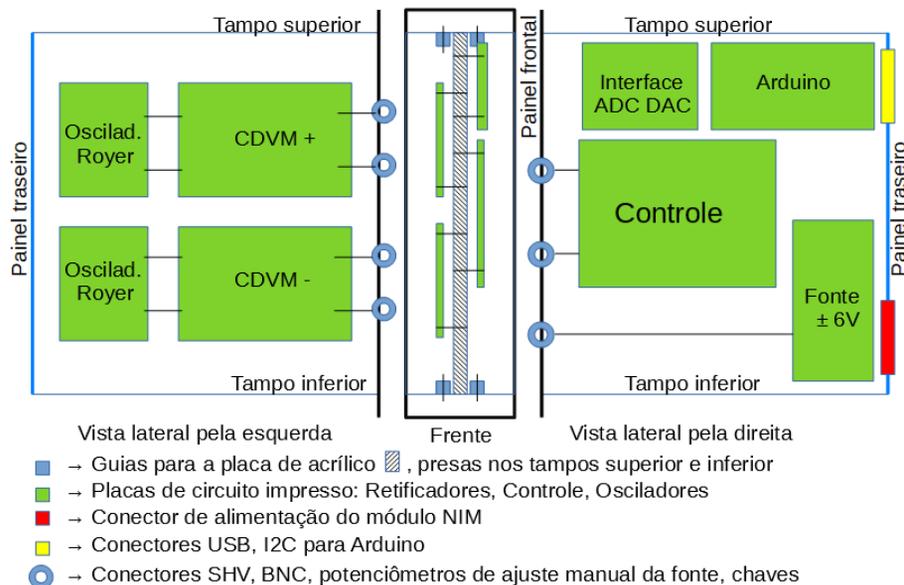


Figura A2– Painéis frontal e traseiro da fonte montada em módulo NIM duplo.