

**CBPF - CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS**

---

**Rio de Janeiro**

**Notas Técnicas**

CBPF-NT-008/18

novembro 2018

Conversor CC-CC para Alta Tensão Utilizando Oscilador Royer Ressonante

Mário Vaz da Silva Filho e Maurício Borchner



## Conversor CC-CC para Alta Tensão Utilizando Oscilador Royer Ressonante

*High voltage dc-dc converter from a resonant Royer oscillator*

Mário Vaz da Silva Filho e Maurício Borchner

mariovaz@cbpf.br/mauricio@cbpf.br

*Laboratório de Instrumentação Eletrônica (LITELT) do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF),  
Rua Lauro Müller, 150, CEP: 22290-180, Rio de Janeiro, Brasil*

**Resumo:** Estudo de aplicação de oscilador tipo Royer ressonante a transformador tipo CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamps) em fontes de alta tensão e baixa corrente, adequadas a energizar detectores do tipo "Resistive Plate Chamber- RPC. O estudo, feito por meio de simulações por LTSPICE com modelos simples de transformadores, indutores e capacitores, complementadas interativamente por medidas em protótipos baseadas nessas simulações, mostrou ser um método rápido e suficiente para projetar aquelas fontes.

**Palavras chave:** Conversor CC-CC; Alta Tensão; Oscilador Royer.

**Palavras chave:** Study of resonant Royer type oscillator with CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamps) transformer applied to high voltage and low current sources, suitable to energize RPC Resistive Plate Chamber detectors. The study was carried out using LTSPICE simulations with simple models of transformers, inductors and capacitors, complemented interactively by measurements in prototypes based on these simulations, being a fast and sufficient method to design these sources.

**Keywords:** DC-DC Converter; High Voltage; Royer Oscillator.

### 1. Introdução

Neste documento se apresenta uma forma de fazer um conversor CC-CC de baixa tensão para alta tensão em baixo nível de corrente, com oscilador Royer [1-2], ressonante entre 40 e 80 kHz, e retificadores multiplicadores de tensão [4]. Esse tipo de conversor pode ser adequado para polarizar detectores do tipo "Resistive Plate Chamber- RPC [6], por ter características de alta estabilidade, baixa irradiação eletromagnética, baixo

custo, eficiente utilização de potência e dimensões reduzidas.

O projeto é baseado no uso interativo de simulações com LTSPICE [8] e análise das medidas em protótipos criadas com base nas simulações, e ficou restrito ao uso dos transformadores modelos CTX210609-R e CTX210659-R [5], especificados na tabela 1 e na figura 1, distribuídos a preços entre 1 e 4 US\$/unidade [7].

Part Number	Pout W	Lp uH	Ns / Np	Np / FB	DCR sec $\Omega$	DCR pri $\Omega$	V máx. pri.	V máx. sec.	I rms sec	Fig.
CTX210659-R	2.5	19	100	4	285	0.190	13	1340	.005	C
CTX210609-R	6	20	100	6	176	0.132	13	1340	.012	F

**Tabela 1** - Especificações dos transformadores utilizados neste projeto [5].

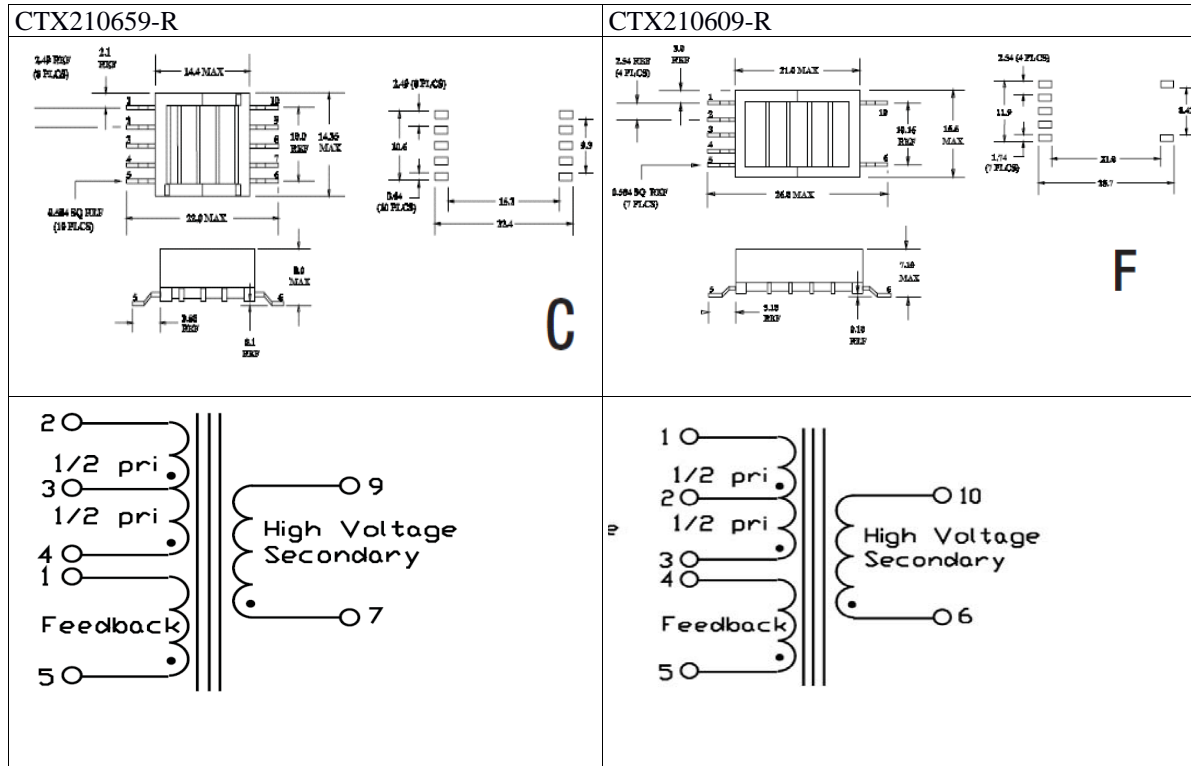


Figura 1: Especificações dos Transformadores CTX210609-R e CTX210659-R [5].

