

CARACTERIZAÇÃO BOLOMÉTRICA PARA ESTUDO DA RADIAÇÃO DE PLASMAS DE APLICAÇÃO

V. Bellintani¹, J.H.F. Severo², Rodolfo Curci Puraca³

¹Prof. Doutor do Departamento de Ensino da FATEC-SP

²Prof. Doutor do Instituto de Física da USP

³Aluno de iniciação Científica do curso de Mecânica de Precisão da FATEC-SP

vbellintanij@fatecsp.br

Resumo

O objetivo principal desta pesquisa é de caracterizar um sistema bolométrico e assim desenvolver, utilizando um bolômetro previamente projetado, uma câmera na qual este poderá capturar a radiação emitida pelo plasma e um circuito eletrônico o qual amplificará o sinal do bolômetro, para posterior estudo. Com esse arranjo experimental, será possível avaliar a contribuição das partículas neutras para a energia perdida de um plasma termonuclear, bem como das perdas radiativas.

Palavras-chave: diagnóstico, plasma, aplicação, fusão, tokamak

Introdução

Intensos esforços vem sendo realizados para se obter a fusão dos isótopos de hidrogênio em laboratório, trabalho esse que remonta ao início do século passado. A obtenção de uma fonte de energia economicamente viável será possível com a utilização da enorme quantidade de energia liberada nessa reação, semelhante ao que ocorre no interior das estrelas. Os resultados de anos de pesquisa permitiram projetar um protótipo de reator de fusão termonuclear baseado na configuração tokamak, no qual hidrogênio totalmente ionizado (plasma), confinado por um campo magnético com configuração toroidal, é percorrido por uma corrente elétrica e, que por efeito Joule, aquece-o à altíssimas temperaturas. Esse reator, chamado de ITER (International Termonuclear Experimental Reactor), que envolve o consórcio de países da União Europeia, EUA, Rússia Japão, China, Coreia do Sul e Índia, está sendo construído em Cadarache/França e deverá estabelecer os parâmetros definitivos para utilização da fusão termonuclear controlada como fonte alternativa de energia para a humanidade.

Para que o ITER possa operar em regime estacionário, é necessário prever as condições da descarga para o regime desejável. Neste sentido, hoje em dia existe um interesse muito grande em se obter leis de escalas confiáveis que permitam prever o comportamento do plasma em máquinas do porte do ITER. No entanto, para obtermos uma lei de escala confiável, se faz necessário estudar o comportamento do plasma em máquinas de diferentes portes. Assim sendo, o tokamak TCABR, que representa uma máquina de

pequeno porte¹ pode contribuir significativamente na obtenção desta lei; da mesma forma como contribuiu recentemente na construção de uma lei de escala para a rotação toroidal [1,2].

Neste trabalho descrevemos o projeto de uma câmera bolométrica para diagnóstico da potência total irradiada pelo tokamak TCABR, investigando e caracterizando o regime desejável para a descarga. A calibração do bolômetro metálico utilizado, feita na FATEC-SP é discutida em detalhe.

O objetivo desta pesquisa é de se construir um sistema bolométrico, utilizando um bolômetro metálico resistivo previamente projetado e fazer a caracterização do sistema óptico para a captação da radiação emitida pelo plasma criado pelo tokamak TCABR localizado no LFP-IFUSP (Laboratório de Física de Plasmas do Instituto de Física da Universidade de São Paulo).

Breve Revisão de Bolometria

O bolômetro tem sido usado para medidas da energia irradiada de plasmas em várias aplicações tecnológicas. Atualmente o avanço científico permite a obtenção de sensores dispostos em matriz tridimensional, baseado no princípio de poço quântico, operando no infravermelho. O sistema exibe uma competitiva condutância térmica e coeficiente de temperatura (5×10^{-8} W/K, $-2,9$ % K^{-1}), sem necessidade de refrigeração adicional [3]. Um bolômetro de grafeno sem resfriamento adicional, operando na faixa de terahertz foi construído pela superposição de camadas p-n de grafeno. Testes mostram um desempenho superior aos tradicionais bolômetros semicondutores [4].

