

ESTUDO PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM BLOQUEADOR DE FÓTONS E RAIOS-GAMA PARA UM ACELERADOR SINCROTRON

G. G. Sousa¹; A. Augusto²; G. O. Ferigoli²; L. Ghizoni^{2,3}; S. L. A. Carrara^{1,2}; H. P. Cardoso²

1 – Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos – “Prof. Jessen Vidal”
Avenida Cesare Mansueto Giulio Lattes, 1350 – CEP: 12247-014 – São José dos Campos - SP
– Brasil

Telefone: (12) 99791-8548 – Email do autor: genivaldo.guska@gmail.com

2 – Equatorial Sistemas S.A. – Parque Tecnológico UNIVAP – Av. Shishima Hifumi, 2911 –
Sala 109, Urbanova – 12244-000 São José dos Campos – SP – Brasil.

3 – Afiliação atual: GomSpace A/S, Alfred Nobels Vej 21A, 1. – 9220 Aalborg East Denmark

RESUMO: Este artigo apresenta algumas considerações da análise de radiação, análise térmica e o desenvolvimento da estrutura mecânica que deve atuar o bloqueador para abrir e fechar, liberando ou bloqueando a passagem do feixe de luz síncrotron vinda do acelerador de partículas. O principal objetivo é absorver e dissipar a energia do feixe sem usar fluido de refrigeração.

PALAVRAS-CHAVE: bloqueador, fóton, radiação, raios-x, raios-gama.

ABSTRACT: This article presents some considerations on the radiation and thermal analyses, and the design of the mechanical structure which must actuate the shutter to open and close, releasing or blocking the passage of synchrotron light coming from the particle accelerator. The main goal is to absorb and dissipate the beam energy without using a cooling fluid.

KEYWORDS: Shutter, photon, radiation, x-ray, gamma-ray.

1 INTRODUÇÃO

O LNLS (Laboratório Nacional de Luz Síncrotron) propôs um desafio para o desenvolvimento de um conjunto bloqueador de fótons e raios-gama (*Photon Shutter & Gamma Shutter*) para o programa Sirius, designado SPS – Sirius Photon Shutter [1].

O bloqueador de fótons é um dispositivo de segurança, pois bloqueia o feixe de radiação emitido pelo acelerador de partículas, em uma linha de luz síncrotron. A função do bloqueador é dissipar toda potência por meio da transformação da energia do feixe em energia térmica, impedindo a propagação da radiação na linha após o fechamento da passagem da câmara do bloqueador [1].

O foco deste trabalho é o desenvolvimento do projeto do bloqueador, atendendo aos requisitos térmicos e de radiação, movimentando rapidamente uma grande massa de metal para abrir ou fechar a linha do feixe de luz síncrotron em ambiente de ultra-alto vácuo no interior da câmara.

O objetivo principal é desenvolver um sistema compacto e eficiente para dissipar toda a energia do feixe no bloqueador, com um bloco de densidade e geometria adequadas para suportar as cargas térmicas e ser capaz de frear toda energia do feixe incidente no conjunto, dissipando-a sem necessidade de fluido de refrigeração.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O bloqueio ocorre ao ser colocado um conjunto de blocos de metal em frente ao feixe; sendo o primeiro bloco de cobre (Cu), capaz de dissipar a grande carga térmica e o segundo bloco absorve a radiação produzida quando cargas elétricas sofrem desaceleração, denominada *bremsstrahlung* [3], para este, foi estudado o uso materiais como o chumbo (Pb) puro, tungstênio (W) puro e em liga de 90%.

Com base nos requisitos recebidos na documentação do Programa Sirius e as propriedades dos materiais, as seguintes ferramentas computacionais (CAD/CAE) foram utilizadas para o desenvolvimento do projeto:

1. GEANT4 para a análise de radiação e dimensionamento mínimo do bloco de cobre e de tungstênio, consultando a literatura de S. Agostinelli et al. [2].
2. SATER 100, Software de Análise Térmica desenvolvido pela Equatorial Sistemas S/A, para a análise térmica e dimensionamento de um sistema de remoção de calor durante a operação.
3. INVENTOR 2010 da Autodesk para dimensionamento da envoltória mecânica para suporte das peças e requisitos de vácuo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estudo da Radiação

A análise de radiação para projeto do Bloqueador de Fótons Sirius inclui um estudo detalhado da interação das radiações-X e *bremsstrahlung* com potenciais materiais e dimensões para o bloqueador, considerando a interação da radiação com a matéria, onde ocorre a perda de energia pela partícula (*stopping power*) e a deflexão da partícula em relação à direção incidente, entre outros aspectos que não serão abordados neste artigo.