## 2. Apresentação e Análise do Circuito

Na figura 2 é dado o esquema de um conversor CC-CC de 4 V (nó N1) para 10 kV (nó S2), com oscilador Royer composto por transistores bipolares Q1 e Q2 acoplados por emissor na indutância L5, seus coletores ligados à fonte de 4 V pelas indutâncias L1 e L2 do primário do transformador CTX210609-R, este modelado pelas indutâncias lineares L1 a L4 acopladas idealmente por K1. Um capacitor pode ser colocado entre os coletores para ajustar a frequência de oscilação, quando esta estiver acima do valor ótimo para operação do transformador. As bases dos transistores são polarizadas pelo resistor R2 e ligadas ao secundário L3 para realimentação positiva da corrente em L1 e L2, o que cria a oscilação. A tensão gerada no secundário L4, cuja indutância é cem vezes maior do que o primário, é multiplicada por retificadores de tensão atingindo o valor de 10kV quando estabilizada por chaveamento de corrente modelado pela chave S1 controlada pela diferença das tensões na saída em S2 e na fonte de referência V2.

A modelagem linear do transformador, com múltiplos enrolamentos e núcleo de ferrite, é uma simplificação para este circuito não linear, adequada

apenas ao estudo do início do transiente quando as correntes são de pequena amplitude, assim como o fluxo magnético no núcleo de ferrite. Fora dessa condição o estudo se volta para as medidas em protótipos, feitas de acordo com as simulações, opção mais prática do que fazer modelos do transformador não linear com a precisão necessária para simulações.

A figura 3 mostra um transiente simulado da energização do circuito, caracterizado pelas tensões:  $V(q1c)$ ,  $V(q2c)$  e  $V(qe)$ , nos coletores e emissores dos transistores; as tensões escalonadas do secundário  $V(30)*0.015$ , e da saída retificada e multiplicada  $Vs1*0.001$ , estabilizada em 10kV pelo chaveamento de corrente. Nesta figura se vê que no início do transiente a tensão no primário  $V(L1)+V(L2)= 2V_{pp}$ , e a do secundário  $V(L4)= 200V_{pp}$  seguem a relação de espiras, por sua vez igual à raiz quadrada da razão das indutâncias,  $L1+L2= 20\mu H$  e  $L4= 200mH$ , conforme o modelo linear do transformador. Mas em regime permanente essas tensões estabilizadas pela realimentação negativa com a chave S1 passam respectivamente a  $7V_{pp}$  e  $1000V_{pp}$ , devido à energia de chaveamento na oscilação.

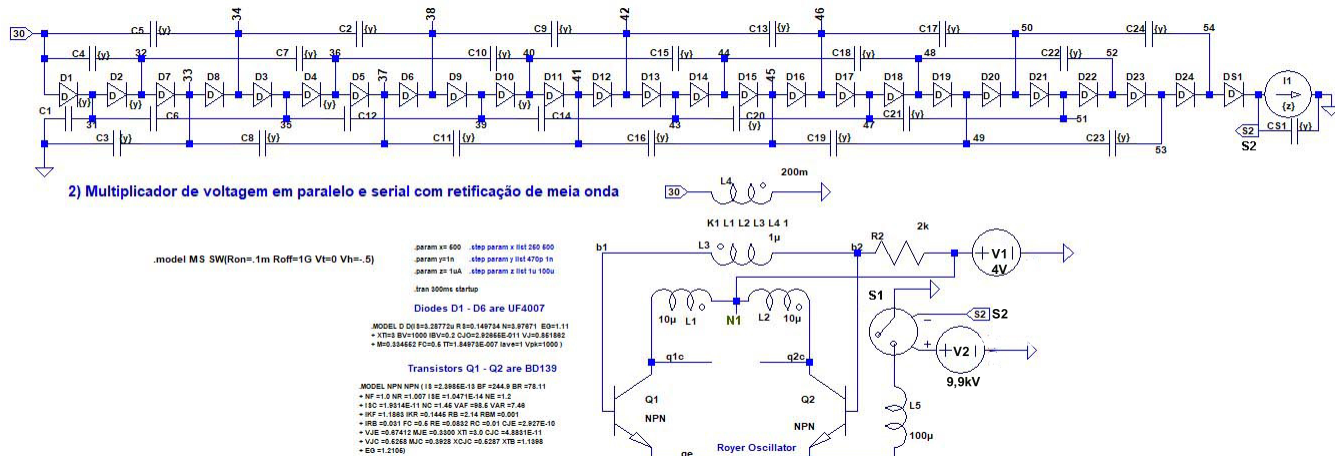


Figura 2: Exemplo de conversor CC-CC para 10kV com oscilador Royer ressonante e CDVM híbrido.

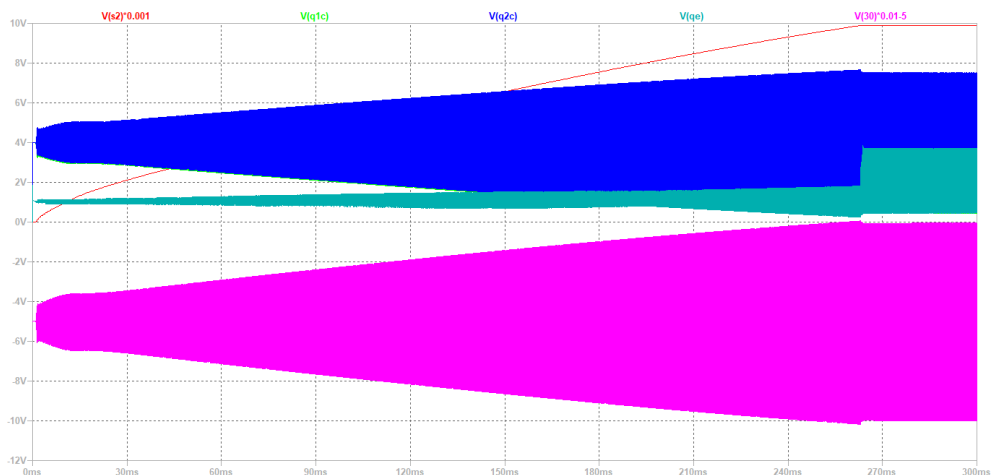


Figura 3: Tensões na energização e oscilação do inversor, em transiente de 300ms simulado com LTSPICE.

