

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEMEC - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL DE GOIS SARETTI

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA DEFINIÇÃO DE
LIMITES DE POSIÇÃO E ÂNGULO PARA O SISTEMA DE
INTERLOCK DE ÓRBITA DO SIRIUS**

SÃO CARLOS
2023

GABRIEL DE GOIS SARETTI

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA DEFINIÇÃO DE
LIMITES DE POSIÇÃO E ÂNGULO PARA O SISTEMA DE
INTERLOCK DE ÓRBITA DO SIRIUS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao DEMec -
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta

SÃO CARLOS
2023



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905
Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 11/2023/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

GABRIEL DE GOIS SARETTI

DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA DEFINIÇÃO DE LIMITES DE POSIÇÃO E ÂNGULO PARA O SISTEMA DE INTERLOCK DE ÓRBITA DO SIRIUS

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 31 de março de 2023

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Alexandre Tácito Malavolta
Membro da Banca 1	Mariano Eduardo Moreno
Membro da Banca 2	Armando Ítalo Sette Antonialli



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Tácito Malavolta, Docente**, em 31/03/2023, às 17:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Armando Ítalo Sette Antonialli, Docente**, em 31/03/2023, às 17:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mariano Eduardo Moreno, Docente**, em 31/03/2023, às 17:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador 0985284 e o código CRC D769CE13.

Gois Saretti, Gabriel de

Desenvolvimento de um método para definição de limites de posição e ângulo para o sistema de interlock de órbita do Sirius / Gabriel de Gois Saretti -- 2023.
88f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Alexandre Tácito Malavolta

Banca Examinadora: Mariano Eduardo Moreno,
Armando Ítalo Sette Antonialli

Bibliografia

1. Sistema de interlock de órbita. 2. Ray-tracing de luz síncrotron. 3. Simulações de elementos finitos. I. Gois Saretti, Gabriel de. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325

Aos amigos de São Paulo, pela amizade incondicional mesmo à distância, e todo apoio e suporte ao longo da graduação.

Aos amigos e colegas do projeto Dinamo UFS-Car, por todo conhecimento e companheirismo, sem vocês a graduação não seria tão leve.

Aos amigos da Mecânica, agora amigos para vida, pelas incontáveis horas de estudo, noites em claro fazendo trabalhos, tornando momentos difíceis mais fáceis.

Ao meu pai, minha mãe e meus irmãos, por me proporcionarem sempre o melhor, pelo apoio e amor incondicional em todos os momentos, e por sempre acreditarem no meu potencial, quando eu mesmo duvidei deste.

À todos que caminharam ao meu lado nesta jornada, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos professores e técnicos do departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar, por todo o aprendizado ao longo da minha graduação. Em especial aos queridos professores Bruce e Armando por todo amor à profissão que possuem, por toda a paciência e orientação em meus projetos de Iniciação Científica, e por me encorajarem a me aventurar no caminho da pesquisa e da ciência, sem vocês minha formação acadêmica, e conseqüentemente este trabalho não seriam os mesmos.

Aos colegas de trabalho do CNPEM, principalmente do Grupo de Vácuo, por sempre se disponibilizarem a ensinar algo novo e sanar minhas dúvidas todos os dias. Ao líder do Grupo de Vácuo, Thiago Rocha que me propôs esse projeto desafiador, e me orientou ao longo deste. À minha amiga e colega de trabalho diária, Beatriz Toledo pelo companheirismo, por ser um exemplo como profissional, e por todos os ensinamentos sobre vácuo e engenharia. Por fim meu amigo de infância, colega de trabalho e de apartamento Tanus Szabo, que mesmo sendo de outra área, sempre se dispôs a me ensinar com entusiasmo e paciência sobre aceleradores de partículas e radiação. Sem todos vocês esse trabalho não seria possível, meu sincero muito obrigado.

To my fellow colleagues from CERN, also developers of the software SYNRAD, Marton and Roberto, my sincere thanks for supporting the development of a key part of this work. Without your assistance, this work would not be the same.

*"We live on this speck called Earth - think
about what you might do, today or tomorrow
- and make the most of it."
(Neil deGrasse Tyson)*

RESUMO

Interlock de Órbita é um sistema de segurança que tem a finalidade de garantir que o feixe de luz gerado por dispositivos de inserção de fontes de luz síncrotron não danifiquem as câmaras de vácuo e demais componentes sensíveis presentes em anéis de armazenamento de aceleradores de partículas. Apesar de alguns laboratórios já possuírem sistemas como este, pouca informação se tem disponível sobre os métodos de desenvolvimento, tratando-se de fontes de luz síncrotron de 3^o, e em especial de 4^o geração como o Sirius, que possuem câmaras estreitas e dispositivos de inserção de alta potência. O presente projeto teve como objetivo desenvolver um método prático e confiável para definir os limites seguros de posição e ângulo para dispositivos de inserção de alta luminosidade que estão em desenvolvimento, como o EPU Delta 52 e IVU18, assim como os demais já instalados. O método empregado combina duas abordagens já utilizadas em outras fontes de luz ao redor do mundo, utilizando rotina desenvolvida em Matlab para definir o Active Interlock Envelope (AIE) por meio de relações geométrica, Método de Back Ray-tracing, e uma rotina desenvolvida em Powershell para realizar simulações automatizadas de ray-tracing via método Monte Carlo no software SynRadCLI para avaliar os limites estabelecidos, validando demais componentes mais robustos por meio de análise de elementos finitos em simulações termo-estruturais. Ao final do trabalho, o método é utilizado para definição dos envelopes de interlock dos dispositivos EPU Delta 52 curto e para o IVU18. Da aplicação do método tem-se como resultado a definição rápida dos limites seguros de ambos os dispositivos, em que a eficiência do método e os envelopes seguros são discutidos, assim como são apontadas possíveis melhorias para a mesma.

Palavras-chave: Síncrotron. Back Ray-tracing. Método Monte Carlo. Análise de Elementos Finitos.

ABSTRACT

Orbit Interlock is a security system whose purpose is to guarantee that the light beam generated by insertion devices of synchrotron light sources does not damage the vacuum chambers and other components present in the particle accelerator storage rings. Although some synchrotrons already have systems like this, there are few works available about the development methods, in the case of 3rd generation synchrotron light sources, and especially 4th generation synchrotron light sources such as Sirius, which has narrow vacuum chambers and high power insertion devices. The present project aimed to develop a practical and reliable method to define safe limits of position and angle for high luminosity insertion devices that are under development, such as the EPU Delta 52 and IVU18, as well as others already installed. The employed method combines two approaches already used in other light sources around the world, using a routine developed in MATLAB to define the Active Interlock Envelope (AIE) through geometric relations, the Back Ray-tracing method, and a routine developed in POWERSHELL to run automated ray-tracing Monte Carlo Method simulations in SYNRADCLI software to check the obtained limits, and thermo-structural finite elements analysis simulations to guarantee the integrity of not considered robust chambers. At the end of the work, the method is applied for the short EPU Delta 52 and the IVU18 insertion devices. The application of the method results in the quick definition of the safe limits of both devices, in which the efficiency of the method and the safe envelopes are discussed, as well as possible improvements for it are pointed out.

Keywords: Synchrotron. Back Ray-tracing. Monte Carlo Method. Finite Elements Analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista aérea do Sirius e do campus do CNPEM.	19
Figura 2 – Emitância por circunferência de Síncrotrons de 3 ^o e 4 ^o geração.	23
Figura 3 – LINAC no Sirius.	24
Figura 4 – Tunel do Sirius.	25
Figura 5 – Linha de luz que sai do acelerador e estação de pesquisa Carnaúba.	25
Figura 6 – Esquemático do Sirius	26
Figura 7 – Superperíodo de alto beta da rede magnética do Sirius	27
Figura 8 – Vista em corte das câmaras do TR ao FE.	27
Figura 9 – Desenho CAD da câmara VCB1	28
Figura 10 – Desenho CAD da câmara VPSC1	29
Figura 11 – Exemplo de BRT para uma abertura assimétrica.	31
Figura 12 – Mapa de fases de uma abertura, considerando feixe pontual.	32
Figura 13 – Fluxograma do método desenvolvido com subetapas.	34
Figura 14 – Exemplo de BRT com divergência do feixe.	36
Figura 15 – Mapa de fases com NTE reduzido devido divergência do feixe.	37
Figura 16 – Rotina de BRT desenvolvida.	38
Figura 17 – Interface do SPECTRA com IVU18 parametrizado.	39
Figura 18 – Interface do Powershell com rotina do Apêndice C.	42
Figura 19 – Janela de comando do Powershell, com <i>setup</i> dos parâmetros de desvio.	44
Figura 20 – Exemplo de três diferentes desvios simulados no SYNRAD+	45
Figura 21 – Modelo CAD do setor 6 no INVENTOR	46
Figura 22 – Geometria interna do TR ao final do FE do setor 6	47
Figura 23 – Campo magnético resultante do IVU18 gerado no SPECTRA.	48
Figura 24 – Simulação do IVU18 em andamento no SYNRAD+.	49
Figura 25 – Comparação da geometria original e modificada da VPSC1.	51
Figura 26 – Configuração do módulo <i>External Data</i>	52
Figura 27 – Malha de densidade de potências da VCB1	52
Figura 28 – Abordagem de criação de planos para inserir carregamentos no ANSYS.	53
Figura 29 – Malhas aplicadas para VPSC1 no SYNRAD e ANSYS.	55
Figura 30 – Configurações de simulação térmica da VCB1 e VPSC1.	56
Figura 31 – Condições de contorno aplicadas na simulação estrutural da VCB1.	56
Figura 32 – Distribuição de densidade de potência angular do IVU18.	58
Figura 33 – NTE horizontal e vertical iniciais do IVU18.	58
Figura 34 – Simulações da VCB1 com $x' = 0,5$ mrad.	61
Figura 35 – Simulações da VPSC1 com $x' = -0,5$ mrad e $y' = 0,2$ mrad.	62
Figura 36 – Simulações da VPSC1 com $x' = -0,4$ mrad e $y' = 0,2$ mrad.	63

Figura 37 – AIE horizontal e vertical definitivos do IVU18.	64
Figura 38 – Distribuição de densidade de potência para diferentes polarizações do EPU.	65
Figura 39 – Distribuição de densidade de potência angular para polarização circular.	66
Figura 40 – NTE horizontal e vertical iniciais da polarização circular.	66
Figura 41 – Perfil gerado pelo SPECTRA e superfícies criadas no SPACECLAIM	68
Figura 42 – Simulações da VCB1 para $x'=0,5\text{mrad}$ e $y'=0,8\text{mrad}$	69
Figura 43 – Simulações da VPSC1 para $x'=-0,5\text{mrad}$	70
Figura 44 – Simulações da VCB1 para $x'=0,5\text{mrad}$ e $y'=0,5\text{mrad}$	71
Figura 45 – Simulações da VCB1 para $x'=0,4\text{mrad}$ e $y'=0,4\text{mrad}$	72
Figura 46 – AIE horizontal e vertical definitivos do Delta 52 curto.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros construtivos do UVX e do Sirius	23
Tabela 2 – Aberturas limitantes consideradas para o BRT	40
Tabela 3 – Propriedades Físicas e mecânicas da Liga Cobre elox Prata 0,09% . . .	54
Tabela 4 – Parâmetros do IVU18.	57
Tabela 5 – Potência absorvida para desvios limite de ângulo.	59
Tabela 6 – Potência absorvida para desvios limite de ângulo do novo AIE.	60
Tabela 7 – Parâmetros do EPU Delta52 Curto.	65
Tabela 8 – Potência absorvida para desvios limite de ângulo da polarização circular. .	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIE	Active Interlock Envelope
AVM	Área de Vácuo e Materiais
BA	Bend-Achromatic
BC	Dipolo Central
BPM	Beam Position Monitor
BRT	Back Ray-tracing
CAD	Computer Aided Design
CC	Condição de Contorno
CERN	European Organization for Nuclear Research
CNPEM	Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais
ENT	Divisão de Engenharia e Tecnologia
EPU	Elliptical Polarized Undulator
FE	Front End
ID	Insertion Device
IVU	In Vacuum Undulator
Linac	Linear Accelerator
LNLS	Laboratório Nacional de Luz Síncrotron
MEF	Método de Elementos Finitos
MMC	Método Monte Carlo
NEG	Non-Evaporable Getter
NTE	No Touch Envelope
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
RF	Radio-frequência
TR	Trecho Reto

UVX	Ultravioleta ao Raio-X
UHV	Ultra High Vacuum
VAC	Grupo de Vácuo
VCB1	Câmara de Vácuo do Dipolo B1.
VPSC1	Câmara de Vácuo da Estação de bombeamento.