O Tungstênio puro possui um *stopping power* levemente superior aos demais, sendo necessário um comprimento de aproximadamente 18 cm de material para frear toda energia. Para atender aos requisitos de segurança do Laboratório foi adotado um bloco (lingote)

com dimensões 10 cm x 10 cm e comprimento de 36 cm.

A Figura 1 apresenta uma comparação dos perfis de perda de energia entre diferentes materiais em profundidade, obtidos na simulação para *bremsstrahlung* com 3 GeV em raio-γ.

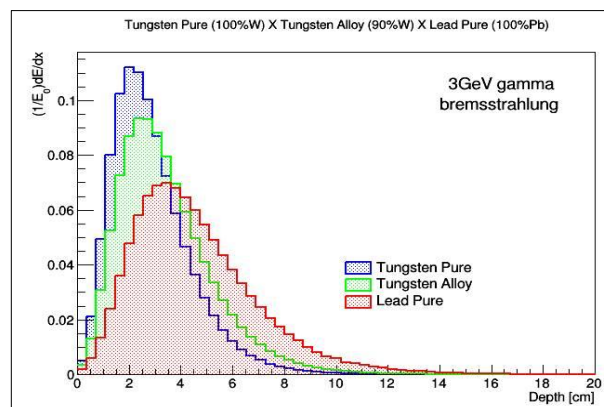


Figura 1. Comparação dos perfis de perda de energia entre materiais.

A Figura 2 apresenta a simulação de *stopping power* do Cobre, para determinar o comprimento do bloco em função da profundidade de penetração do feixe de raio-x com 100 keV.

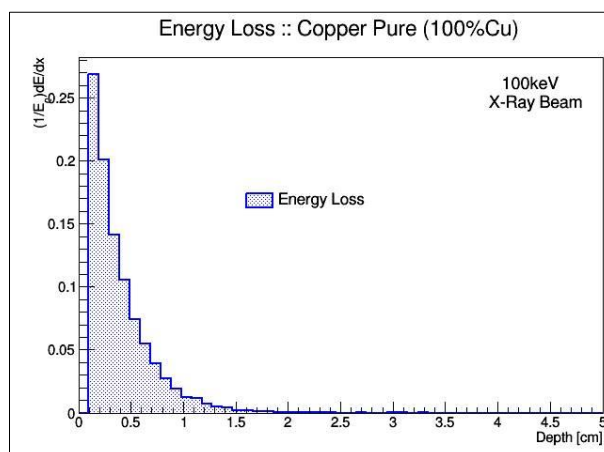


Figura 2. Perfil da perda de energia do feixe síncrotron em Cobre puro.

Os resultados indicam que um bloco de cobre puro de 10 cm x 10 cm com 5 cm de comprimento é suficiente para o bloqueio da radiação síncrotron proveniente do anel principal.

Para frear toda energia do feixe incidente é necessária a junção dos dois blocos de materiais distintos, sendo o cobre (Cu) para barrar a energia em raios-x e o tungstênio para frear os raios- γ .

3.2 Estudo Térmico

Foram investigadas várias configurações construtivas do bloqueador de fótons com o objetivo de evitar o uso de refrigeração com circulação de água. Para tanto, buscaram-se soluções que maximizassem a troca de calor por radiação entre o bloqueador e as paredes da câmara de vácuo, partindo da configuração mais simples (apenas o lingote) até configurações com uso de superfícies estendidas (radiadores).