Sensores metálicos se tornaram bem mais eficientes e imunes a altos índices de radiação, utilizando platina como material absorvedor. Projetados para o tokamak ITER, mostraram uma constante de resfriamento duas vezes menor que os construídos em kapton, e duas vezes mais sensíveis [5]. Existe ainda, a matriz bolométrica utilizando supercondutores de interferência quântica (SQUID), projetado para o Telescópio Internacional do Atacama [6].

Tem início também o uso dos modos ressonantes de materiais supercondutores, aumentando bastante a sensibilidade dos sensores. Esta inovação faz uso de meta-materiais interligados [7]. Um excelente desempenho de $1,12$ mV mK^{-1} foi relatado para medida

¹ O TCABR tem superfícies magnéticas circulares com seguintes parâmetros: raio maior de plasma 61,5cm, raio menor 18cm, campo magnético $B_T = 1$, 1T, corrente ôhmica 60 - 100kA, tensão de enlace 1.5 - 3V, densidade do plasma 1 a 4×10^{13} cm^{-3} , e temperaturas de elétrons e ions estimadas de 400 - 600eV e 150 - 250eV, respectivamente.

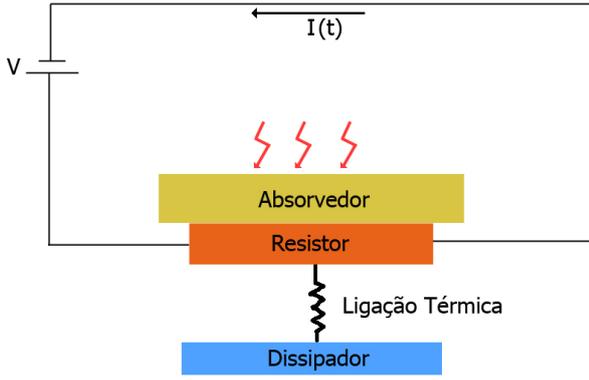


Figura 1: Constituição básica de um bolômetro

de raios-x moles (0,5-1,5Å) em fontes pulsadas de plasmas. A medida da radiação se dá pela variação da resistência elétrica de uma estrutura em ouro [8]. Com o uso dessas matrizes, técnicas de inversão foram aplicadas para obter imagens confiáveis das regiões menos acessíveis da coluna de plasmas[9].

Princípios de funcionamento do bolômetro

O bolômetro é um sensor que conectado a uma fonte de tensão consegue estimar a potência irradiada sobre ele. A elevação da temperatura do material absorvedor faz o material resistivo variar a sua resistência e consequentemente faz a corrente mudar de valor proporcionalmente com a potência irradiada.

O bolômetro é constituído por uma camada absorvedora sensível a radiação, ligada a ela está a resistência do bolômetro, que é ligada a um dissipador de calor. A figura 1 mostra a esquematização básica de um bolômetro.

O material resistivo do bolômetro possui uma capacidade térmica C , está ligado ao dissipador de calor que está a uma temperatura T e o material que liga o resistor ao dissipador tem uma condutância G .

Supondo que não há perda de calor adicional, o bolômetro está absorvendo uma potência irradiada constante P_0 , a qual aumenta o valor da temperatura T do dissipador de calor a uma temperatura T_1 . Assim a condutância pode ser dada de acordo com a equação 1.

$$G = \frac{P_0}{T_1} \quad (1)$$

Imaginando-se agora que o bolômetro está sob uma irradiação variável e assim consequentemente com uma potência variável $P_V(t)$ que ele parcialmente absorve, a temperatura do detector irá variar no tempo de acordo com que $P_V(t)$ varia, conforme a equação 2.

$$\eta P_V(t) = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dT_1}{dt} \quad (2)$$