LISTA DE SÍMBOLOS

x	Posição do feixe de elétrons na horizontal com relação ao centro da câmara
y	Posição do feixe de elétrons na vertical com relação ao centro da câmara
A_x	Distância horizontal do centro até a parede da câmara de vácuo no ponto de observação
A_y	Distância vertical do centro até a parede da câmara de vácuo no ponto de observação
S	Distância entre centros do ponto de observação até a abertura limitante
a_i	Menor distância entre a parede interna e a linha de centro do trecho reto.
a_o	Menor distância entre a parede externa e a linha de centro do trecho reto.
a_t	Menor distância entre a parede superior e a linha de centro do trecho reto.
a_b	Menor distância entre a parede inferior e a linha de centro do trecho reto.
α_i	Ângulo limite que o feixe de elétrons pode ter ao passar pelo ponto de observação para que o feixe de luz gerado não toque a parede interna da abertura analisada
α_o	Ângulo limite que o feixe de elétrons pode ter ao passar pelo ponto de observação para que o feixe de luz gerado não toque a parede externa da abertura analisada
α_t	Ângulo limite que o feixe de elétrons pode ter ao passar pelo ponto de observação para que o feixe de luz gerado não toque a parede superior da abertura analisada
α_b	Ângulo limite que o feixe de elétrons pode ter ao passar pelo ponto de observação para que o feixe de luz gerado não toque a parede inferior da abertura analisada
α_{div}	Ângulo referente à metade do leque total de divergência do feixe de luz em uma direção específica.

T_M	Temperatura máxima na câmara
T_w	Temperatura máxima nos canais de refrigeração
σ_{max}^{VM}	Tensão de von Mises máxima
S_y	Tensão limite de escoamento
S_U	Tensão limite de resistência à tração

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS	20
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 SÍNCROTRONS E A LUZ SÍNCROTRON	22
2.2 O SIRIUS	22
2.3 FUNCIONAMENTO DO SIRIUS	24
2.4 ESTRUTURA DE UM SETOR DO SIRIUS	26
2.5 DISPOSITIVOS DE INSERÇÃO	29
2.6 BACK RAY-TRACING	30
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 DEFINIÇÃO DO AIE VIA MATLAB	35
3.1.1 HIPÓTESES CONSIDERADAS	35
3.1.2 ROTINA DE MATLAB	37
3.1.3 SETUP DOS PARÂMETROS	38
3.1.4 ANÁLISE DE BRT PARA OS ID DO SIRIUS	40
3.2 VALIDAÇÃO DA ANÁLISE DE BRT VIA SYNRADCLI	41
3.2.1 ROTINAS DE AUTOMAÇÃO DO SYNRADCLI	41
3.2.2 ROTINA PRINCIPAL - "ORBIT-INTERLOCK.PS1"	42
3.2.3 ROTINA AUXILIAR - "BEAMPOSITION_RT-SWEEP.PS1"	43
3.2.4 PREPARAÇÃO DA GEOMETRIA E REGIÃO MAGNÉTICA	45
3.2.5 VALIDAÇÃO E ANÁLISE NO SYNRAD	49
3.3 VALIDAÇÃO DOS COMPONENTES ROBUSTOS UTILIZANDO ANSYS	50
3.3.1 SIMPLIFICAÇÕES E CARREGAMENTO DA VPSC1	50
3.3.2 SIMPLIFICAÇÕES E CARREGAMENTO DA VCB1	52
3.3.3 CRITÉRIOS DE PROJETO DE RAY-TRACING PARA CÂMARAS ABSORVEDORAS	53
3.3.4 SETUP DAS SIMULAÇÕES	54
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 IVU - IN VACUUM UNDULATOR	57
4.2 EPU DELTA 52 CURTO	65
4.3 EFICIÊNCIA DO MÉTODO	74
5 – CONCLUSÃO	76

REFERÊNCIAS **77**

1 INTRODUÇÃO

O Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), localizado em Campinas-SP, é uma Organização Social supervisionada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). O CNPEM opera quatro laboratórios Nacionais e é o berço do projeto mais complexo da ciência brasileira - o Sirius, Figura 1, a mais nova fonte de luz síncrotron do Brasil (CNPEM, 2023).

Figura 1 – Vista aérea do Sirius e do campus do CNPEM.



Fonte: (LIGHTSOURCES, 2021).

Inaugurado no final de 2019, o Sirius até o momento está distante de operar em plena capacidade, além de possuir poucas estações disponíveis para pesquisa, este opera em condições inferiores às idealizadas para o comissionamento total do acelerador.

Atualmente, há instalados no Sirius, apenas dispositivos de inserção (ID, do inglês *Insertion Device*) de baixa potência, que mesmo em condições extremas não possuem capacidade de oferecer risco aos componentes da máquina, devido ao projeto de vácuo do acelerador.

No entanto, com o plano de dobrar a capacidade atual de operação do Sirius, há inúmeros IDs de alta potência, com ordem de três a oito vezes superior aos já instalados, em etapa de projeto e prototipagem pela Divisão de Engenharia e Tecnologia (ENT) do CNPEM. Preocupados com o risco que esses novos dispositivos podem oferecer às peças mais frágeis do acelerador, a implementação de um sistema de Interlock de Órbita se tornou uma demanda recente para a ENT.

A aplicação de sistemas de Interlock de Órbita em fontes de luz síncrotron, vem se tornando cada vez mais comum em aceleradores de partículas ao redor do mundo. Com os avanços tecnológicos na área em questão, aceleradores de última geração possuem câmaras de vácuo extremamente estreitas, e dispositivos de inserção com capacidade de gerar feixes de luz de alta intensidade.

Devido a essas duas condições, torna-se gradativamente mais necessário garantir que os feixes de luz emitidos nos anéis de armazenamento não danifiquem componentes e câmaras de vácuo da máquina. Com a finalidade de proteger essas peças, sem modificar o projeto das mesmas, é comumente utilizado o sistema de Interlock de órbita.

Este sistema atua, realizando o desligamento das cavidades de radio-frequência (RF), que são responsáveis por dar energia ao feixe de elétrons, quando um desvio crítico do feixe de elétrons é detectado pelos numerosos sensores que monitoram a trajetória desse, os *beam position monitors* (BPM). Contudo, dependendo da abordagem utilizada, definir os valores de desvio limite para o *setup* desse sistema de segurança, por muitas vezes pode ser um trabalho demorado e custoso.

O Grupo de Vácuo (VAC), responsável por garantir entre outras funções, o UHV (Ultra Alto Vácuo) e integridade das câmaras de vácuo, foi encarregado de definir os limites seguros do feixe de elétrons para os IDs que serão instalados futuramente no acelerador. Levando em consideração a quantidade de dispositivos que ainda deverão ser projetados, por processos iterativos dos grupos da ENT, é necessário que o método para determinação dos limites destes seja rápido e prático.

1.1 OBJETIVOS

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um método aplicável ao Sirius, que permita estabelecer os limites do envelope ativo de Interlock (AIE, do inglês *Active Interlock Envelope*), de acordo com os requisitos explicitados. Para isso um método composto de três etapas é proposto, utilizar uma rotina de MATLAB para automatizar os cálculos da técnica de *Back Ray-tracing* (BRT) e definir um AIE a partir da geometria do acelerador, validar os limites encontrados com uma rotina automatizada de SYNRADCLI, software de ray-tracing via Método Monte Carlo (MMC), e por fim verificar a temperatura e tensão dos componentes com maior incidência de feixe utilizando Método de Elementos Finitos (MEF), com o ANSYS Mechanical. Por fim o método desenvolvido é aplicado para diferentes dispositivos em diferentes etapas de projeto para validar sua aplicabilidade.

Para atingir determinado objetivo é necessário cumprir os seguintes objetivos específicos:

- Revisar o projeto de vácuo do Sirius, e avaliar os componentes sensíveis e mais sujeitos a sofrer danos por feixe de luz;
- Escrever uma rotina BRT via MATLAB, viabilizando a rápida visualização dos

limites de posição e ângulo;

- Definir uma abordagem para análise e definição dos limites horizontais e verticais;
- Desenvolver uma rotina de SYNRADCLI, para agilizar simulações das condições de desvio limite, definidos via análise de BRT;
- Estabelecer um método simples para exportar carregamentos do SYNRAD para o ANSYS, e facilitar simulações termo-estruturais para garantir a segurança das demais câmaras;
- Aplicar o método para diferentes IDs, verificando a consistência e eficácia do método proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SÍNCROTRONS E A LUZ SÍNCROTRON

Partículas carregadas, em movimento uniforme não emitem radiação. Contudo, quando partículas relativísticas (em velocidade próxima à da luz), sofrem perturbação em seu movimento uniforme, isto é, são aceleradas, o rearranjo de seus campos elétricos ocorre, e essa perturbação em seus campos viajando à velocidade da luz é o que é observado como radiação síncrotron (WIEDEMANN, 1998).

Sendo sua existência confirmada visualmente apenas no ano de 1947, durante um experimento em um laboratório da *General Electric*, a história da luz síncrotron é extremamente recente. Essa radiação começou a ser utilizada apenas na década de 60, com a primeira geração de síncrotrons (LIGHTSOURCES, 2021).

A primeira geração foi caracterizada por ser "parasitária", pois a extração e uso dessa radiação era um refugio, antes desperdiçado, dos aceleradores de colisão; tem-se nessa geração também a concepção dos primeiros anéis de armazenamentos, que viriam a se tornar a estrutura principal dos síncrotrons futuros.