3.2.1 Configuração - Lingote 46 cm:

Inicialmente calculou-se a temperatura que o lingote de 46 cm (10 cm de Cu e 36 cm de W), atingiria com as características dos materiais nas condições de operação especificadas nos requisitos do Laboratório. As características dos materiais descritas na Tabela 1 foram usadas nas simulações, onde c_p é o calor específico do material, d sua densidade, ε a emissividade e k a condutividade térmica do material.

Tabela 1. Características dos materiais.

Parâmetro	Cobre	Tungstênio
c_p (J/kg.K)	385	130
d (kg/m ³)	8941	19300
ε	0,5	0,5
k (W/m.K)	391	173

A Figura 3 mostra o resultado da simulação, com a distribuição das temperaturas ao longo do bloco de cobre, onde incide o feixe, e do bloco de tungstênio. Considerou-se um feixe com 200 W aplicado na área de 100 cm², temperatura externa da CV igual a 48°C e área externa da CV igual a 8756 cm².

A temperatura máxima obtida na região de incidência do feixe será de 263°C que, apesar de relativamente elevada, foi considerada aceitável para o projeto.

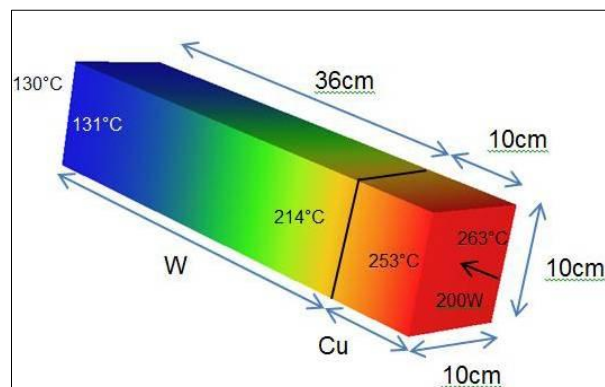


Figura 3. Temperaturas do bloqueador na configuração – Lingote 46 cm.

3.2.2 Configuração - Lingote 23 cm:

Estudos mais detalhados mostraram que o comprimento do lingote de tungstênio poderia ser reduzido de 36 cm para 18 cm. Esta configuração, Figura 4, manteve todas as características dos materiais e parâmetros da configuração anterior, alterando apenas o comprimento dos blocos de Cobre (Cu) e Tungstênio (W).

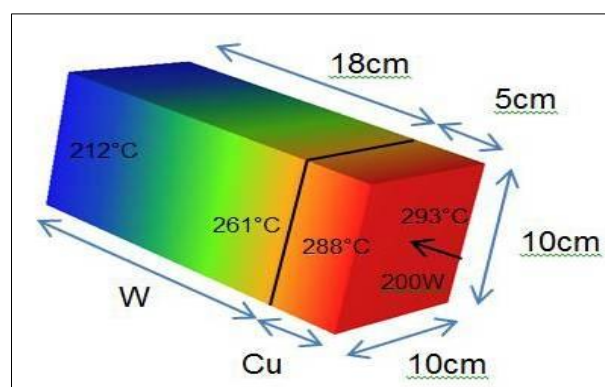


Figura 4. Temperaturas do bloqueador na configuração – Lingote 23 cm.

A nova temperatura máxima obtida na região de incidência do feixe atingiu o valor de 293°C que foi considerada preocupante, pois uma temperatura muito elevada exige isolamento térmico mais robusto entre o bloco e o

sistema de atuação, aumentando a complexidade do projeto; Em função disso decidiu-se investigar a possibilidade de reduzir esta temperatura utilizando-se de um radiador.

3.2.3 Radiador com 40 Aletas: A primeira configuração investigada considera um radiador com 40 aletas com espessura de 0,2 cm, radiais, retangulares de 18 cm x 5 cm, em torno do bloco em forma de um copo de 10 cm de diâmetro e espessura de 4 mm, conforme Figura 5. Em todas as superfícies do copo ε é igual a 0,9, exceto na face interna (B) em contato com bloco de tungstênio.