Onde η é o coeficiente de absorção da radiação pelo bolômetro, chamada também de eficiência quântica; C é a capacidade térmica dada em joules por kelvin e definida pela equação 3.

$$dQ = CdT_1 \quad (3)$$

A potência total P_T absorvida pelo detector é dada pela equação 4, que é a soma da potência constante P_0 com a potência variável absorvida pelo detector ηP_V .

$$P_T = P_0 + \eta P_V(t) \quad (4)$$

Substituindo-se a equação 1 e a equação 2 na equação 3, obtém-se a equação 5.

$$P_T(t) = GT_1 + C \frac{dT_1}{dt} \quad (5)$$

Supondo que $P_V(t)$ é uma função degrau em $t=0$, $P_V(t<0)=0$ e $P_V(t>0)=P_1$. As soluções desta equação são: quando existe um fluxo constante de potência faz com que:

$$\frac{dT_1}{dt} = 0 \quad (6)$$

Assim chega-se a equação 7.

$$T_1 = \frac{P_0}{G} \quad (7)$$

E a outra solução é quando o fluxo de potência varia, chega-se a equação 8.

$$T_1 = \frac{P_0}{G} + \eta \frac{P_1}{G} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (8)$$

A equação de resfriamento do bolômetro é dada também pela equação 9.

$$T_1 = T_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

Onde τ é chamado de constante do tempo do detector e é definida pela equação 10.

$$\tau = \frac{C}{G} \quad (10)$$

Pela equação 8 pode-se ver que quanto menor é a condutância térmica G do detector, maior será a variação de temperatura, o que corresponderá a uma amplitude maior de valores detectáveis pelo bolômetro, mas pela equação 10, que mostra a constante de tempo do detector, percebe-se que se a condutância térmica for muito pequena, o bolômetro se tornará lento, prejudicando as medições pois não se deseja obter uma medida que sofreu perturbações pelas medidas anteriores.

Deste modo, as características do bolômetro devem se equilibrar para uma correta dosagem entre a rapidez e a amplitude da variação de temperatura sofrida pelo detector. Para o plasma do TCABR, um tempo característico de 200 ms é, a princípio, aceitável. Para um absorvedor em ouro (1 cm×1 cm×4 μm), temos uma capacidade térmica de 128 J (kg·K)⁻¹, e massa igual a 7,7 mg.

Medidas de energia irradiada

Bolometria é o nome dado a medição da energia total incidente em uma superfície, usada para determinar a energia perdida do plasma. O estudo é necessário para se entender o balanço global de energia dos plasmas, o que é de grande interesse nos estudos de fusão confinada. Os detectores são geralmente feitos com um filme fino de metal que absorve a energia incidente, em forma de radiação ou por partículas ou por ambas e que aumentam a temperatura do detector. A tensão obtida na saída de um bolômetro será proporcional a potência absorvida S_B , escrita na forma:

$$S_B = \int P(\nu)A(\nu)d\nu + S_p \quad (11)$$

Onde $P(\nu)$ é a potência em um espectro emitida por um plasma na direção do bolômetro (figura 2), e $A(\nu)$ é a absorvidade a uma frequência ν . A resposta do bolômetro devido as partículas incidentes depende dos detalhes da interação na superfície e a

resposta a radiação eletromagnética depende da absorvidade da superfície.

Um bolômetro ideal deveria parecer como um corpo negro, absorvendo 100% da radiação incidente, independentemente do comprimento de onda da radiação.

Um bolômetro é aquecido pela radiação incidente ou por um fluxo de partículas, e esfria ou pela condução ou pela radiação térmica. Se for adotado t_D como constante de tempo de resfriamento de um detector por condução ou radiação térmica, então no caso em que a característica do tempo do sinal é pequena quando comparado com t_D , a temperatura T do detector varia como:

$$T(t) = \frac{1}{m c_p} \int_0^t P(t)dt \quad (12)$$

Onde m é a massa do detector e c_p é o calor específico a uma pressão constante. Assim a potência irradiada é encontrada simplesmente como a derivada de T em relação ao tempo.