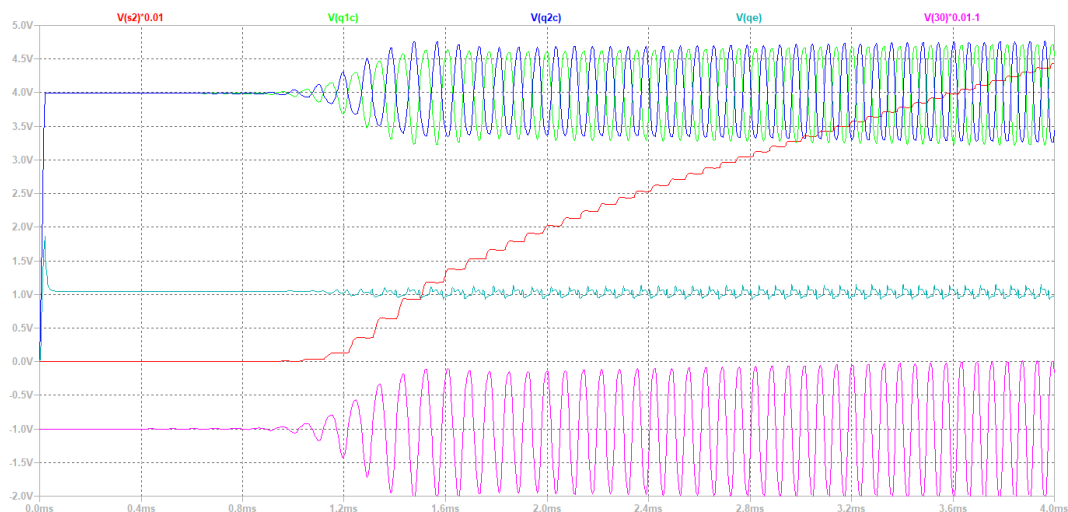


Figura 4: Tensões no início do transiente.

As figuras 4 a 7 mostram a corrente de alimentação de 210mA no início do transiente, e no final, média de 23mA e eficaz de 38mA rms, uma dissipação de 152mW na fonte de 4V. A assimetria da forma de onda

das correntes nos coletores pode ser devida à diferença do tempo de chaveamento dessas correntes, ou imprecisões numéricas na simulação pelo LTSPICE.

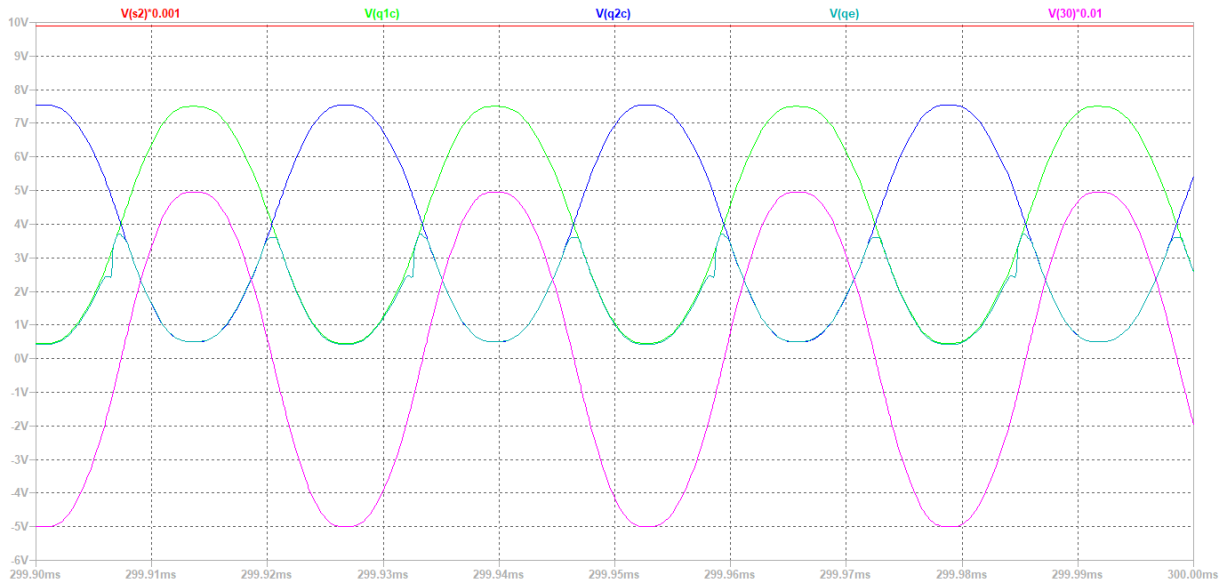


Figura 5: Tensões ao fim do transiente.

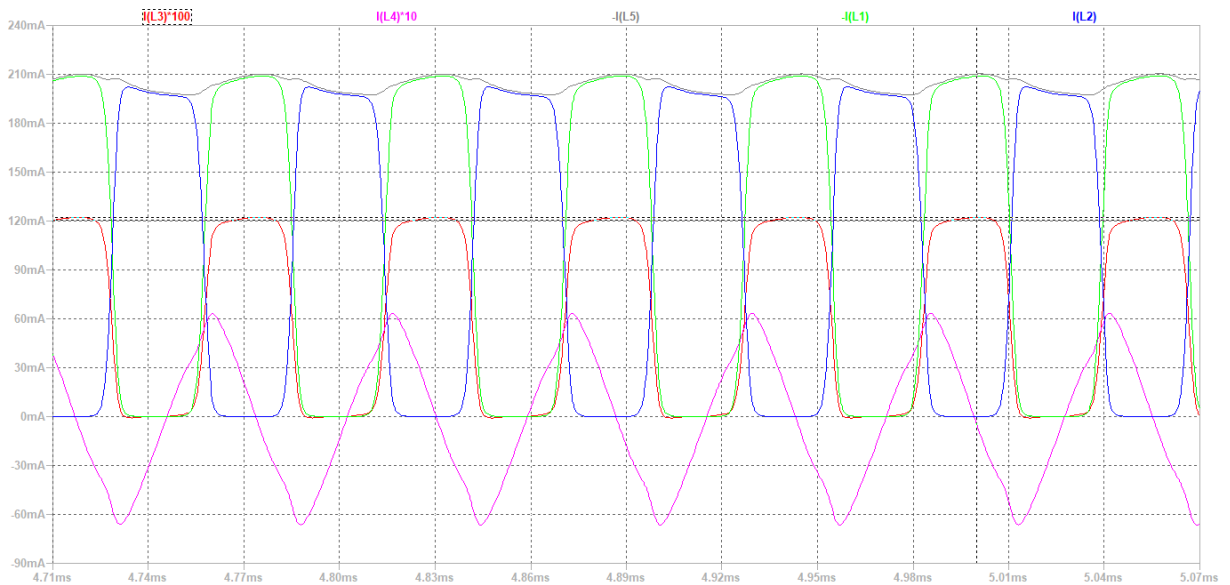


Figura 6: Correntes no início do transiente na partida (acima) e na oscilação (abaixo).