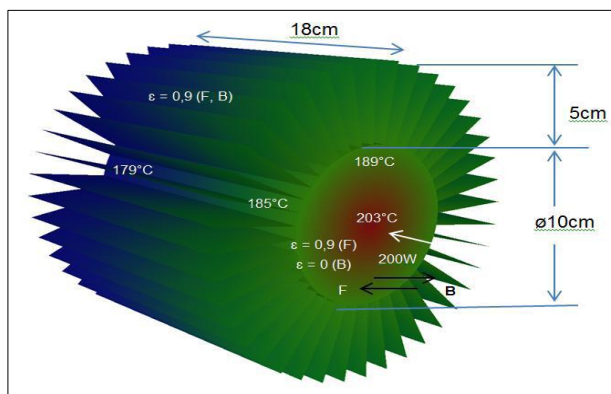


Figura 5. Temperaturas do radiador de 40 aletas.

Embora a temperatura tenha sido reduzida para 203°C na região imediatamente em contato com o centro do bloqueador, considerou-se a configuração muito complexa para fabricação. Observou-se também que a pequena distância entre as aletas gera um acoplamento radiativo com a câmara muito pequeno devido ao bloqueio mútuo entre aletas.

3.2.4 Radiador com 20 Aletas: A fim de mitigar o problema detectado com a configuração anterior, foi reduzido o número de 40 para 20 aletas radiais sem alteração das suas dimensões. Com esta nova configuração, mostrada na Figura 6, a temperatura máxima obtida na região imediatamente em contato com o centro do bloqueador foi reduzida para 184°C, 19°C abaixo da configuração com 40 aletas. Decidiu-se então investigar a

possibilidade de substituir o radiador aletado por uma superfície cilíndrica com a mesma área efetiva.

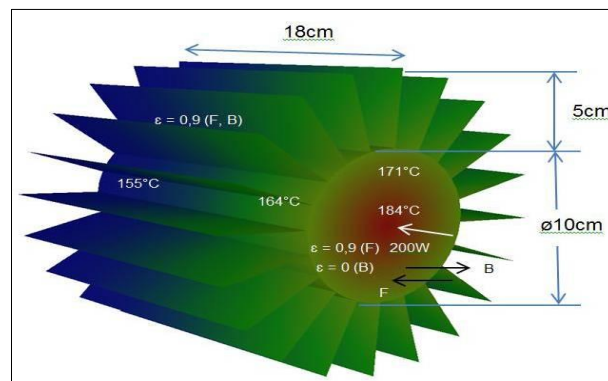


Figura 6. Temperaturas do radiador de 20 aletas.

3.2.5 Radiador Circular: O radiador aletado foi substituído por um cilindro de 20 cm de diâmetro externo (sem aletas), mantendo-se o diâmetro do bloqueador em 10 cm. Variando diâmetro do radiador, foram feitas diversas simulações, obtendo-se uma menor temperatura máxima igual a 170°C para o diâmetro de 20 cm, como mostra a Figura 7.

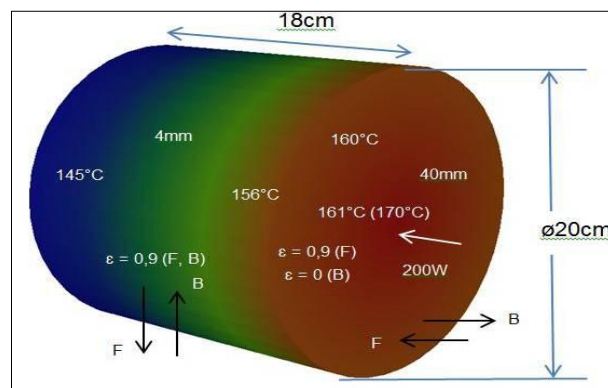


Figura 7. Temperaturas do bloqueador com radiador cilíndrico sem aletas.

3.2.6 Radiador Oblongo: Em função das alterações introduzidas pelo projeto mecânico na configuração do radiador e nas dimensões da câmara de vácuo, elaborou-se o modelo final com a geometria em formato de um copo oblongo, apresentado na Figura 8,

com 20 cm de largura, 12 cm de altura, 26 cm de comprimento e 0,5 cm de espessura.