O método mais comumente usado para se medir a

Figura 2: Posicionamento da câmera

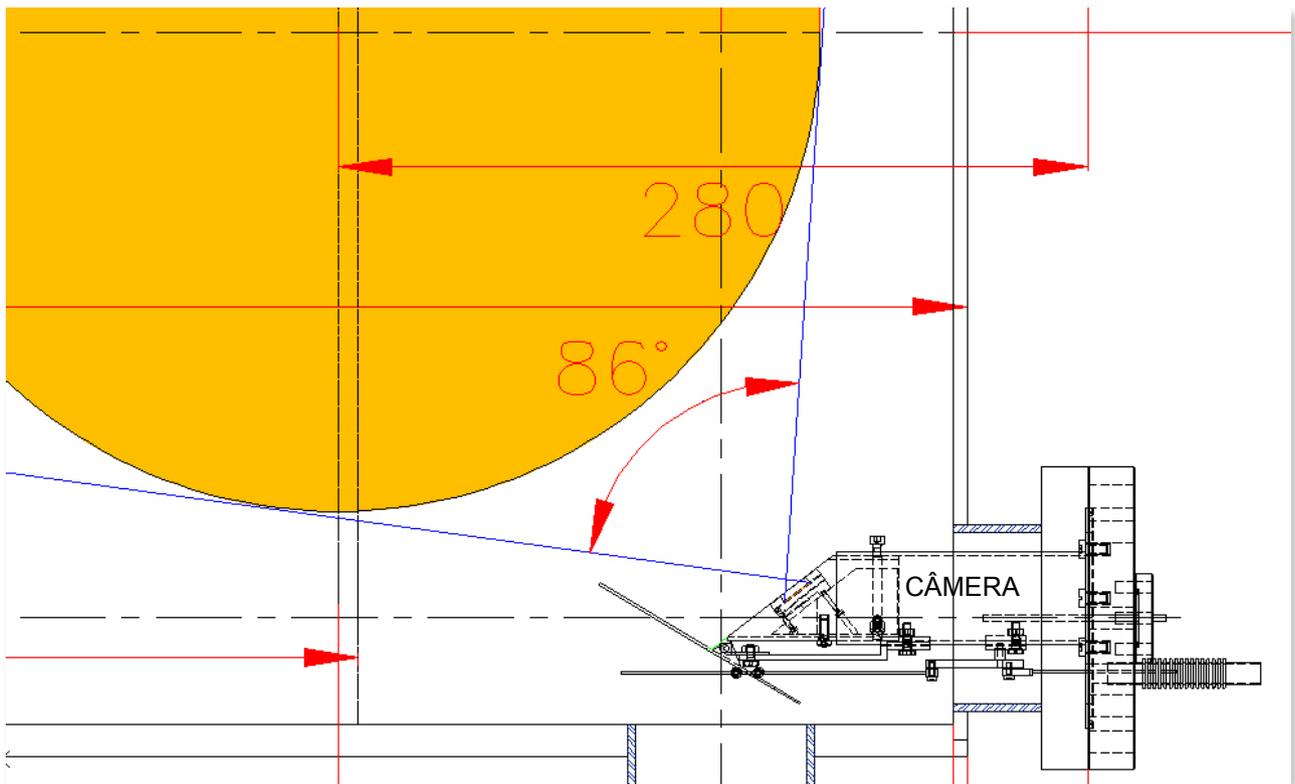
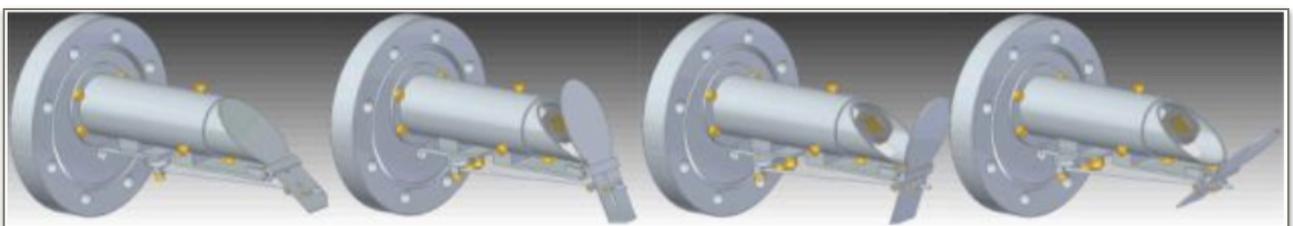