Os anéis de armazenamento permitiram a construção de máquinas dedicadas para feixes de menor energia com maior tempo de vida, e a extração da luz síncrotron como função primária do acelerador, sendo essa a principal característica da segunda geração de síncrotrons. Essa geração também foi marcada por almejar o aumento do brilho da luz emitida, e pela idealização dos primeiros dispositivos de inserção (ROBINSON, 2015).

Apesar de alguns síncrotrons de segunda geração terem posteriormente adicionado IDs em seus anéis, como o próprio UVX (Acrônimo de "Ultravioleta ao Raio-X), os aceleradores só começaram a ser projetados para acomodar os IDs a partir da terceira geração. Essa geração foi marcada por anéis com trechos retos mais extensos para inserção dos IDs, e por uma busca da redução da emitância a partir de dispositivos e métodos mais eficientes para essa causa (ROBINSON, 2015).

Atualmente a maioria dos síncrotrons em operação são da terceira geração, possuindo pouquíssimos de quarta geração construídos, e alguns planejados e em construção. Ainda não há um consenso da característica marcante dessa geração, contudo a drástica redução da emitância com relação a geração anterior é um fator de destaque presente no Sirius.

2.2 O SIRIUS

O Sirius é o segundo síncrotron do Brasil, o qual foi idealizado para substituir o primeiro acelerador brasileiro de segunda geração, o UVX, que apesar de possuir alta confiabilidade e estabilidade, já não era mais capaz de atender plenamente as necessidades

dos pesquisadores, devido a sua emitância relativamente alta, e por possuir poucas linhas de luz de IDs.

Com o objetivo de atender essas necessidades da pesquisa contemporânea, o novo acelerador foi projetado com tecnologias que possibilitassem isso. Entre as mudanças no projeto, podem ser citadas: aumento no nível energético, redução da seção transversal das câmaras de vácuo, aperfeiçoamento na rede magnética, redução de vibrações na máquina, aumento da circunferência, etc. A Tabela 1 compara parâmetros do UVX com o SIRIUS.

Tabela 1 – Parâmetros construtivos do UVX e do Sirius

Parâmetro	UVX	SIRIUS
Comprimento do anel (m)	93	518
Energia de operação dos Elétrons (GeV)	1,37	3
Corrente de operação (mA)	250	350
Número de imãs (1)	460	1120
Limite de energia dos fótons (keV)	30 (raio-X mole)	250 (raio-X duro)
Linhas de luz	20	40 (2)

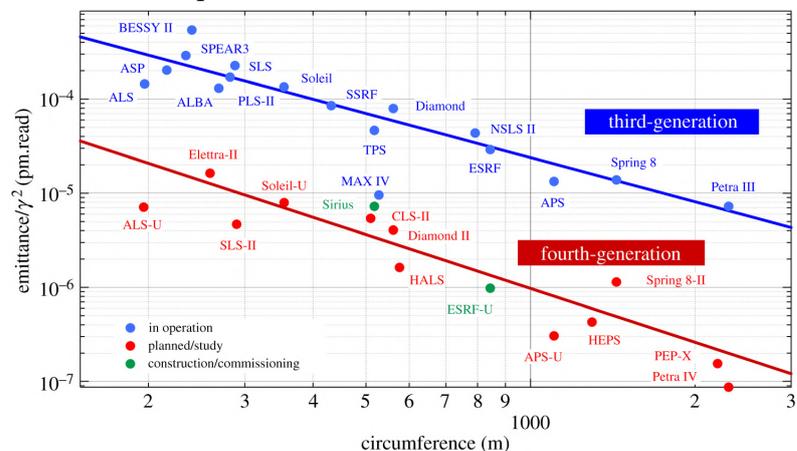
(1) Imãs do anel de armazenamento.

(2) Capacidade máxima de linhas de luz, 14 planejadas inicialmente.

Fonte: Aceleradores do UVX – LNLS. Disponível em: <<https://lnls.cnpem.br/uvx/aceleradores/>>. Acesso em: 26 jan. 2023.

A Tabela 1, apresenta apenas algumas dos principais parâmetros que foram modificados e conseqüentemente tornaram o Sirius, uma das fontes de luz mais brilhantes já construídas. A Figura 2, compara os valores de emitância de diversos aceleradores do mundo, esse parâmetro diz respeito a quão concentrado é o feixe de elétrons, em que quanto menor este for, mais concentrado será o feixe de elétrons e conseqüentemente o feixe de luz.

Figura 2 – Emitância por circunferência de Síncrotrons de 3^o e 4^o geração.



Fonte: (LIU; NEUENSCHWANDER; RODRIGUES,)

2.3 FUNCIONAMENTO DO SIRIUS

O Sirius, assim como os demais síncrotrons mais modernos, de terceira e quarta geração principalmente, são compostos por estágios e equipamentos essenciais para seu funcionamento e possibilitar a pesquisa com a luz síncrotron, são estes:

1. Canhão de elétrons;
2. LINAC;
3. Cavidades RF;
4. Booster;
5. Anel de armazenamento;
6. Linhas de luz;

O Canhão de elétrons é o ponto de partida, nele o feixe de elétrons é emitido a partir de um cátodo, sendo acelerado por campos eletrostáticos até ser injetado no LINAC (Acelerador Linear), Figura 3, o qual fornece energia ao feixe até este ser acelerado a uma velocidade próxima da luz.

Figura 3 – LINAC no Sirius.

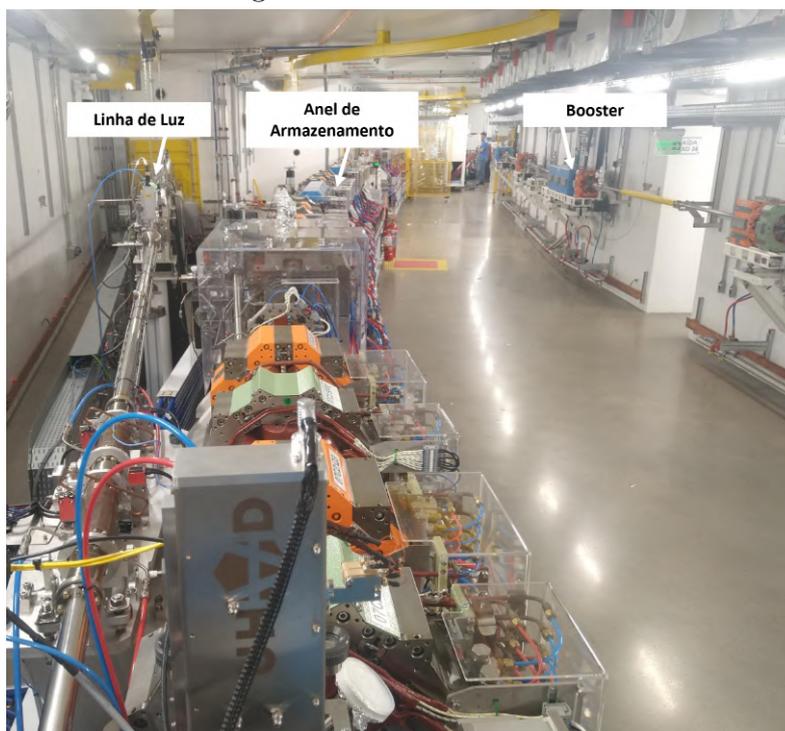


Fonte: (CNPEM, 2014)

O Booster é um acelerador circular com a função de aumentar a energia do feixe vindo do LINAC, até a energia de operação da fonte de luz. Nele, os campos magnéticos dos imãs são incrementados de forma síncrona enquanto interagem com cavidades RF, radiofrequência, que fornece energia ao feixe a cada volta. (CNPEM, 2014)

Ao atingir a energia ideal para operação, o feixe é injetado do Booster para o Anel de Armazenamento, no qual com o auxílio de imãs, quadrupolos e sextupolos, o feixe é mantido em uma órbita estável. Neste equipamento, o feixe passa por dipolos, wigglers e onduladores, que são usados para curvar a trajetória dos elétrons, produzindo a luz síncrotron em trajetória tangente à órbita do anel (CNPEM, 2014). O Booster, Anel e FE (*Front end*) de linha de luz localizados no tunel do Sirius são indicados na Figura 4.

Figura 4 – Tunel do Sirius.



Fonte: Autor.

As Linhas de Luz são locais onde a luz síncrotron emitida pelos ID's e dipolos é recebida e então direcionada para estações experimentais, nas quais as amostras materiais das pesquisas estão localizadas. Cada estação experimental e linha de luz é composta de componentes ópticos distintos para “filtrar” a luz síncrotron recebida para um nível de energia adequado para a pesquisa e amostra específica. A Figura 5 ilustra a estação de pesquisa e linha de luz Carnaúba, fora do tunel do acelerador.

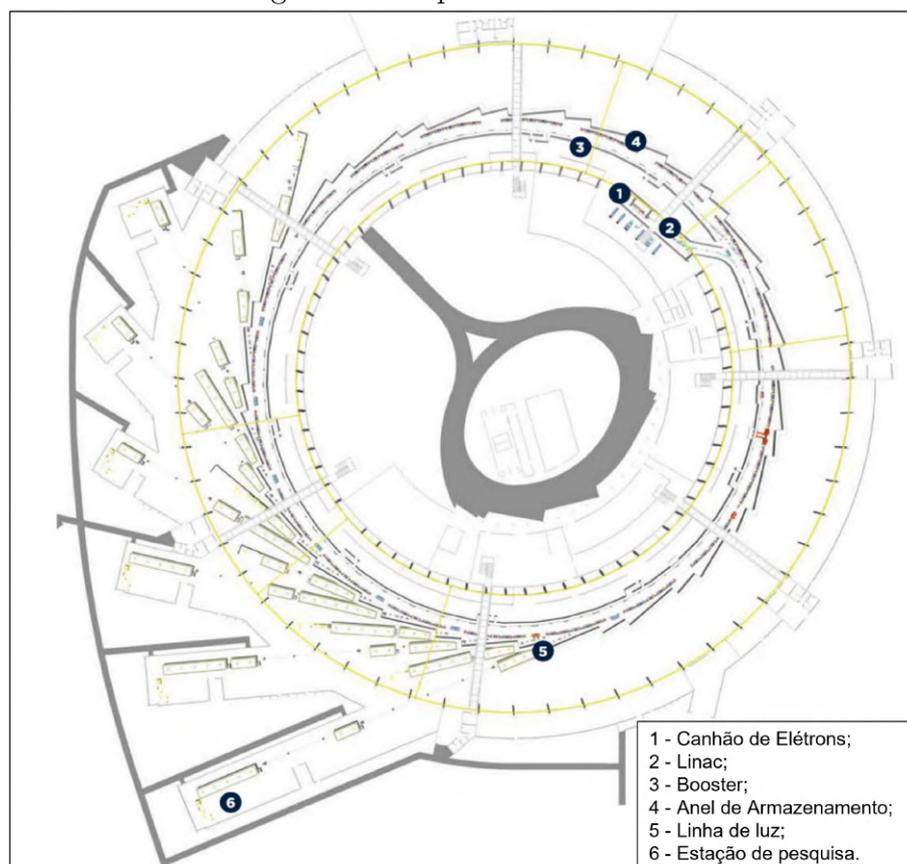
Figura 5 – Linha de luz que saí do acelerador e estação de pesquisa Carnaúba.