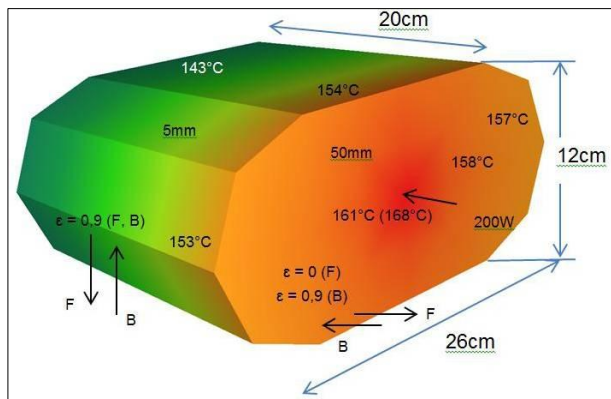


Figura 8. Temperaturas do bloqueador com radiador oblongo.

Apesar de ter sido considerado um feixe muito mais concentrado (3 mm x 3 mm), a temperatura máxima obtida foi de 168°C, ligeiramente inferior à temperatura obtida na configuração anterior.

Com geometria oblonga, a temperatura média estimada nas paredes da câmara de vácuo é 58°C.

O valor de temperatura de 168°C foi obtido assumindo-se que a emissividade da parede interna da CV é maior que 0,9. Caso esse valor não seja obtido, a temperatura do radiador aumentará. Para o valor de emissividade igual a 0,1 tanto para o radiador quanto a parede interna da CV, a temperatura do bloqueador atinge valores acima de 450°C.

3.3 Desenvolvimento da Estrutura

O projeto mecânico foi desenvolvido simultaneamente com os estudos de radiação e térmicos. O conceito mecânico foi iniciado considerando os requisitos do LNLS e foi sendo realimentado pelos resultados das análises de radiação e térmica.

A primeira configuração da câmara de vácuo, mostrada na Figura 9, considerou um bloco cilíndrico de cobre (Cu) de 13,7 kg com dimensões Ø14 cm x 10 cm e um bloco de Tungstênio (W) de 107 kg com dimensões Ø14 cm x 36 cm, onde a área do quadrado de

10 cm x 10 cm é circunscrita na circunferência com diâmetro de 14 cm.

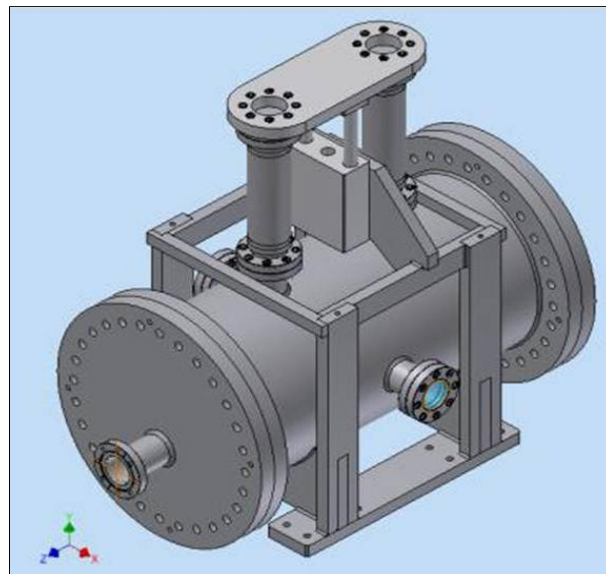


Figura 9. Câmara de Ø 14" x 70 cm.

A massa do conjunto somente com os blocos de Cu-W é de 121 kg, havendo então a necessidade de utilizar pelo menos dois pontos de apoio para elevação e posicionamento do bloqueador.

Com o avanço dos estudos de radiação e da térmica, um *design* mais enxuto foi elaborado, reduzindo a dimensão da câmara de vácuo, pois a massa do bloqueador foi reduzida.

Para reduzir a temperatura do conjunto, houve a necessidade de desenvolver um radiador integral ao bloco de Cobre (Cu) com aproximadamente 1885 cm² de área total das superfícies externas, Figura 10.