Figura 3: Movimentação da câmera



temperatura em um bolômetro é monitorar a mudança na resistência elétrica do elemento. O elemento é depositado como um filme fino na forma de uma tira comprida enrolada sobre um substrato isolante. Para analisar a sensibilidade de tal bolômetro, é assumido que se tem uma tira de comprimento L , largura W e espessura X . O elemento é feito de um metal de resistividade como uma variação linear com a temperatura.

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha T) \quad (13)$$

Quando uma corrente I passa através do elemento por uma fonte de potencial externa, a queda de potencial é:

$$V = IR = \frac{IL\rho}{XW} \quad (14)$$

E a temperatura é relacionada com a potência incidente por:

$$T(t) = T_0 + \frac{E}{mc_p} \quad (15)$$

Como $m = \nu XWL$,

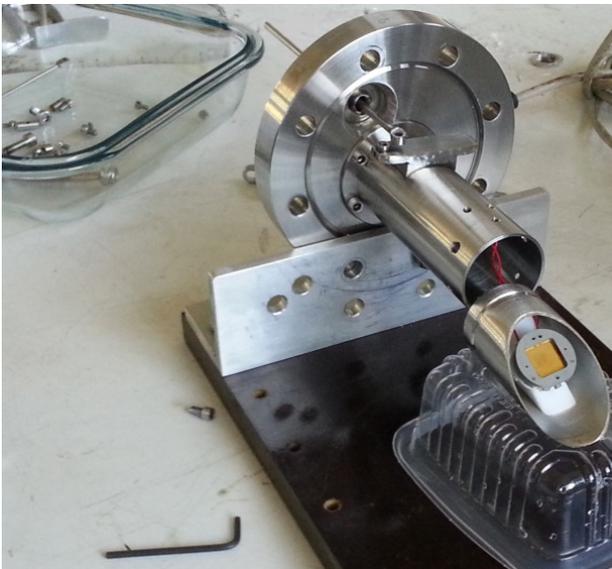
$$T(t) = T_0 + \frac{1}{c_p X \nu} \int_0^t F(t) dt \quad (16)$$

Onde c_p é o calor específico do material do elemento e m é a sua massa, ν é a densidade e $F(t)$ é a potência absorvida por unidade de área. Então, combinando as equações, tem-se:

$$V(t) = \frac{IL\rho_0}{XW} \left\{ 1 + \alpha \left[T_0 + \frac{1}{c_p X \nu} \int_0^t F(t) dt \right] \right\} \quad (17)$$

Derivando a equação acima obtêm a equação:

Figura 4: Montagem da câmera



$$\frac{dV}{dt} = \frac{\rho_0 \alpha I F(t)}{c_p \nu} \frac{L}{X^2 W} \quad (18)$$