Fonte: Autor.

Equipamentos como as cavidades RF, quadrupolos, sextupolos, BPMs (Beam Position Monitor), e corretoras de órbita são equipamentos inerentes para o bom funcionamento da fonte de luz síncrotron. Atuando diretamente no feixe de elétrons para fornecer energia, colimar este, monitorar sua trajetória, assim como corrigir esta para mantê-lo o mais estável possível para a utilização dos usuários (LNLS, 2014). A Figura 6 representa o esquemático geral do funcionamento do Sirius.

Figura 6 – Esquemático do Sirius



Fonte: (CNPEM, 2014)

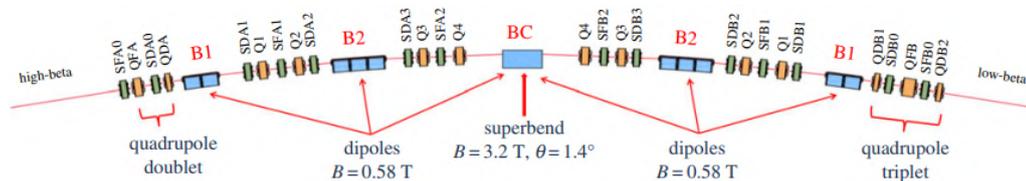
2.4 ESTRUTURA DE UM SETOR DO SIRIUS

O anel de armazenamento do Sirius é composto de 20 setores, que completam a sua circunferência de aproximadamente 518 m, cada um destes setores é composto por um trecho reto (TR) que pode variar de 6 a 7 m de comprimento, e por um superperíodo de sua rede magnética, conjunto de ímãs responsável por focalizar o feixe e realizar a trajetória circular do anel de armazenamento.

A rede magnética do Sirius tem uma estrutura do tipo 5BA (*Five Bend Achromatic*), Figura 7, em que cada setor conta com cinco dipolos magnéticos, para curvar o feixe de elétrons. Apesar da importância da rede magnética e dos dipolos magnéticos, o

presente trabalho detalhará apenas as câmaras pertinentes para análise de Interlock dos IDs, isto é, aquelas que são iluminadas por estes.

Figura 7 – Superperíodo de alto beta da rede magnética do Sirius



Fonte: (LIU; NEUENSCHWANDER; RODRIGUES,)

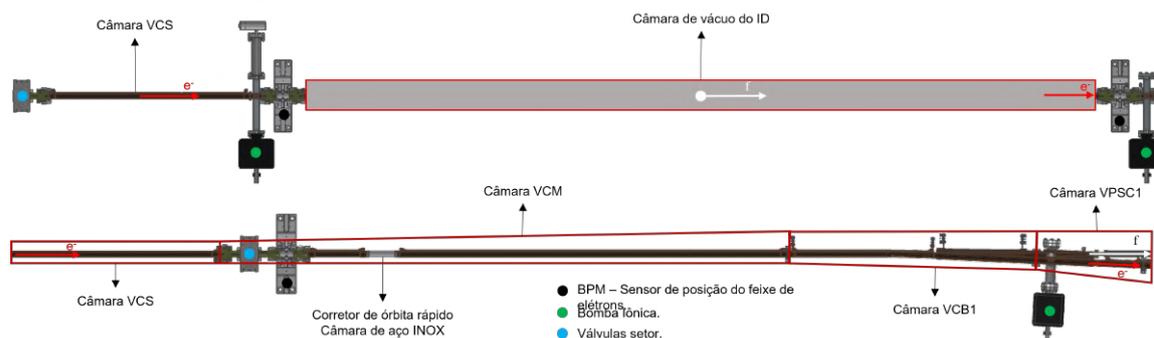
A estrutura mecânica pela qual o feixe de elétrons percorre, é composta majoritariamente por câmaras de vácuo, *bellows* e BPMs. Inicialmente o projeto das câmaras de vácuo, considerava o material destas como INOX, sendo modificadas e atualmente feitas de cobre, devido sua alta condutividade elétrica, reduzindo a impedância da máquina, e sua alta condutividade térmica que permite absorver maior taxa de luz síncrotron. (SERAPHIM et al., 2015)

O sistema de vácuo conta com um bombeamento distribuído, em que cerca de 95% das câmaras de vácuo foram internamente revestidas no CNPEM com um fino filme NEG (*Non-Evaporable Getter*), essa tecnologia foi desenvolvida no CERN (*European Organization for Nuclear Research*), e licenciada para o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS). (SERAPHIM et al., 2015)

O nível de UHV, pressão inferior a 10^{-7} mbar, é alcançado no anel de armazenamento do Sirius devido ao bombeamento via aprisionamento molecular, realizado pelo filme NEG em conjunto de bombas iônicas que utilizam o mesmo princípio. No caso do Sirius grande parte do anel é mantido à uma pressão entre 10^{-8} e 10^{-10} mbar.

Os 20 setores do anel de armazenamento são constituídos pela mesma estrutura de câmaras de vácuo, havendo pequenas diferenças nas câmaras do trecho reto, dependendo do tamanho do ID, e se o setor é de baixo beta ou alto beta. A Figura 8, ilustra a sequência das câmaras de vácuo, para um trecho de baixo beta padrão.

Figura 8 – Vista em corte das câmaras do TR ao FE.



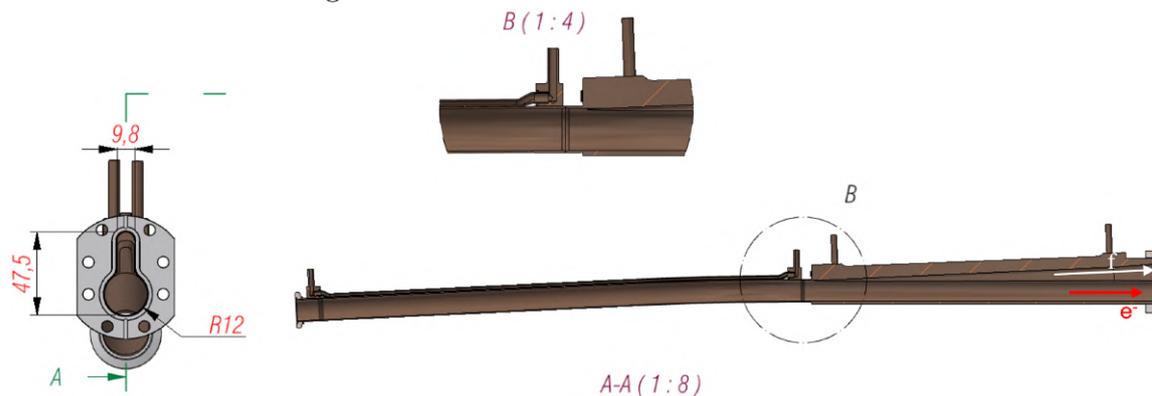
Fonte: Autor

As duas VCS e a VCM são câmaras multipolo padrão do Sirius, as quais possuem seção transversal circular de 24mm de diâmetro interno com parede de 1mm, com um canal de refrigeração estreito brasado na superfície externa das câmaras, com geometria especial para garantir o contato e condutividade térmica. (SERAPHIM et al., 2015)

A câmara da VCM, realiza a conexão do TR com o início do arco do setor, sendo composta por 3 tubos, um menor de cobre no início, seguido por um de INOX, no qual é inserida uma corretora rápida, e outra parcela maior de cobre em seguida, sendo que apenas a câmara de INOX não é refrigerada. A VCM possui tamanho fixo para o tipo do setor, baixo beta ou alto beta.

A VCB1, é a primeira câmara do arco do setor, onde é inserido o primeiro dipolo magnético. A parcela inicial de seu comprimento segue o padrão de uma câmara multipolo. O restante do seu comprimento apresenta estrutura mais robusta com refrigeração dedicada, em razão da luz incidente na câmara devido a sua curvatura e mudança de seção transversal. A Figura 9 ilustra uma câmara VCB1 em CAD.

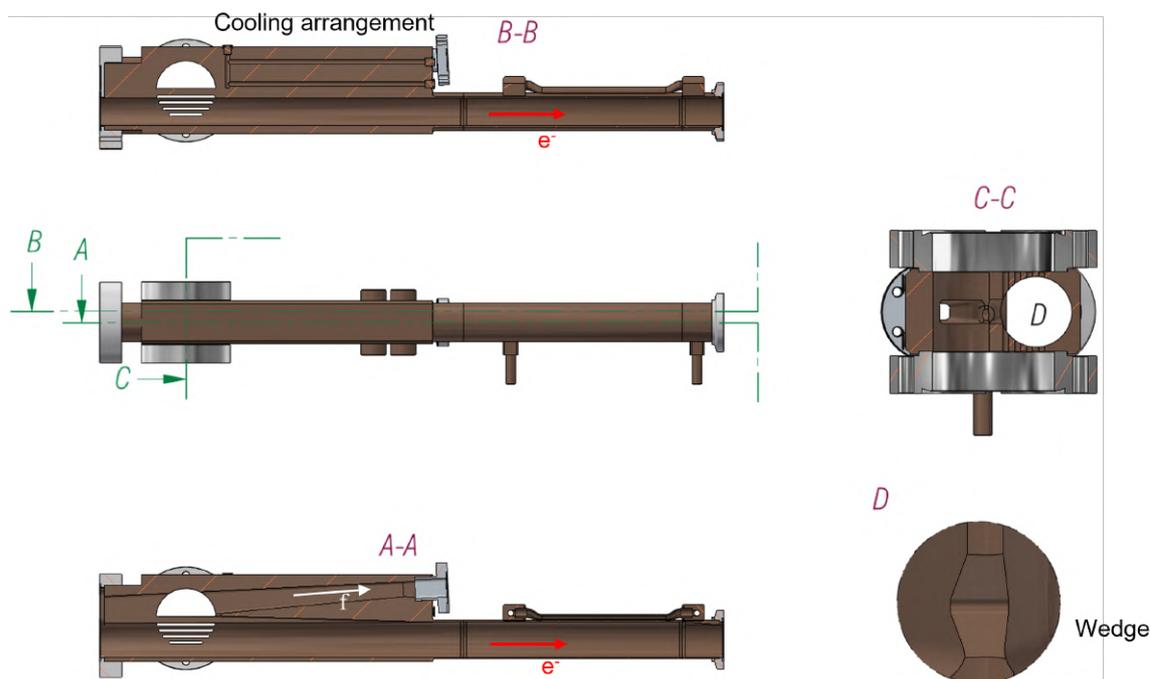
Figura 9 – Desenho CAD da câmara VCB1



Fonte: Autor

A VPSC1, é uma câmara de estação de bombeamento, a qual divide o caminho de vácuo em dois, no arco que o feixe de elétrons percorre e a região de extração da luz síncrotron. Assim como parte da VCB1, a VPSC1 é robusta e possui refrigeração dedicada, pois a bifurcação existente e aberturas restritivas absorvem grande parte da luz irradiada pelos IDs. A Figura 10 apresenta uma câmara VPSC1 em CAD.