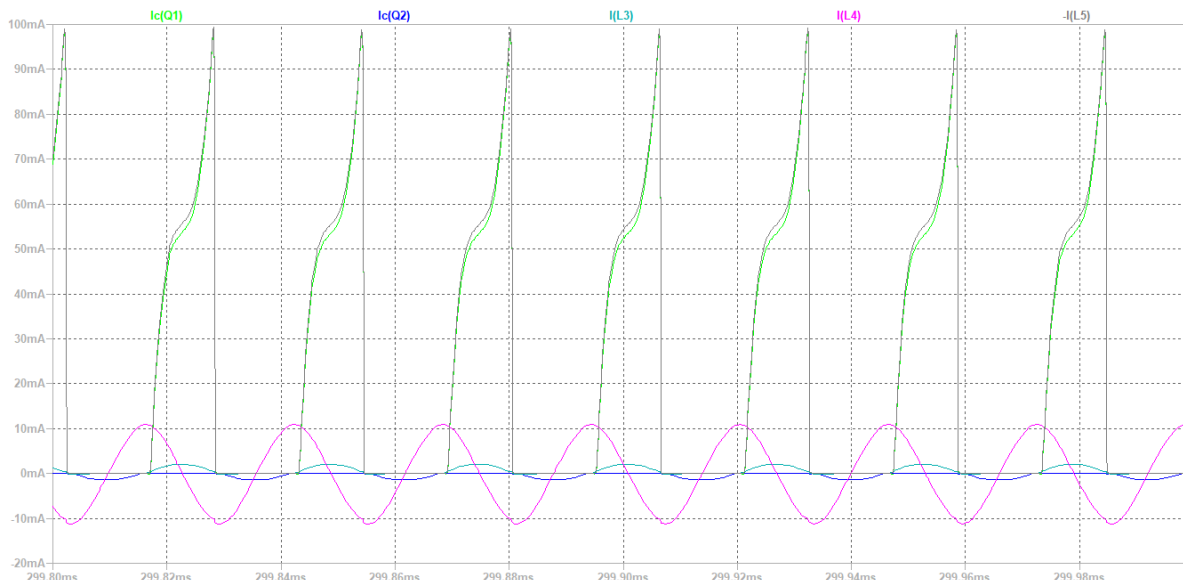


Figura 7: Correntes ao fim do transiente.

Na figura 8 se vê a potência dissipada durante o transiente de partida e, muito menor, após a estabilizada regulação da tensão de saída pela realimentação

negativa chaveada, que dá estabilidade e eficiência de potência utilizada.

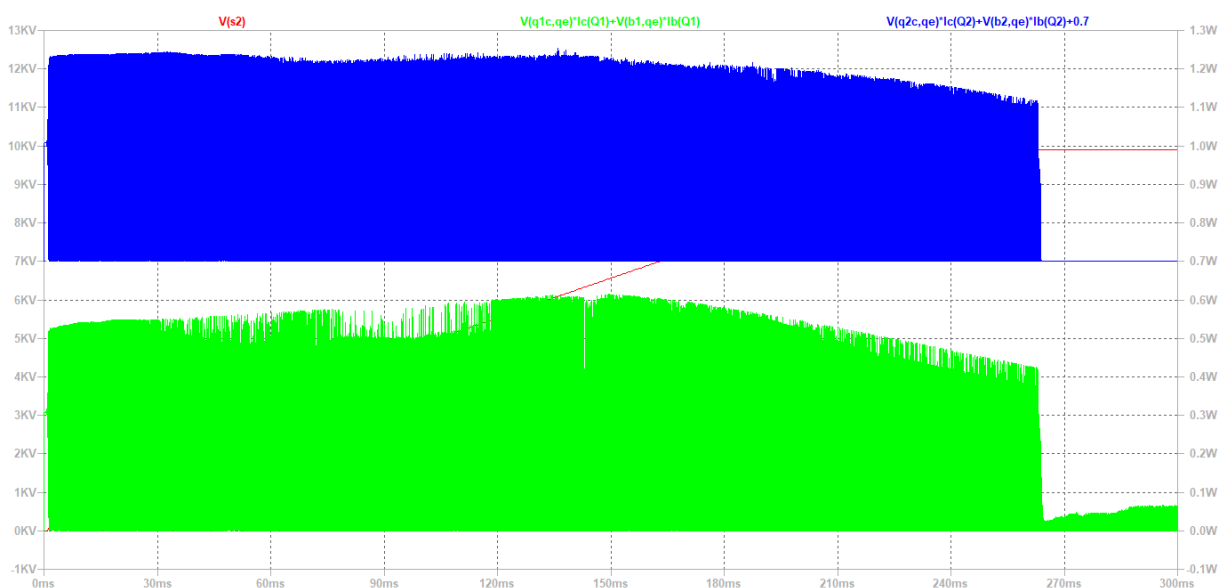


Figura 8: Dissipação de potência nos transistores ao longo do transiente.

A chave S1 pode ser implementada por um circuito integrado comparador e um transistor MOSFET e a amostragem da tensão por resistor de 1GΩ 1% 10kV, uma carga bem maior do que o detector. Existem outras soluções de controle: linear ou por largura de pulso – PWM, como na fonte do CBPF [10]; ou por microprocessador dada a razoável estabilidade a curto prazo da oscilação. A variável controlada pode ser a tensão aplicada ou a corrente injetada em N1, ou na base ou emissor dos transistores [9].

3. Efeitos na Ressonância pela Carga De Multipli-

cadores Duais

Na figura 9 se tem o esquema de conversor de 4V para ±10kV com o mesmo oscilador e 2 multiplicadores de tensão positiva e negativa. Na tabela 2 temos a "netlist" correspondente ao esquema, necessária para se obter valores numéricos das tensões e correntes do circuito, pelo comando .MEASURE do LTSPICE [8, 11]. Estes valores numéricos permitem quantificar a estabilidade do conversor.