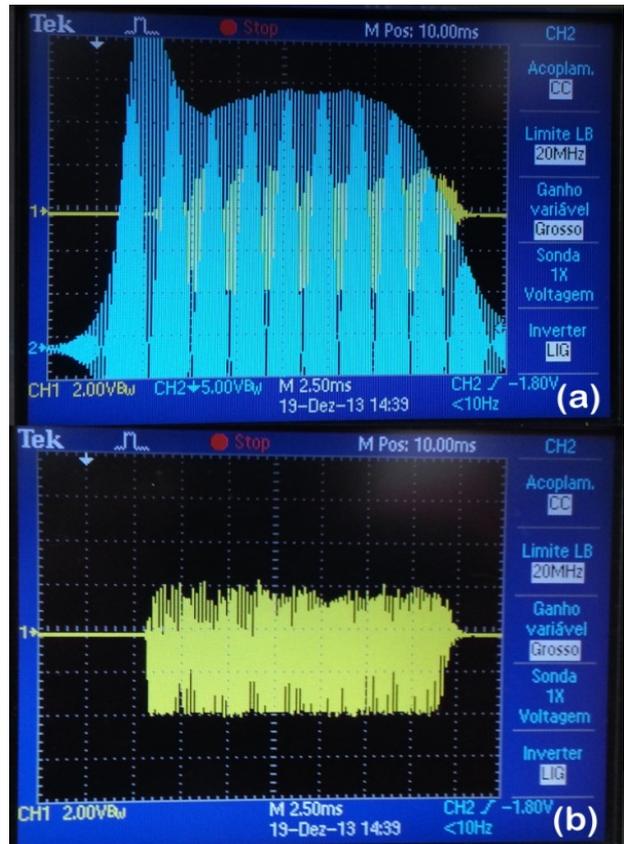
Metodologia

Foi projetada a câmera de modo que fosse abrigado o bolômetro "2π", uma referência ao ângulo de campo visual do sensor. Neste tipo de câmera o bolômetro analisa toda a radiação emitida pelo plasma diretamente, podendo captar também a potência emitida por partículas presentes no plasma. Isto se deve a exposição total da folha absorvedora ao volume de plasma analisado. O ângulo de visada da coluna de plasma é de 86° (figura 2). Devido a proximidade do plasma, faz-se necessário um anteparo de proteção do bolômetro, diminuindo a ação de *sputtering* excessivo.

Por ficar dentro do vaso do tokamak, esta câmera foi projetada para trabalhar em ambiente de alto-vácuo, suportando pressões de até 10⁻⁸ mbar, tendo também uma característica peculiar, pois permite por manuseio externo a movimentação do anteparo de proteção, apesar de sua instalação no interior da câmara do TCABR. Esta característica tem como objetivo proteger o bolômetro em momentos de não utilização para retirada de medidas, como quando o tokamak está operando em modo de limpeza.

A movimentação foi feita de forma mecânica, na qual um fole, localizado na parte externa do tokamak é comprimido ou esticado. Este movimento empurra ou puxa um disco, localizado na parte inferior da câmera, fazendo-o rotacionar. Ele tem o objetivo de amplificar o movimento pela diferença de medida nos raios que estão

Figura 5: Sinal com a tampa aberta



fixadas as hastes presa no fole e presa na tampa. A haste presa na tampa está fixada no maior raio do disco e faz a tampa abrir e fechar, puxado-a e empurrando-a. A figura 2 mostra o posicionamento da câmera dentro do tokamak e a figura 3 mostra a câmera abrindo, segundo a simulação feita por software.

A montagem da câmera, feita em aço não magnetizável é mostrada na figura 4. Pode-se observar a face absorvedora em ouro do bolômetro, embaixo e a direita. O sinal elétrico é conduzido ao exterior da câmera por um cabo de "par trançado", para minimizar ruídos causados pelos fortes campos eletromagnéticos presentes durante a descarga.

Resultados

O sinal foi coletado através de um osciloscópio digital em um único disparo de plasma de limpeza. O osciloscópio foi programado para começar a gravar o sinal do bolômetro segundo a variação de sinal da tensão de loop. O sinal do bolômetro é indicado em amarelo e o sinal da tensão de loop é indicado em azul.

Na figura 5 é mostrado o sinal quando a tampa estava aberta durante o disparo. Em (a) é mostrado o sinal do bolômetro em conjunto com o sinal da tensão de loop e em (b) é mostrado somente o sinal do bolômetro.