Figura 10 – Desenho CAD da câmara VPSC1



Fonte: Autor

Neste trabalho são apresentadas sumariamente apenas as câmaras de vácuo, que estão presentes nas análises realizadas pelo método desenvolvido, pois o detalhamento do restante das câmaras de vácuo de um setor do anel fugiria do escopo da análise proposta.

2.5 DISPOSITIVOS DE INSERÇÃO

Dispositivos de inserção, possuem esse nome por serem equipamentos desenvolvidos para serem inseridos nos TR dos anéis de armazenamento, que antes não possuíam funcionalidade prática. Os IDs como dito anteriormente popularizaram-se a partir da terceira geração de síncrotrons, e as duas classes mais comuns são os wigglers e os onduladores.

Atualmente no Sirius, grande parte das linhas de luz em funcionamento, são de IDs de baixa potência ou de dipolos magnéticos. Instalados existem quatro onduladores planares idealizados para o Sirius, assim como um wiggler e um EPU (*Elliptical Polarized Undulator*) anteriormente utilizados no UVX que estão sendo aproveitados por hora no acelerador atual.

Os onduladores planares possuem câmaras de vácuo feitas de alumínio extrudado de 1,2 m de comprimento, e seção transversal estreita com abertura vertical e horizontal máximas de 6 mm e 40 mm respectivamente, possuindo canais de refrigeração integrados à câmara de vácuo. Os imãs são capazes de produzir um campo magnético vertical de 0,7 T, e um feixe de luz com potência de 1,65 kW, para uma corrente de 500 mA (40% acima da nominal) (RAMOS et al., 2021).

O presente trabalho pretende aplicar o método desenvolvido para dois onduladores de alta potência em diferentes etapas de projeto, de forma a validar o método, assim como avaliar as fraquezas e fortalezas do mesmo. Dentre os IDs, tem-se o IVU (*In Vacuum Undulator*) em fase conceitual de projeto, e o EPU Delta52 curto que já está em fase final de projeto.

O Delta52 curto, é um ondulador capaz de produzir campo magnético em ambas as direções, proporcionando uma polarização circular, que é de interesse para os usuários de linha de luz. Sua câmara também é de alumínio extrudado de 1,2 m de comprimento, e seção transversal elíptica com 13 mm e 7,6 mm, de abertura horizontal e vertical respectivamente. Seu campo magnético em uma direção única é limitado a 1,2 T, e potência total de 4,37 kW, para corrente de 500 mA (ROCHA et al., 2021).

Em seções adiantes serão apresentados os parâmetros e hipóteses consideradas para o ondulador IVU, analisado neste trabalho, sendo importante neste momento mencionar apenas a potência total deste. Foi calculado para o IVU uma potência de 9,12 kW para uma corrente de 500 mA.

2.6 BACK RAY-TRACING

Anéis de armazenamento de 3^a geração em diante são caracterizados por funcionarem com dispositivos de inserção extremamente potentes, wigglers especiais, onduladores e lasers de elétrons livres, os quais são capazes de comprometer a estrutura dos componentes em vácuo do anel de armazenamento com apenas 1 ms de exposição de feixe de radiação (SELETSKIY; SHAFTAN, 2015).

As fontes de luz síncrotron modernas, 4^a geração, são projetadas para que a luz síncrotron emitida pelos ID's não toque regiões ou componentes sensíveis, normalmente incidindo apenas em sombras e máscaras (absorvedores), que tem o objetivo de afunilar o leque do feixe e proteger componentes posteriores. Contudo, devido a perturbações causadas pelos trechos de injeção, Linac-Booster e Booster-Anel, assim como da própria máquina em operação, o feixe de elétrons sofre desvios indesejados, que ao passar por um ID, pode gerar um feixe de luz prejudicial para componentes sensíveis da máquina (SELETSKIY; SHAFTAN, 2015).

O Interlock de Órbita Ativo trata-se de um sistema de proteção para o anel de armazenamento, estabelecido para máquina toda ou individualmente para cada ID e seu respectivo setor, em que as cavidades de RF são desligadas caso os BPMs detectem que o feixe de elétrons ultrapassou limites seguros da sua trajetória, seja em posição (translação) ou ângulo (rotação).

Para a implementação do sistema de Interlock de Órbita, é necessário o desenvolvimento da parte eletrônica e de programação para leitura do BPM e desligamento das cavidades RF, assim como também a definição de quais são esses limites seguros, que usualmente não é um trabalho simples, visto que limites muito abertos não protegem o

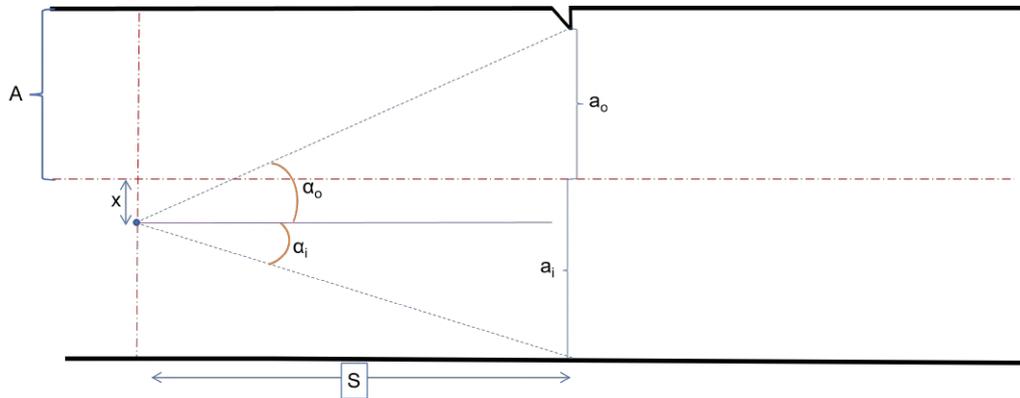
anel, e limites muito restritos desligariam a máquina frequentemente diminuindo o tempo útil de operação da mesma.

Diferentes abordagens podem ser utilizadas para estabelecer os limites seguros de posição e de ângulo para o sistema ativo de Interlock de Órbita. Choi e Willeke (2012) tinham como objetivo estabelecer os limites seguros do espaço de fases para os DW (Damping Wigglers) do NSLS-II. Para isso, realizaram simulações térmicas nas câmaras simulando desvios do feixe para avaliar quais desvios causariam aumentos de temperatura superiores a 50°C, e utilizaram de parâmetros construtivos do NSLS-II e do DW, para determinar limites de posição e ângulo globais para o anel, avaliando por fim o efeito desses limites na disponibilidade da máquina para os usuários.

Seletskiy e Shaftan (2016) apresentam uma nova abordagem utilizando a técnica de BRT nas aberturas horizontais e verticais das câmaras analisadas, que permite a partir de geometrias construtivas dessas e parâmetros do ID, definir com o auxílio de uma rotina em Python os limites de posição e ângulo do NTE (*No-Touch Envelope*), espaço de fase que o feixe de elétrons pode estar, tal qual o feixe de luz gerado não incida nas paredes das câmaras analisadas.

Em seu trabalho Seletskiy e Shaftan (2016), utilizam um exemplo de uma abertura limitante assimétrica, Figura 11, para demonstrar os cálculos geométricos, Equação 1, necessários para definir o NTE considerando um feixe de luz pontual.

Figura 11 – Exemplo de BRT para uma abertura assimétrica.



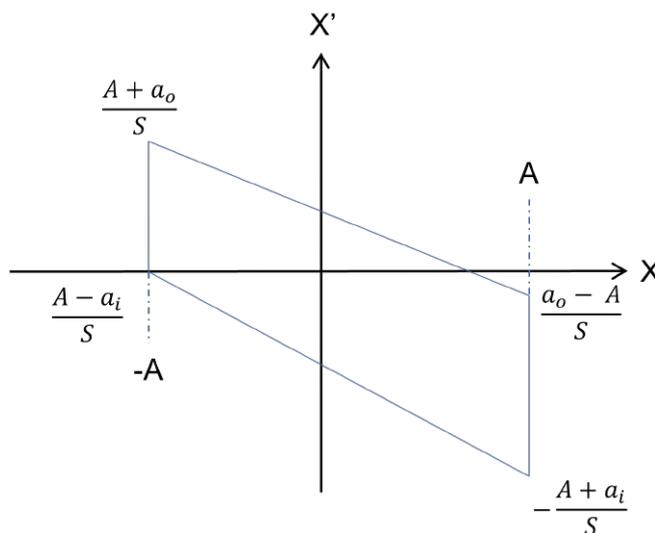
Fonte: Modificado de (SELETSKIY; SHAFTAN, 2016)

$$\begin{aligned}
 x' &\equiv \alpha_o = \frac{a_o - x}{S} \\
 x' &\equiv \alpha_i = -\frac{a_i + x}{S} \\
 x &\in [-A_x, A_x],
 \end{aligned} \tag{1}$$

A nomenclatura das variáveis foi modificada para adequação neste trabalho, em que S é a distância da abertura limitante até o ponto de observação, $\pm A$ é a distância entre

as paredes internas e o centro da câmara no ponto de observação, x é a posição do feixe de elétrons no espaço da câmara, a_o e a_i são as aberturas limitantes da parede externa e interna respectivamente, e por fim x' define as extremidades do NTE, para $x = \pm A$, vide Figura 12.

Figura 12 – Mapa de fases de uma abertura, considerando feixe pontual.



Fonte: Modificado de (SELETSKIY; SHAFTAN, 2016)

No final do trabalho Seletskiy e Shaftan (2016), ao aplicar o método para os onduladores planares padrão utilizados no NSLS-II, definem um AIE de ± 0.25 mrad e ± 0.5 mm vertical e horizontal. O método desenvolvido foi utilizado para instalação de IDs, e auxiliar o projeto do FE de linhas de luz.

Fliller et al. (2018) realizam uma nova análise do sistema de Interlock do NSLS-II considerando a possível atuação excedente das bobinas corretoras de órbita do anel de armazenamento, a análise considera o AIE de cada um dos dispositivos de inserção, o desvio total das bobinas de cada um dos IDs, assim como o AIE típico da máquina, a partir das análises individuais, medidas para evitar o desvio excedente causado pelas bobinas são propostas.

No trabalho de Seletskiy et al. (2016), é apresentada a lógica do sistema de Interlock de órbita implementado para o anel de armazenamento do NSLS-II, em que são listados os parâmetros e condições para ativação do sistema e desligamento da máquina. Ainda neste trabalho são avaliadas as possíveis falhas do sistema, considerando falhas sistêmicas dos BPMs, e planos para aperfeiçoar o funcionamento do sistema de Interlock.

No presente trabalho uma abordagem mista utilizando BRT para determinar o AIE, e uma rotina de automação do SYNRAD+ para validar os limites obtidos é proposta, simulações de elementos finitos no ANSYS serão realizadas com o objetivo de validar a integridade dos componentes mais robustos não contemplados na análise de BRT. O AIE definitivo será levado para o grupo responsável para estabelecer a relação entre a leitura

do desvio excedente do feixe pelos BPMs e o desligamento das cavidades de RF. O método desenvolvido deverá ser otimizado e utilizado para estabelecer os AIE para ID's a serem instalados no futuro.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme anteriormente citado, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um método para a definição do AIE para os IDs e dipolos do Sirius. Com essa finalidade é proposto um método composto de três etapas principais.