K1 L1 L2 L3 L4 1L1 q1c N1	C3 0 3 {y}	D13 12 13 D	DS1 24 S1 D	C31 31 35 {y}	D41 47 46 D
10µRser=.1	C4 30 2 {y}	C12 5 9 {y}	C22 18 22 {y}	C32 32 36 {y}	C39 39 43 {y}
L2 N1 q2c 10µ Rser=0.1	CS1 S1 0 {y}	D14 13 14 D	D23 22 23 D	D31 33 32 D	C40 40 44 {y}
L4 30 0 200m Rser=285	C5 30 4 {y}	D15 14 15 DD16	D24 23 24 D	D32 34 33 D	C41 41 45 {y}
Q1 q1c b1 qe 0 NPN	D5 6 7 D	15 16 D	C23 19 23 {y}	C33 33 37 {y}	D42 48 47 D
Q2 q2c b2 qe 0 NPN	D6 7 8 D	D17 16 17 D	C24 20 24 {y}	I2 S2 0 {z}	D43 49 48 D
L3 b2 b1 1µ	C6 1 5 {y}	C14 9 13 {y}	V1 N1 0 4	D33 39 38 D	C42 46 50 {y}
R2 N1 b2 1500	C7 2 6 {y}	C15 10 14 {y}	D25 31 30 D	D34 40 39 D	D44 50 49 D
L5 nsw qe 100µ Rser=0.2	D7 2 3 D	C16 11 15 {y}	C26 0 31 {y}	C34 38 42 {y}	D45 51 50 D
S1 0 nsw N1 N001 MS	D8 3 4 D	D18 17 18 D	C28 32 31 D	D35 41 40 D	C43 44 48 {y}
R1 0 N001 78k	C8 3 7 {y}	D19 18 19 D	D27 35 34 D	D36 42 41 D	C44 45 49 {y}
R3 N001 1 10Mega	I1 S1 0 {z}	C17 16 20 {y}	D28 36 35 D	C35 36 40 {y}	D46 52 51 D
C25 0 N001 10n	D9 8 9 D	D20 19 20 D	C27 34 38 {y}	C36 37 41 {y}	C45 43 47 {y}
D1 30 1 D	D10 9 10 D	D21 20 21 D	D21 20 21 D	D37 43 42 D	C46 47 51 {y}
C1 0 1 {y}	C9 8 12 {y}	C18 14 18 {y}	C29 30 32 {y}	C37 35 39 {y}	DS2 S2 54 D
D2 1 2 D	D11 10 11 D	C19 15 19 {y}	CS2 S2 0 {y}	D38 44 43 D	C47 48 52 {y}
D3 4 5 D	D12 11 12 D	D22 21 22 D	C30 30 34 {y}	D39 45 44 D	D47 53 52 D
D4 5 6 D	C10 6 10 {y}	C20 13 17 {y}	D29 37 36 D	C38 42 46 {y}	C48 42 46 {y}
C2 4 8 {y}	C11 7 11 {y}	C21 17 21 {y}	D30 38 37 D	D40 46 45 D	C48 49 53 {y}
					C49 50 54 {y}

Tabela 2 - Netlist do gerador de ±10kV.

de 152mW para 360mW.

O resultado das simulações do circuito com mais um multiplicador aumentando a carga capacitiva, dado nas figuras seguintes mostra a frequência de oscilação se reduzindo a 25KHz, a corrente consumida no início passando de 210mA para 312mA, a no fim do transiente passando de 25mA a 52mA médios, e de 38 a 90mA eficazes, sendo que a potência dissipada passa

Esta condição não é possível porque o transformador perde eficiência ao operar fora da faixa de frequências entre 40 e 80 kHz, o que não é contemplado no modelo linear adotado. Então se passa a medir e modificar um circuito protótipo para se obter o desempenho desejado, tal como discutido a seguir.

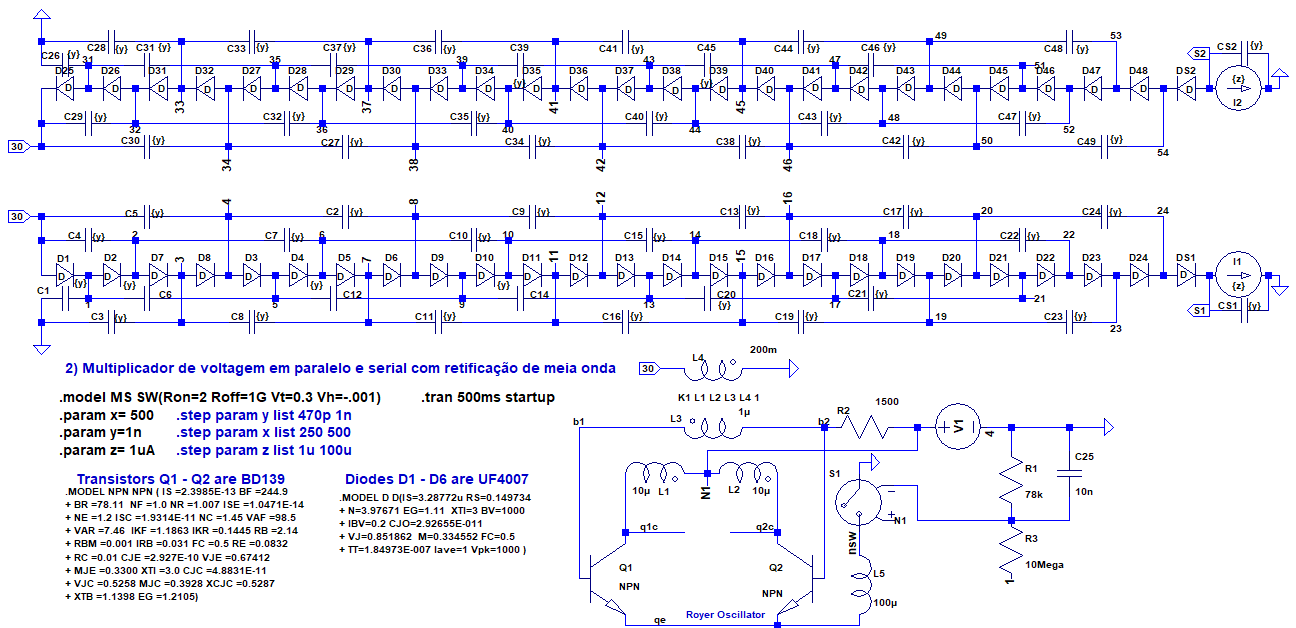


Figura 9: Esquemático do gerador de ±10kV.