Foi utilizado um osciloscópio digital, assim coletou-se o sinal para seu refinamento via software. O primeiro refinamento foi a suavização por janela de média, que consiste em selecionar uma determinada quantidade de pontos em x e em y e fazer a média destes pontos colocando no gráfico. Fez-se uma suavização utilizando 35 pontos, mostrada na figura 6 (a) e uma suavização utilizando 75 pontos mostrada na figura 6 (b).

Em seguida fez-se a transformada rápida de Fourier do sinal coletado pelo bolômetro, mostrada na figura 7.

Conclusão

Os testes feitos no circuito impresso mostraram que com menor ganho tem-se menor ruído. A amplificação do sinal era necessária nos testes do bolômetro feitos na bancada, pois se utilizava uma lâmpada de 60 W (fonte de calor radiante), já para a operação no tokamak este ganho não é necessário, pois a potência da luz irradiada será muitas vezes maior que a potência da lâmpada, assim utilizar um ganho menor acarretará em um ruído menor e a não extrapolação da voltagem analisada.

Os preparativos e a colocação da câmera bolométrica no tokamak foram etapas trabalhosas, pois foi necessário muito cuidado na montagem e no ajuste do sistema mecânico. Quando tudo estava já ajustado foi necessário travar as porcas e para isso foi preciso martelar os pinos

onde as porcas estavam rosqueadas, para que eles deformassem, travando as porcas. Mas com esta operação o sistema ficou um pouco emperrado, dificultando a movimentação da tampa. Com isso foi necessário fazer novos ajustes, desbastando algumas peças para que elas tivessem maior área livre para se movimentar. Com isso feito, foi preciso desmontar a câmera, lavar e montar novamente, ajustando o sistema mecânico, mas agora já com as porcas travadas. Os diagnósticos de vácuo após a montagem da câmera no vaso principal não acusaram vazamentos.

O sinal coletado do bolômetro após a suavização por janela média mostrou que a linha correspondente à voltagem coletada estava posicionada na região negativa do gráfico, figura 6. Sabe-se que a potência não pode ser negativa assim, percebeu-se que por descuido deixou-se a função inverter no osciloscópio ligada, como é mostrado na figura 5. Deste modo a potência medida pelo bolômetro foi positiva, coincidindo com o que era esperado. Com a transformada rápida de Fourier do sinal do bolômetro constatou-se picos grandes nas frequências 5 kHz e 10 kHz e picos menores em 15 kHz e 20 kHz, conforme figura 7. O plasma de limpeza do tokamak tem frequência de 5 kHz como mostrado na figura 7, que mostra os picos de frequência da tensão de loop. Deste modo os dados coletados pelo bolômetro condizem com os dados da tensão de loop e por consequência do plasma estudado.

O circuito eletrônico está em funcionamento, mas são necessárias algumas aprimoramentos como a colocação de capacitores em paralelo com os resistores de realimentação dos amplificadores operacionais, para que estes trabalhem de forma mais estável sem oscilar. É necessário colocar o trimpot de maneira que seja mais acessível para o ajuste da ponte de Wheatstone para regular o drift da tensão em relação ao terra, ou mesmo fazer um circuito que se auto ajuste.

A câmera bolométrica foi colocada com sucesso no tokamak, ficando de forma fácil a abertura e o fechamento da tampa de proteção do bolômetro 2π .