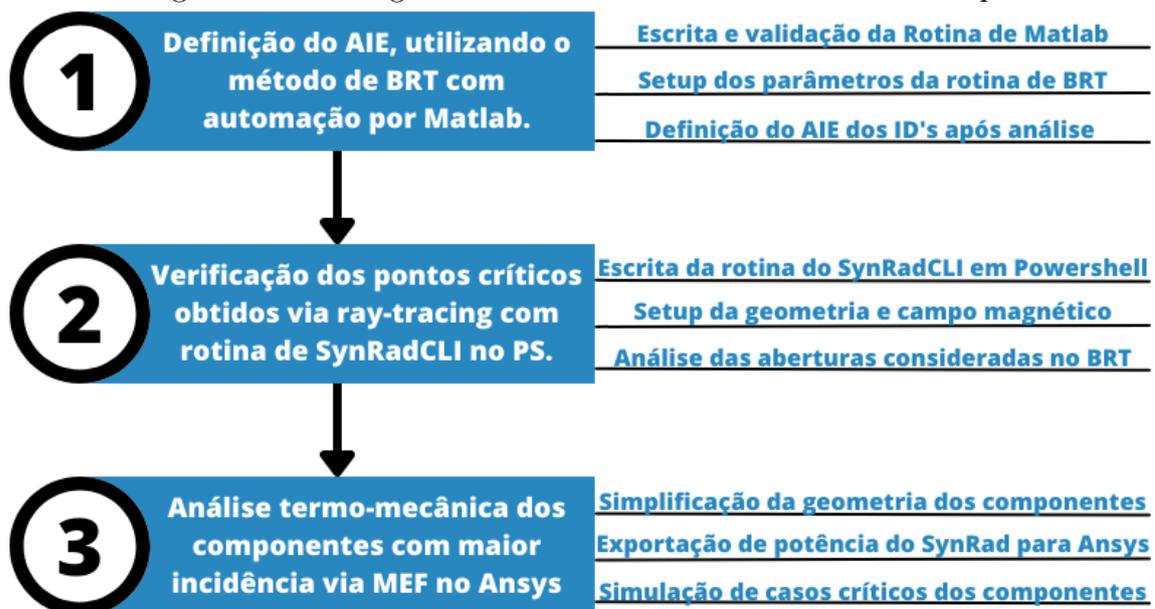
A primeira delas é a utilização do software MATLAB para automatizar a técnica de BRT, e assim determinar um envelope seguro, conforme realizado por Seletskiy e Shaftan (2016) para os onduladores planares do NSLS-II de terceira geração.

Em um segundo momento, os pontos críticos do AIE definidos de cada um dos dispositivos é validado utilizando uma rotina de automação em POWERSHELL de um software de ray-tracing dedicado, SYNRADCLI, que utiliza o Método Monte Carlo para simular a incidência do feixe de luz gerado por cada dispositivo.

Como etapa final, as câmaras de vácuo que apresentarem alta incidência de feixe de luz, serão simuladas utilizando o método de elementos finitos, via ANSYS MECHANICAL, empregando a densidade de potências ou potência total absorvida, obtida no passo anterior, como parâmetro de entrada para simulações termo-estruturais, com o objetivo de verificar se as temperaturas e tensões obtidas estão de acordo com critérios de projeto.

O fluxograma completo do método, incluindo passos de cada uma das etapas é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma do método desenvolvido com subetapas.



Fonte: Autor

O método desenvolvido será aplicado para dois diferentes dispositivos de inserção de alta potência, atualmente em fase de projeto, que pretende-se instalar em médio a curto prazo. São eles o EPU Delta 52 curto e o IVU18.

Com a finalidade de demonstrar o passo a passo do método, as seções subsequentes, detalham cada uma das etapas ilustradas no fluxograma da Figura 13, utilizando o ondulador IVU18, para exemplificar o método proposto.

3.1 DEFINIÇÃO DO AIE VIA MATLAB

Cumprindo a finalidade de aplicar um método ágil e confiável para definir os limites de posição e ângulo do Interlock de órbita, o primeiro passo é a utilização do BRT, evitando as repetidas simulações de *ray-tracing* comumente necessárias anos atrás.

Para obter esses limites rapidamente uma rotina de MATLAB foi desenvolvida, retirando o trabalho de cálculo manual do usuário, restando para esse apenas inserir os parâmetros de entrada do programa. Sendo necessário ter em mãos para rodar a rotina os parâmetros geométricos do trecho e ângulos de divergência horizontal e vertical do feixe de luz do dispositivo em questão.

3.1.1 HIPÓTESES CONSIDERADAS

Antes de seguir para o desenvolvimento da rotina de BRT, é importante definir adequadamente as hipóteses consideradas e as nomenclaturas adotadas para a escrita da rotina.

No trabalho de Seletskiy e Shaftan (2016), estes apresentam o modelo de BRT de forma simplificada, isto é, o feixe de luz sem divergência, apontando as possíveis considerações que podem ser adicionadas. A primeira delas é a aplicação da divergência existente no feixe, e a outra seria o desalinhamento dos componentes do trecho em análise.

Para este trabalho foi considerada apenas a divergência do feixe, visto que esta é de suma importância para a avaliação dos limites de posição e ângulo, dependendo do dispositivo de inserção e polarização em análise. Contudo o desalinhamento é desconsiderado devido ao coeficiente de segurança existente nas simulações do VAC.

O coeficiente de segurança citado, refere-se ao valor de corrente considerado para os cálculos de potência. Conforme a Tabela 1, a corrente de trabalho prevista para o Sirius, em plena operação, é de 350 mA, contudo é um protocolo para o grupo de vácuo utilizar para todas as simulações uma corrente de 500 mA, ampliando em cerca de 40% a potência gerada pelo ID.

A equação 1 para definição do NTE apresentada durante a revisão bibliográfica deve ser atualizada de forma a representar a divergência do feixe de luz adequadamente. As equações 2 e 3, incluem a divergência do feixe para a definição dos mapas de fase do NTE.

$$\begin{aligned}
 x' &\equiv \alpha_o - \alpha_{div} = \frac{a_o - x}{S} - \alpha_{div} \\
 x' &\equiv \alpha_i + \alpha_{div} = -\frac{a_i + x}{S} + \alpha_{div} \\
 x &\in [-A_x, A_x],
 \end{aligned} \tag{2}$$

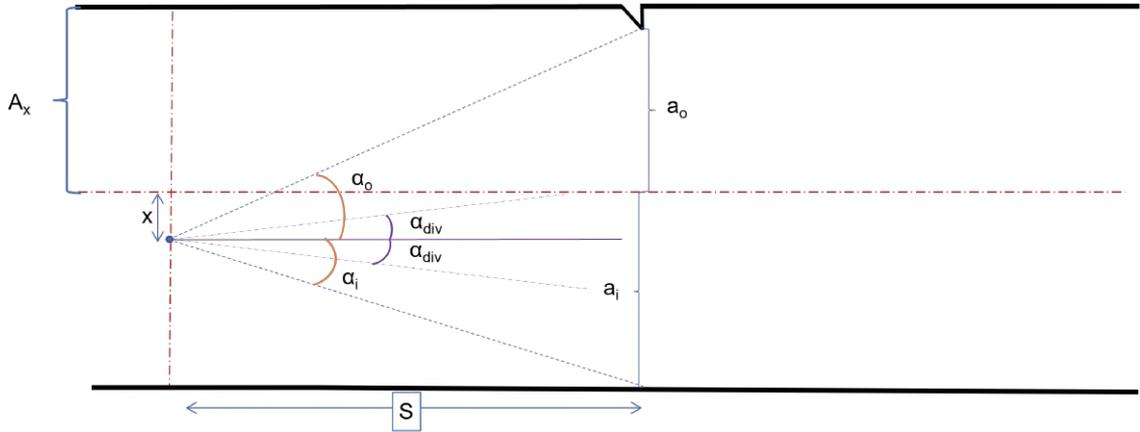
Em que α_o , α_i representam os ângulo de divergência necessários para que o feixe toque as aberturas externa e interna, respectivamente, do inglês *outer* e *inner*, e α_{div} é equivalente a metade da abertura total do leque de divergência do feixe de luz.

$$\begin{aligned}
 y' &\equiv \alpha_t - \alpha_{div} = \frac{a_t - y}{S} - \alpha_{div} \\
 y' &\equiv \alpha_b + \alpha_{div} = -\frac{a_b + y}{S} + \alpha_{div} \\
 y &\in [-A_y, A_y],
 \end{aligned} \tag{3}$$

de forma análoga α_t , α_b representam os ângulo de divergência necessários para que o feixe toque as aberturas superior e inferior, respectivamente, do inglês *top* e *bottom*.

A Figura 14, ilustra como o exemplo de NTE horizontal simplificado apresentado por Seletskiy e Shaftan (2016) deve ser no caso em que é considerada a divergência do feixe de luz.

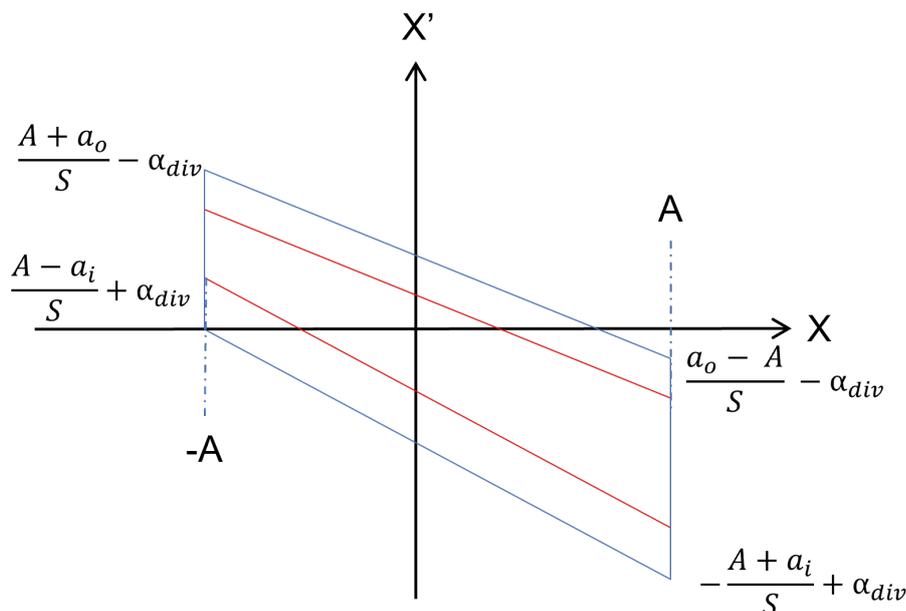
Figura 14 – Exemplo de BRT com divergência do feixe.



Fonte: Autor.

A versão atualizada do mapa de fases considerando a divergência do feixe é representada na Figura 15, onde é possível observar de forma simbólica a redução do NTE em que o feixe de elétrons pode circular, linhas vermelhas em relação às azuis, para que o feixe de luz gerado não toque a abertura em análise.