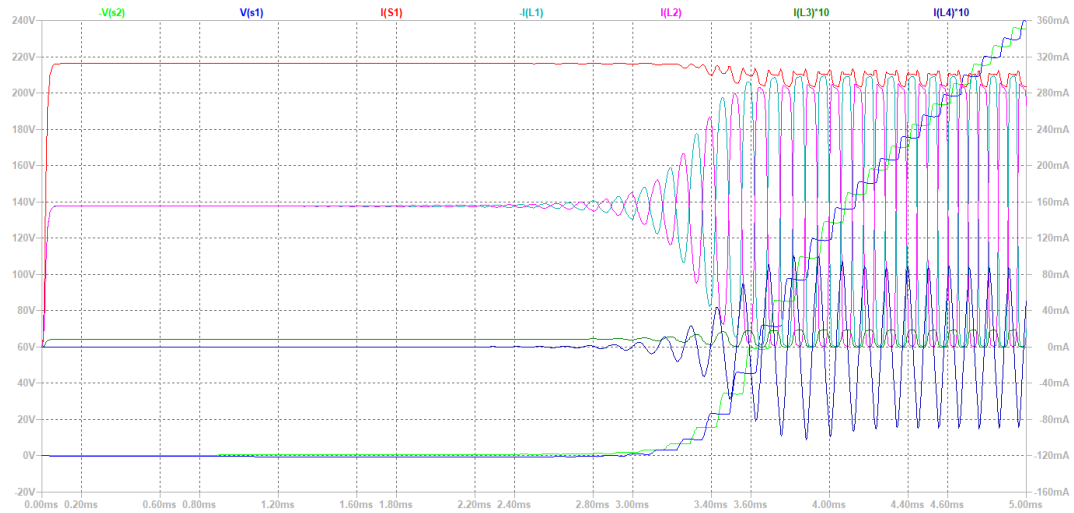


Figura 10: Início do transiente.

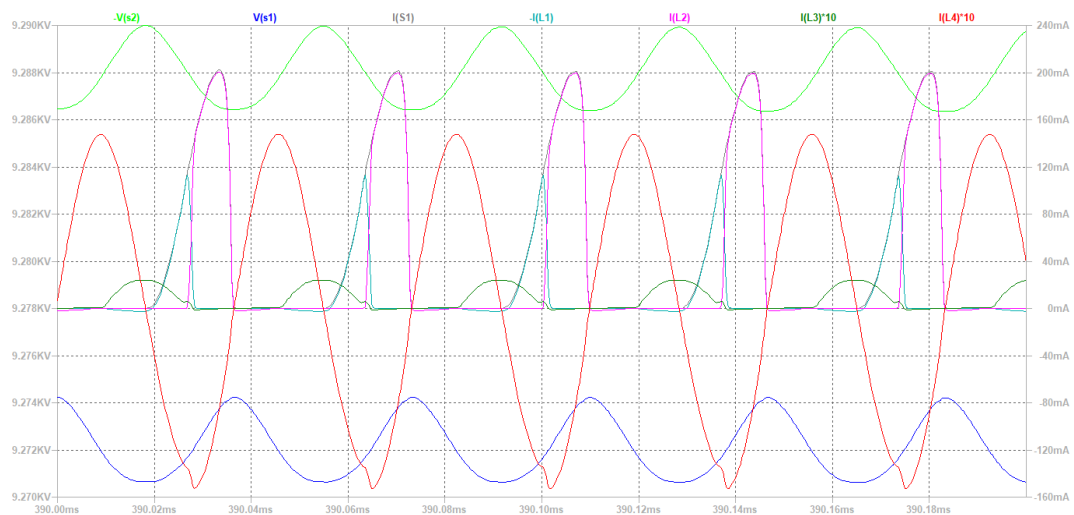


Figura 11: Final do transiente, regime estacionário.

#### 4. Problemas na Ressonância

Em um oscilador Royer ressonante cada indutor do transformador forma um circuito ressonante que, por ser de ferrite o seu núcleo, é não-linear [1-3]. Para fazê-lo oscilar em uma determinada frequência, dentro da faixa de operação do transformador escolhido para compô-lo, é preciso fazer dominante o modo de oscilação do primário, controlado pelo capacitor entre os coletores, e não o do secundário, dominado pela capacitância de entrada dos multiplicadores, fazendo com que o primeiro receba mais energia na partida. Modelar um transformador deste tipo é tão complexo e caro, que se torna mais prático simular medidas feitas em circuitos construídos e modificados segundo o resultado de simulações particulares, em um processo iterativo linear por partes que leve ao projeto ótimo. Assim foi feito o primeiro circuito-protótipo segundo o esquema da figura 9, que foi analisado e modificado

progressivamente, de modo a garantir a partida em uma frequência estável, de operação eficiente em termos de potência.

1 – Um capacitor foi colocado entre os coletores dos transistores, e seu valor ajustado para trazer a frequência de operação do oscilador para cerca de 60 kHz.

2 – Os valores de R2 e V1 foram ajustados para otimizar eficiência e confiabilidade de partida nas condições apresentadas, que é melhorada ainda mais pelo controle do valor e a derivada no tempo da tensão de alimentação na partida, e pela colocação de L5 em série com a fonte de alimentação e não com os emissores dos transistores.

3 – O número de estágios dos multiplicadores foi determinado pela tensão de saída desejada, 10kV, e para garantir a partida do oscilador em condições mais próximas possíveis do ideal.

Observou-se ressonâncias de 63.1kHz com capacitor



entre coletores de 220nF e 30.0kHz com 1.22uF, com partida estável. Para a indutância do primário de 20uH isso corresponde a capacitâncias internas adicionais de 98nF e 190nF, consequência das não linearidades do transformador. Para se obter 1kV na saída do dobrador, condição de máxima tensão suportada pelo transformador e pelo multiplicador, foi preciso ajustar a fonte do protótipo para respectivamente 3.3V, resultando em um consumo de 70mA ou 230mW, e 5.0V e 210mA ou 1.050W. A maior eficiência em 63kHz é por estar no meio da faixa de operação do transformador CCFL, entre 40 a 80 kHz,

### 5. Estabilização da Alta Tensão

A tensão de saída deve ser estabilizada por

realimentação negativa. Recomenda-se o uso de circuitos chaveados, como um comparador acionando um transistor DMOS ou circuitos integrados comerciais para fontes CCFL, que possibilitam o controle eficiente com baixo custo. Um deles é o LT1184 da Linear Technology [11] dado em um exemplo de circuito no arquivo lib\sub\LT1184F da biblioteca do LTSPICE, mostrado na figura 12. Além de estabilizar a tensão de saída com precisão, baixos ruído e consumo, inclui algumas formas de proteção do circuito. Interessante usar microprocessador, ADC e DAC para controlar a saída aproveitando sua alta estabilidade, implementando também a monitoração e aquisição de dados.