O sinal após receber tratamento permitiu observar características do plasma de limpeza como a sua

Figura 6: Suavização por janela de média

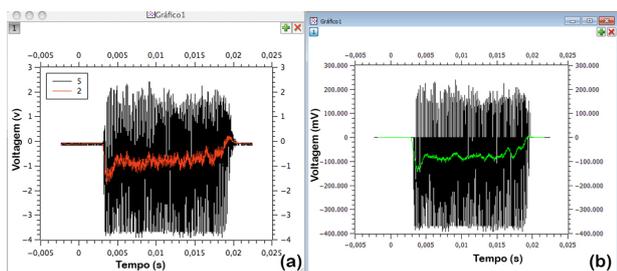
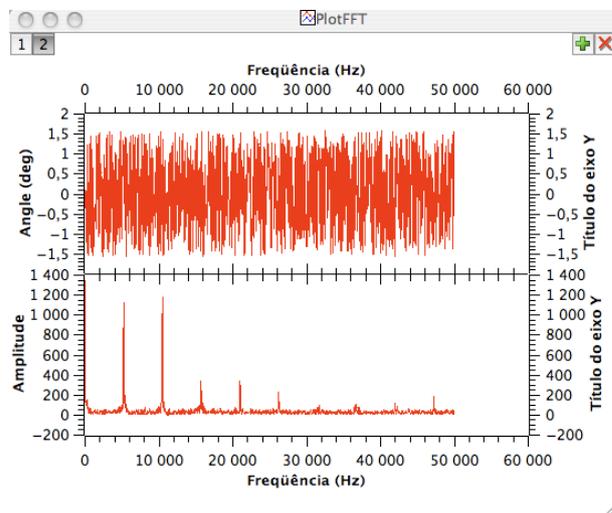


Figura 7: Transformada rápida de Fourier do sinal do bolômetro



frequência em 5 kHz, o que evidencia o funcionamento do sistema bolométrico. É necessário fazer o teste do bolômetro em um disparo de plasma usando 100% da potência do tokamak TCABr.

Agradecimentos

Agradecemos à FATEC SP, pela realização das medidas e empréstimo de equipamentos. Ao CNPq pela bolsa concedida ao aluno Rodolfo Puraca, cujo trabalho criterioso foi determinante na realização desse experimento.

Ao Professor Cezar Soares Martins (FATEC SP), pelo cessão do espaço no laboratório didático e pelas esclarecedoras observações e propostas científicas. Ao Juan Iraburu Elizondo (USP), pela contribuição experimental com os materiais utilizados e ajustes na vedação da câmara de vácuo.

Referências Bibliográficas

- [1] F. I. Parra, M. F. F. Nave, A. A. Schekochihin, C. Giroud, J. S. de Grassie, J. H. F. Severo, P. de Vries, K. D. Zastrow, and JET-EFDA Contributors
2012 - *Physical Review Letters* **108** 095001-1.
- [2] Yu.K. Kuznetsov, I.C. Nascimento, C. Silva, V. Bellintani, H. Figueiredo, Z.O. Guimarães-Filho, I.L. Caldas, R.M.O. Galvão, J.H.F. Severo, et al
2012 *Nuclear Fusion* **52** 063004
- [3] F Forsberg, A C Fischer, N Roxhed, B Samel, P Ericsson, G Stemme and F Niklaus
2013 *J. Micromech. Microeng.* **23** 045017
- [4] V Ryzhii, T Otsuji, M Ryzhii, N Ryabova, S O Yurchenko, V Mitin and M S Shur
2013 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** 065102
- [5] L Giannone, D Queen, F Hellman and J C Fuchs
2005 *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** 2123
- [6] V Zakosarenko, M Schulz, A Krueger, E Heinz, S Anders, K Peiselt, T May, E Kreysa, G Siringo, W Esch
2011 *Supercond. Sci. Technol.* **24** 015011
- [7] V Savinov, V A Fedotov, P A J de Groot and N I Zheludev
2013 *Supercond. Sci. Technol.* **26** 084001
- [8] S Mahadevan, J A Chakera, P P Vaidya, D Balasubramanian, O P Kaushik, P A Naik, L M Rangarajan and P D Gupta
2005 *Meas. Sci. Technol.* **16** 2287
- [9] Ogawa, Isamu, Measurement of Radiation Power from the JIPP T-IIU Tokamak Plasma 1987