Figura 15 – Mapa de fases com NTE reduzido devido divergência do feixe.



Fonte: Autor.

Na rotina de Matlab tem-se como objetivo gerar e sobrepor os mapas de fase das aberturas limitantes as quais se deve ter uma atenção especial para que o feixe de luz não as toque. A escrita desta, e a forma como a qual funciona é apresentada na subseção a seguir.

3.1.2 ROTINA DE MATLAB

Para a escrita da rotina de BRT, foi escolhido o MATLAB como software de programação, em razão do CNPEM já possuir licenças disponíveis, a ENT utilizar este amplamente para diversas aplicações, ou seja, facilita o uso do mesmo por outros colaboradores, e devido a familiaridade do autor com o software.

A rotina completa desenvolvida encontra-se em apêndice no final deste trabalho, esta foi utilizada para a realização dos cálculos anteriormente apresentados, assim como para gerar os gráficos dos NTE horizontais e verticais. Para facilitar o entendimento ela é detalhada sumariamente a seguir em algumas subdivisões, são estas:

- **Setup dos parâmetros geométricos:** Nesta primeira parte, são colocadas funções para ler um arquivo de Excel, em que as abas desse arquivo possuem os parâmetros geométricos das aberturas do setor de cada ID, e em sequência estes parâmetros são vetorizados para os cálculos futuros. Linhas 8 a 24 do Apêndice A;
- **Setup da divergência do feixe de luz síncrotron:** São inseridas apenas duas variáveis na segunda parte do código, em que o usuário deve inserir os valores de divergência horizontal e vertical do feixe de luz, referentes ao ID em análise, para isso ele deve utilizar de um software como SPECTRA - há comentado na rotina os valores

Primeiramente quanto aos parâmetros de geometria, devido a própria construção e estabilidade do acelerador como um todo, só é recomendado realizar alterações no trecho reto de cada setor da máquina, ou seja, é necessário ajustar apenas as geometrias citadas para a câmara do ID, e câmara de trecho reto subsequente.

Uma planilha de Excel é utilizada para a parametrização da geometria na rotina, em que cada ID a ser estudado ocupa uma aba da planilha, e nestas abas são inseridas as dimensões e distância das aberturas limitantes da máquina, as quais são obtidas com auxílio de desenhos CAD e informações fornecidas pela DAC, Área de Divisão de aceleradores (responsáveis pela idealização de novos IDs na máquina, juntamente do Grupo de Imãs).

Uma vez definidos os parâmetros geométricos, resta definir as divergências horizontal e vertical do feixe de luz, que é realizado utilizando um software dedicado, o SPECTRA. Dentro do VAC, este software é utilizado para gerar o campo magnético para realização das simulações de ray-tracing e para avaliar a abertura do feixe de luz. A Figura 17 ilustra a interface padrão do SPECTRA para o IVU18.

Figura 17 – Interface do SPECTRA com IVU18 parametrizado.

Accelerator		Light Source	
Storage Ring		Linear Undulator	
Energy (GeV)	3	B (T)	1.22149
Current (mA)	500	λ_u (mm)	18.5
Circumference (m)	518.396	Device Length (m)	2.2
Bunches	864	Reg. Magnet Length (m)	2.146
σ_z (mm)	2.46	# of Reg. Periods	116
Nat. Emittance (m.rad)	2.52e-10	K value	2.11
Coupling Constant	0.01	ϵ_{1st} (eV)	1432.04
Energy Spread	0.00084	$\sigma_{r,r'}$ (mm,mrad)	4.851e-3, 0.01420
$\beta_{x,y}$ (m)	17.2, 3.6	$\Sigma_{x,x'}$ (mm,mrad)	0.06569, 0.01470
$\alpha_{x,y}$	0, 0	$\Sigma_{y,y'}$ (mm,mrad)	5.702e-3, 0.01423
$\eta_{x,y}$ (m)	0, 0	λ_{1st} (nm)	0.865786
$\eta'_{x,y}$	0, 0	Flux _{1st}	3.66976e+15
Peak Current (A)	48.6511	Brilliance _{1st}	1.18625e+21
$\epsilon_{x,y}$ (m.rad)	2.495e-10, 2.495e-12	Peak Brilliance	1.15425e+23
$\sigma_{x,y}$ (mm)	0.06551, 2.997e-3	Bose Degeneracy	31.2336
$\sigma'_{x,y}$ (mrad)	3.809e-3, 8.325e-4	Total Power (kW)	9.1162
γ^{-1} (mrad)	0.170333	Gap-Field Relation	None
Bunch Profile	Gaussian	Field Structure	Antisymmetric
Injection Condition	Automatic	<input checked="" type="checkbox"/> End Correction Magnet	
		Natural Focusing	None
		<input type="checkbox"/> Field Offset & Taper	
		<input type="checkbox"/> Add Phase Error	
		Segmentation	None

Fonte: Autor.

A partir da Figura 17, é possível observar que há diversos campos que devem ser preenchidos pelo usuário, contemplando desde parâmetros construtivos do acelerador, até

parâmetros do dispositivo de inserção a ser analisado.

Ao realizar o *setup* de algumas configurações, o SPECTRA é capaz de mapear o perfil do feixe de luz gerado pelo ID parametrizado, realizando o *plot* de densidade de potência do feixe por ângulo de abertura do mesmo. Estes gráficos são necessários para avaliar o ângulo de abertura utilizado na rotina de MATLAB, e serão apresentados na seção 4

Para a análise a ser realizada, a partir do perfil gerado, cabe ao usuário avaliar a parcela de feixe que as aberturas analisadas são capazes de absorver, isto é, para uma análise arbitrária, ao considerar que uma dada abertura é capaz de suportar até 10% do leque gerado por esse ID, um ângulo menor pode ser inserido na rotina, consequentemente ampliando o “NTE” dessa análise. O método de análise adotado é discutido em seguida.

3.1.4 ANÁLISE DE BRT PARA OS ID DO SIRIUS

Segundo mencionado, os 20 setores do Sirius, são compostos quase que sempre pelas mesmas câmaras e componentes, para as análises realizadas neste trabalho, é necessário considerar apenas as câmaras e componentes existentes entre a câmara do ID e a câmara de vácuo da estação de bombeamento (VPSC1), na qual o feixe de luz do ID é extraído para linha de luz.

Contudo, ambas as câmaras VCB1 (câmara de vácuo do dipolo B1) e VPSC1, devido a curvatura do anel de armazenamento, foram projetadas considerando a incidência de parcela do feixe de luz nestas. Assim tanto a VPSC1 quanto a VCB1 possuem paredes mais espessas, sistema de refrigeração dedicado, e por esse motivo com a finalidade de impedir que componentes da linha de luz recebessem radiação, foram projetadas com aberturas extremamente estreitas.

Ao levar em conta a distância que essas câmaras se encontram do ID, suas aberturas extremamente limitantes, e que muitos IDs geram feixes com grande dispersão, as aberturas dessas câmaras não serão consideradas para a análise de BRT dos IDs analisados adiante. A Tabela 2, apresenta as aberturas analisadas, e a distância dessas do centro do trecho reto.

Tabela 2 – Aberturas limitantes consideradas para o BRT

Abertura limitante	Distância do centro do TR (mm)	
	Baixo beta	Alto beta
Câmara do ID	*	*
Sombra do final do TR	2821	3251
Sombra inicial da VCM	3398	4214
Sombra final da VCM	5045	5045

* Variável de acordo com a câmara do ID analisado.

Fonte: Autor

3.2 VALIDAÇÃO DA ANÁLISE DE BRT VIA SYNRADCLI

Esta etapa do método tem como função realizar uma validação dos resultados obtidos pelo BRT, isto é verificar se de fato os limites de Interlock protegem as aberturas analisadas, assim como verificar se as aberturas que não foram consideradas estão recebendo uma dose segura de feixe de luz.

Este feito, é comumente realizado por meio do software de *ray-tracing*, o SYN-RAD+, desenvolvido no CERN, que usa cálculos estatísticos MMC para simular computacionalmente a emissão do feixe de fótons gerada pelo feixe de partículas ao interagir com elementos magnéticos do acelerador, como dipolos, quadripolos e IDs. (KERSEVAN; ADY, 2019)

Embora o SYNRAD+ seja amplamente difundido como software de *ray-tracing* em diversos aceleradores pelo mundo, a sua utilização para definição e validação de limites de Interlock é dispendiosa, devido ao custo humano e computacional envolvido.

Para acelerar as simulações de *ray-tracing* dos limites críticos do AIE, uma rotina de automação utilizando POWERSHELL, software nativo de programação em linha de comando do Windows, foi desenvolvida para que fosse possível usar a mais nova ferramenta do SYNRAD+, sua versão em linha de comando, o SYNRADCLI.

De acordo com os desenvolvedores, engenheiros de vácuo do CERN, uma versão oficial ainda não está disponível, sendo essa ferramenta disponibilizada apenas no "gitlab", para usuários interessados em novas ferramentas utilizarem versões teste do SYNRAD. Segundo eles, que eles tenham conhecimento, o Sirius está sendo o primeiro acelerador a ter interesse e a usar essa nova ferramenta.

Sendo a utilização da ferramenta benéfica para ambos os lados, para o Sirius, que terá suporte e contato direto com os desenvolvedores do SYNRADCLI, e para os desenvolvedores do CERN, pois o uso no CNPEM possibilita que eles entendam as necessidades e as capacidades do *software* deles, assim como encontrar e relatar *bugs* e espaço para melhorias.

A subseção a seguir descreve o funcionamento das rotinas desenvolvidas de forma resumida. O suporte dos desenvolvedores foi fundamental para o desenvolvimento do código. Devido esta ser uma versão muito simples dessa ferramenta, muitas funções do POWERSHELL foram necessárias para garantir que a rotina realizasse as repetidas iterações para mudança da posição do feixe de elétrons.

3.2.1 ROTINAS DE AUTOMAÇÃO DO SYNRADCLI

O SYNRADCLI, possibilita a automação das simulações do SYNRAD+, porém este precisa ser configurado e inicializado via POWERSHELL, Figura 18. Conforme citado, foram realizadas consultas com os desenvolvedores com a finalidade de entender se a automação desejada poderia ser efetuada no *software*, assim como para buscar auxílio no

desenvolvimento da rotina.

O primeiro passo da elaboração da rotina, foi voltado para estudos para entender os comandos existentes no SYNRADCLI assim como a estrutura lógica da linguagem em POWERSHELL, para então entender quais deveriam ser as entradas do usuário, e o resultado que a rotina deveria gerar. Com o auxílio dos engenheiros do CERN e seguindo a documentação do *software*, em pouco tempo foi possível entender o funcionamento do programa e criar uma rotina simples capaz de realizar uma simulação única, como se fosse efetuada no SYNRAD+.