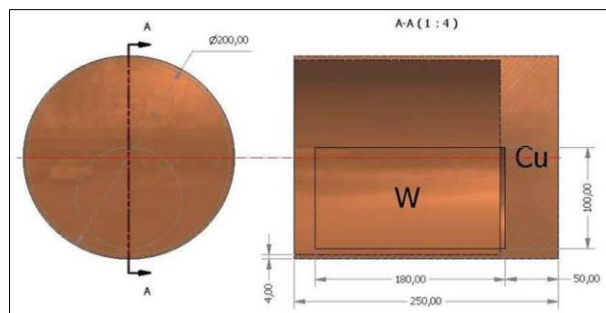


Figura 10. Radiador com perfil circular.

A análise térmica deste radiador, item 3.2.5, apresenta uma redução na temperatura máxima em relação aos anteriores. Para acomodar o radiador sem aumentar o volume da CV, o radiador foi alterado para o perfil oblongo, Figura 11, com área superficial total de aproximadamente 1924 cm^2 , pouco maior que a do perfil circular.

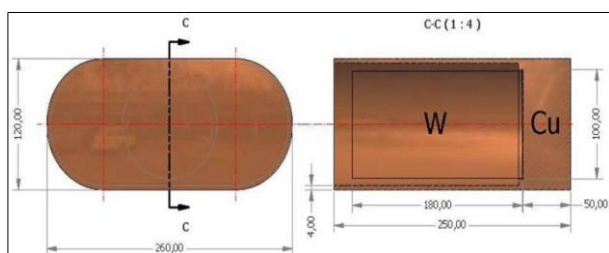


Figura 11, Radiador com perfil oblongo.

As análises de radiação e térmica permitiram a redução do comprimento e diâmetro do bloqueador, e com isso, a câmara de vácuo pode ser reduzida de 70 cm para 50 cm no seu comprimento. A redução de peso foi significativa devido à densidade elevada do tungstênio, possibilitando a utilização de apenas um ponto de apoio para o atuador pneumático, conforme ilustrado na Figura 12.



Figura 12. Câmara de Ø 12"X 40 cm, com apenas um atuador pneumático.

4 CONCLUSÃO

O desenvolvimento desse projeto teve por base o estudo da dissipação térmica somente por radiação, sem considerar a convecção e condução do calor, pois o bloqueador trabalha em ambiente de ultra-alto vácuo. A intenção inicial era dissipar toda a energia por radiação térmica mantendo o bloqueador em uma temperatura aceitável durante operação, sem a necessidade de adicionar um circuito com fluido refrigerante no interior da CV.

Os resultados mostraram que com o uso de revestimentos de alta emissividade ($\epsilon > 0,9$) no interior da CV, a temperatura do bloqueador será mantida abaixo dos 170°C , valor considerado aceitável durante operação. No entanto, revestimentos com alta emissividade normalmente são incompatíveis com ultra-alto vácuo. Superfícies polidas, normalmente utilizadas nessas câmaras, apresentam emissividade muito abaixo de 0,1, elevando esta temperatura acima dos 450°C .

O desafio que ora se apresenta é identificar processos de acabamentos superficiais de alta emissividade no espectro infravermelho, economicamente viáveis e compatíveis com ambiente de ultra-alto vácuo.

O desenvolvimento deste projeto contou com apoio FAPESP / FINEP [1], processo número: 2014/50786-3.

5 REFERÊNCIAS

- [1] FAPESP e MCTI/FINEP/FNDCT, Seleção Pública, Propostas para Inovação, PAPPE-PIPE III 2014, Desafios: 13 – Gamma Shutter e 14 – Photon Shutter
http://www.fapesp.br/chamadas/2014/-Chamada_PAPPE_LNLS_Sirius_anexo1.pdf
- [2] S. Agostinelli et al., "Geant4 - A Simulation Toolkit", Nuclear Instruments and Methods A 506 (2003) 250-303
[http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- [3] NIST stopping power and range tables for electrons, protons and helium ions.



**III Congress of Industrial
Management and Aeronautical
Technology**

Fatec
São José dos
Campos
Prof. Jacson Vidal

CPS
Centro
Paula Souza

**GOVERNO DO ESTADO
SÃO PAULO**

[http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/
contents.html](http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/contents.html)