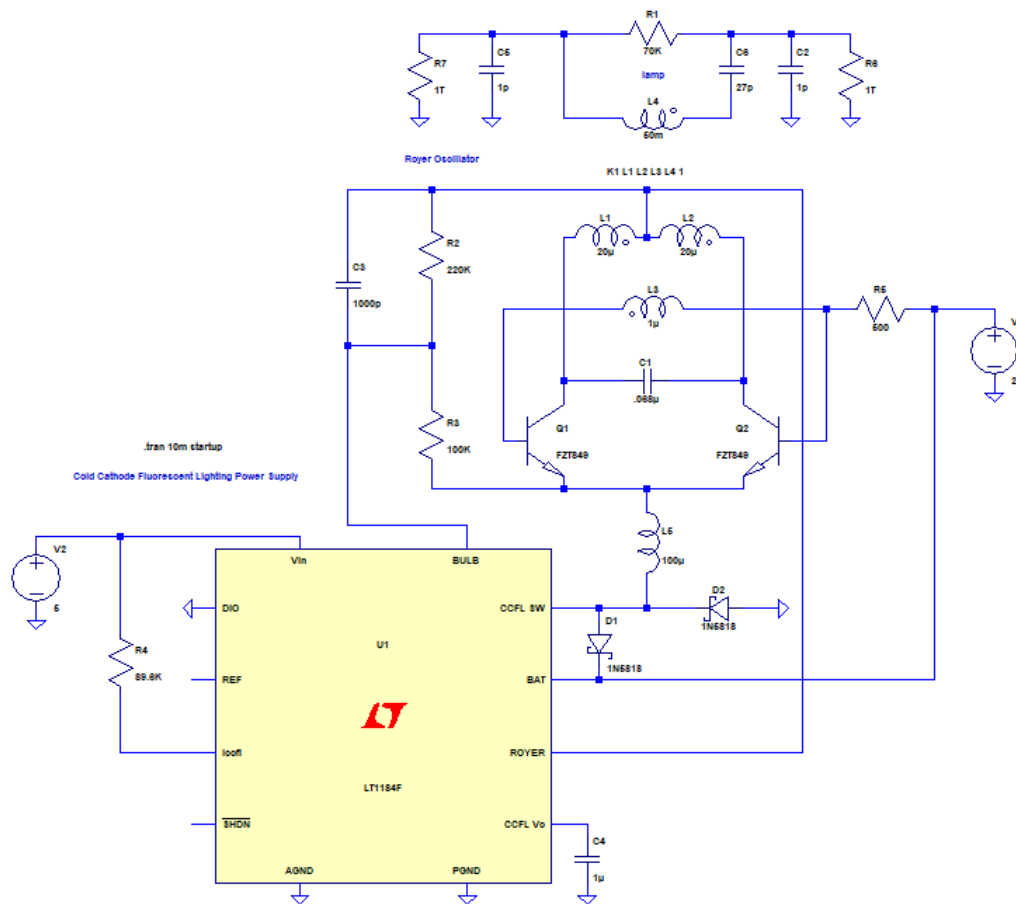


Figura 12: Inversor DC-DC com oscilador Royer Ressonante e controlador LT1184 [11].

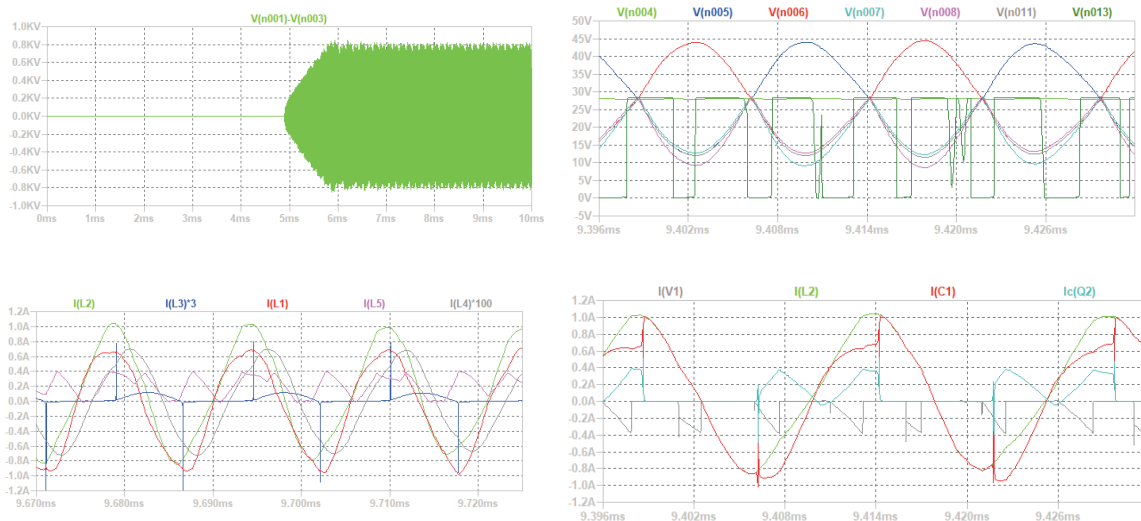


Figura 13: Formas de onda resultantes de simulação do circuito dado na figura 12.

## 6. Considerações para Produção

Os protótipos construídos com o mesmo tipo de transformador apresentaram igual funcionamento, a diferença com uso de transformadores com tipos diferentes foi compreensível e controlável, pois se deu nas condições de partida, na frequência de oscilação e na capacidade de fornecer mais ou menos potência.

A mudança de tecnologia de displays, de LCD para LED afetou a produção de transformadores e circuitos integrados para fontes de CCFL, mas dado o alto consumo no passado e a necessidade de repor peças de equipamentos então projetados faz com que se possa contar com esses componentes de alta qualidade e baixo custo para um futuro no qual novas mudanças tecnológicas poderão ocorrer, como o uso de componentes piezo- ou tribo-elétricos.

## 7. Conclusões

Este estudo resultou no domínio de uma forma de implementação de conversores CC-CC de baixa para alta tensão, com oscilador Royer ressonante a transformador de alta tensão e alta relação de espiras de primário para secundário de custo, dimensões e preços reduzidos, e de alta eficiência. O circuito dado na figura 2 construído sem a chave S1 e com um multiplicador serial, produziu 6kV consumindo uma corrente de 160mA de uma fonte de 5V.

A continuação natural é utilizar outros multiplicadores, como o de tipo híbrido dado na figura 2, e após implementar o controle não linear a ser feito por um circuito integrado comercial, como um ASIC [1-3] ou um computador do tipo do Raspberry Pi [19], que fará além do controle a monitoração e a aquisição de dados para a Internet. O modo mais simples é com componentes disponíveis no laboratório: um comparador e uma chave analógica que pode ser um único transistor MOSFET. O controle linear da tensão ou corrente de alimentação, embora menos eficiente no rendimento de potência, pode oferecer melhor estabilidade e ruído

para a alta tensão de saída.

A amostragem para controle pode ser feita no primeiro estágio do multiplicador, ao nível de 1 kV, para o qual a resistência de amostragem ou a corrente amostrada podem ter valores bem menores do que ao ser a amostragem feita na saída de 10kV, caso a carga correspondente aos detectores seja suficientemente pequena.

No mercado internacional encontra-se inúmeros produtos comerciais [11-12]. E existem outras tecnologias para se explorar, em desenvolvimento ou mesmo aquisição de produto comercial para a aplicação em vista:

- 1 – Fontes comerciais oferecidas por distribuidores autorizados, sejam completas [13-14], ou em partes como as para CCFL que fornecem até 1kV, completadas por módulos retificadores multiplicadores de tensão;
- 2 – Geradores de alta tensão por piezo-eletricidade e tribo eletricidade ou uso de transformador piezo - elétrico como dado em [14-15] e usado em uma fonte comercial [16];
- 3 – Bobina Tesla, também usada em módulos de conversores CC-CC de alta tensão comerciais [17];
- 4 – Multiplicadores com diodos e capacitores, sem transformador [18].

## Agradecimentos

Os autores desejam externar seus reconhecimentos a Gabriel L. Azzi, Tecnologista Senior da COTEC-CBPF, pelas sugestões e discussões sobre circuitos, e me receber no grupo que chefia; a Luiz Mendes do Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas - LIP, pelas discussões dos requisitos dos detectores RPC, e fornecimento de componentes importados e ao CBPF, pela oportunidade de trabalhar, aprender e ensinar tecnologia, ciência, e conviver desde 1984.

- 
- [1] J. Williams, Linear Technology AN118, High Voltage, Low Noise, DC/DC Converters, 2008.
- [2] J. Williams, Linear Technology AN55, Ultracompact LCD Backlight Inverters, 1993.
- [3] J. Williams, Linear Technology AN81, A Fourth Generation of LCD Backlight Technology, 1999.
- [4] M. Vaz, Multiplicadores de Tensão a Diodos e Capacitores, Lab. de Instrumentação Eletrônica, CBPF, 2018
- [5] Coiltronics, CCFL Transformer Application Note. Disponível em <http://www1.cooperbusmann.com/pdf/f2b36a2e-7d40-490e-8b6a-bb5360241a83.pdf>. [Acesso em Maio/2018].
- [6] P. Abreu et al., MARTA: A high-energy cosmic-ray detector concept with high-accuracy muon measurement. *The European Physical Journal C*, April 2018, 78:333.
- [7] <http://www.google.com>; <http://www.mouser.com>; <http://www.digikey.com>; <http://www.farnell.com>; <http://www.aliexpress.com>. [Acesso em Maio/2018].
- [8] Linear Technology, Design Simulation and Device Models: download de software LTSPICE. Disponível em <http://www.linear.com/designtools/software/>. [Acesso em Maio/2018].
- [9] ST Technologies, BD139. Disponível em <http://www.st.com/en/power-transistors/bd139.html>. [Acesso em Maio/2018].
- [10] Azzi, G.L., Fonte de Alta Tensão Chaveada para Tubos Fotomultiplicadores, Tese de Mestrado, CBPF, 2006.
- [11] Exemplos do software LTSPICE da referência [8]: "...\\LTspiceXVII\\lib\\sub\\LT1184F.sub". [Acesso em Maio/2018].
- [12] XP Enco, Q Series, isolated DC to HV DC converters. Disponível em <https://www.XPpower.com>. [Acesso em Maio/2018].
- [13] Spellman Inc., PMT High Voltage Module. Disponível em <http://www.spellmanhv.com>. [Acesso em Maio/2018].
- [14] S. Rafique, Piezoelectric Vibration Energy Harvesting, Modeling & Experiments, Springer, 2018.
- [15] Z.L. Wang et alii, High Output Piezo/Triboelectric Hybrid Generator, *Scientific Reports* 5, Article 9309 (2015), doi:10.1038/srep09309. [Acesso em Maio/2018].
- [16] J. Williams, Linear Technology AN65-1, Techniques for 92% Efficient LCD Illumination, 1995.
- [17] Micromechatronics, Inc., World's First Piezoelectric DC-DC Converter. Disponível em [http://www.mmech.com/images/stories/Standard\\_Products/Transformers/Converter/Catalogue-rev05.pdf](http://www.mmech.com/images/stories/Standard_Products/Transformers/Converter/Catalogue-rev05.pdf). [Acesso em Maio/2018].
- [18] Disponível em <https://www.amazon.com/s?field-keywords=power+converters>. [Acesso em Maio/2018].
- [19] Wikipédia, Raspberry Pi. Disponível em [https://pt.wikipedia.org/wiki/Raspberry\\_Pi](https://pt.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi). [Acesso em Maio/2018].

Notas Técnicas é uma publicação de trabalhos técnicos relevantes, das diferentes áreas da física e afins, e áreas interdisciplinares tais como: Química, Computação, Matemática Aplicada, Biblioteconomia, Eletrônica e Mecânica entre outras.

Cópias desta publicação podem ser obtidas diretamente na página web <http://revistas.cbpf.br/index.php/nt> ou por correspondência ao:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
Área de Publicações  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4<sup>o</sup> andar  
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ  
Brasil  
E-mail: [alinecd@cbpf.br](mailto:alinecd@cbpf.br)/[valeria@cbpf.br](mailto:valeria@cbpf.br)  
<http://portal.cbpf.br/publicacoes-do-cbpf>

Notas Técnicas is a publication of relevant technical papers, from different areas of physics and related fields, and interdisciplinary areas such as Chemistry, Computer Science, Applied Mathematics, Library Science, Electronics and Mechanical Engineering among others.

Copies of these reports can be downloaded directly from the website <http://notastecnicas.cbpf.br> or requested by regular mail to:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
Área de Publicações  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4<sup>o</sup> andar  
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ  
Brazil  
E-mail: [alinecd@cbpf.br](mailto:alinecd@cbpf.br)/[valeria@cbpf.br](mailto:valeria@cbpf.br)  
<http://portal.cbpf.br/publicacoes-do-cbpf>