Figura 18 – Interface do Powershell com rotina do Apêndice C.

```

1 #This script reads the user inputs for electron beam position, and run synrad simulation 'x' times, for each beam position defined by the
2 #This script was developed by Gabriel Saretti - Vacuum Group (VAC) - CNPEM - 21/09/2022
3 #Last updated: 31/01/2023
4
5 clear #clear command window
6
7 # Install-Module -Name 7zip4Powershell -RequiredVersion 2.0.0 #Intall the 7zip compress and extract library, 1 use required.
8
9 #
10
11 # 1. User Inputs
12
13 # 1.1 Beam Position variables
14
15 [float]$X0 = Read-Host("Insert the first X axis Beam Start Position in cm") #X Beam Start Position of the 1st run
16 [float]$X = Read-Host("Insert the last X axis Beam Start Position in cm") #X Beam Start Position of the last run
17 [float]$dx = Read-Host("Insert the X axis Beam Start Position step in cm, that is greater than 0") #X Beam Start Position step between runs
18
19 while ($dx -le 0){ #while used to accept only a positive value
20 [float]$dx = Read-Host("Please insert a step greater than 0")
21 }

```

SYNRAD
 Commence: Initialising!
 Active cores: 4
 Running simulation for: 0 sec
 [] Loading geometry from file c:\synrad_win_1.5.0_beta\SweepInputs\p52-3200_po1H.syn7z
 7-Zip (a) 18.05 (x64) : Copyright (c) 1999-2018 Igor Pavlov : 2018-04-30

Fonte: Autor.

Os resultados de algumas simulações dessa rotina base foram comparados com os resultados de modelos idênticos simulados no SYNRAD+, para avaliar sua confiabilidade. As diferenças nos resultados para faces idênticas, eram inferiores à 0.5%, confirmando que os resultados do SYNRADCLI são confiáveis.

Uma vez que o *software* se mostrou confiável, iniciou-se a escrita da rotina de Interlock. Após diferentes versões e atualizações, atualmente há duas rotinas, a primeira rotina que contém toda a programação pesada, em que os comandos e ações já estão automatizados de acordo com as entradas do usuário, e a segunda, que utiliza a primeira e foi desenvolvida para serem inseridos os parâmetros do feixe, sendo de fácil uso para usuários do SYNRAD+. Os Apêndices B e C disponibilizam os códigos de cada uma dessas rotinas.

3.2.2 ROTINA PRINCIPAL - "ORBIT-INTERLOCK.PS1"

Este é o código principal para as simulações de Interlock de Órbita, o qual é dividido em 4 blocos de programação diferentes, os quais o usuário deve checar e alterar se

necessário, visto que está associado aos nomes e caminho dos arquivos e fator de correção na trajetória do feixe.

1. **Seleção de polarização:** solicita ao usuário o tipo de polarização a ser simulada. Não requer alteração prévia do usuário, apenas utilizado para uso da rotina. Linhas 8-26 do Apêndice B;
2. **Configuração do caminho e nome dos arquivos:** contêm os caminhos e nome dos arquivos de input. Requer alteração do usuário, pois os caminhos dos arquivos são diferentes para dois usuários distintos, assim como diferentes ID's possuem arquivos com nomes distintos. Linhas 27-48 do Apêndice B;
3. **Fator de correção na trajetória do feixe:** Contêm os valores de correção do feixe para as diferentes polarizações. Caso o usuário use outro modelo de input, estes valores devem ser substituídos. Linhas 49-63 do Apêndice B;
4. **Inicia rotina auxiliar:** utiliza um comando para iniciar a rotina auxiliar, assim como apresenta comentários sobre fatores de correção de IDs já simulados. Linhas 64-81 do Apêndice B.

Essa rotina tem como objetivo separar a programação pesada da automatização das simulações, da seleção do arquivo que se deseja simular, e tornar o processo mais intuitivo para um usuário inexperiente em POWERSHELL.

3.2.3 ROTINA AUXILIAR - "BEAMPOSITION_RT-SWEEP.PS1"

Após selecionar a polarização desejada, o programa inicia a rotina auxiliar para efetuar as simulações de ray-tracing do Interlock de Órbita. Antes de iniciar as simulações é requisitado do usuário informações adicionais para que o SYNRADCLI de fato possa ser iniciado. A programação e funcionamento dessa rotina é dividida em 5 blocos principais.

1. **Configuração dos desvios de posição e ângulo, tempo de amostragem e condição de fim de simulação:** Esse primeiro bloco requer informações de entradas do usuário, são solicitados os valores iniciais de posição e ângulo do feixe nas direções x e y, assim como o passo entre cada iteração. Além de informações dos desvios, é pedido o tempo de amostragem da simulação, assim como o número de desvios necessários para finalizar a simulação. Linhas 11-62 do Apêndice C;
2. **Funções de extração e conversão de unidades:** No decorrer do desenvolvimento dessa rotina, houveram dificuldades com a alteração das variáveis de desvio do feixe, dessa forma foi implementado nesta parte funções de extração e compactação do arquivo .syn7z do SYNRAD. Outra parte desse bloco é responsável por converter os ângulos fornecidos em mrad para rad. Linhas 63-90 do Apêndice C;
3. **Configuração dos arquivos para iniciar o SynRadCLI:** Este pequeno bloco é responsável por utilizar os arquivos de entrada da outra rotina, e gerar os arquivos necessários para iniciar o SynRadCLI. Linhas 91-98 do Apêndice C;
4. **Parâmetros adicionais:** Este bloco é dividido em duas partes, a primeira é a criação

das variáveis usadas nos *whiles* para realizar o loop das variáveis de desvio de trajetória, assim como criar variáveis para impedir erros de float nos *whiles*. Enquanto a segunda cria variáveis auxiliares, usadas para acompanhar o andamento da rotina sinalizando quantas simulações foram finalizadas e quantas restam. Linhas 99-128 do Apêndice C;

5. **Início das simulações e Loop de desvios:** Responsável por inicializar o SynRadCLI, este bloco é preenchido principalmente por funções *while*. Ao início de cada simulação, a rotina extrai os arquivos do .syn7z, atualiza os parâmetros com as novas variáveis, compacta o arquivo de input, gera o nome deste conforme as variáveis utilizadas e executa a simulação, por fim compacta o arquivo de resultado e finaliza a simulação, repetindo o processo até todas as simulações estarem finalizadas. Linhas 129-231 do Apêndice C.

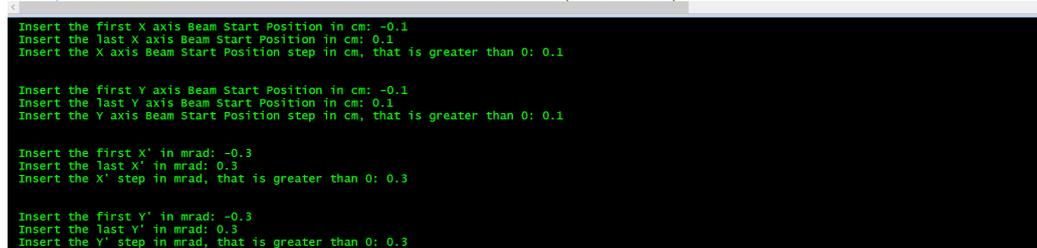
Logo no início da rotina auxiliar, conforme descrito no primeiro bloco, é solicitado ao usuário os limites dos desvios, o passo e outras informações. Após a inserção desses parâmetros a rotina inicia as simulações, apresentando ao usuário o progresso individual de cada simulação e total da rotina conforme parâmetros selecionados. A Figura 19 ilustra a janela de comando após seleção dos parâmetros de desvio.

Figura 19 – Janela de comando do Powershell, com *setup* dos parâmetros de desvio.

```

1 #This script is a friendly menu, used to run Position or Angle Beam position sweep simulations for different polarizations in SynRadCLI
2 #In order to do this, it calls another script as function,
3 #This script was developed by Gabriel Saretti - Vacuum Group (VAC) - CNPEM - 07/07/2022
4 #Last updated: 07/10/2022
5
6 clear
7
8 # 1. Polarization Entry
9
10 $Pol = Read-Host("Choose the Polarization for the simulation, 'H' for Horizontal, 'V' for vertical and 'C' for circular")
11 while ( $Pol -notin "H", "V", "C"){
12 Write-Host "n"
13
14 $Pol = Read-Host("Input must be H, V or C, for horizontal, vertical or circular Polarization, respectively")
15 }
16
17 if ($Pol -eq "C"){
18 Write-Host "Circular Polarization Chosen" #select circular polarization input file

```



```

Insert the first X axis Beam Start Position in cm: -0.1
Insert the last X axis Beam Start Position in cm: 0.1
Insert the X axis Beam Start Position step in cm, that is greater than 0: 0.1

Insert the first Y axis Beam Start Position in cm: -0.1
Insert the last Y axis Beam Start Position in cm: 0.1
Insert the Y axis Beam Start Position step in cm, that is greater than 0: 0.1

Insert the first X' in mrad: -0.3
Insert the last X' in mrad: 0.3
Insert the X' step in mrad, that is greater than 0: 0.3

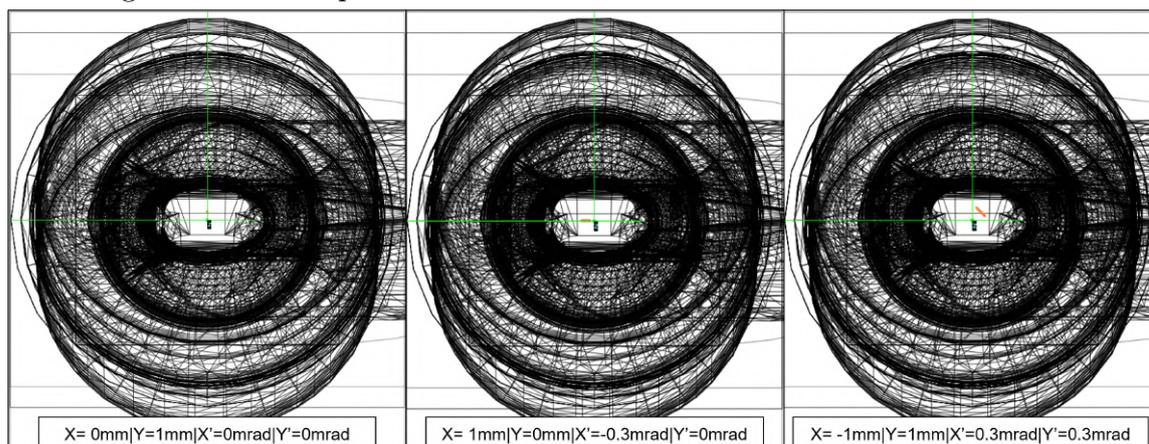
Insert the first Y' in mrad: -0.3
Insert the last Y' in mrad: 0.3
Insert the Y' step in mrad, that is greater than 0: 0.3

```

Fonte: Autor.

Como última validação dos resultados obtidos pelas simulações realizadas pelo SYNRADCLI, algumas dessas simulações foram abertas no SYNRAD+, para comparar as potências obtidas entre estes, assim como para checar se a trajetória do feixe de elétrons estava de acordo com o nome do arquivo e consequentemente com as variáveis de posição utilizadas. A Figura 20, apresenta três diferentes configurações de feixes representados pelas linhas laranjas.

Figura 20 – Exemplo de três diferentes desvios simulados no SYNRAD+



Fonte: Autor.

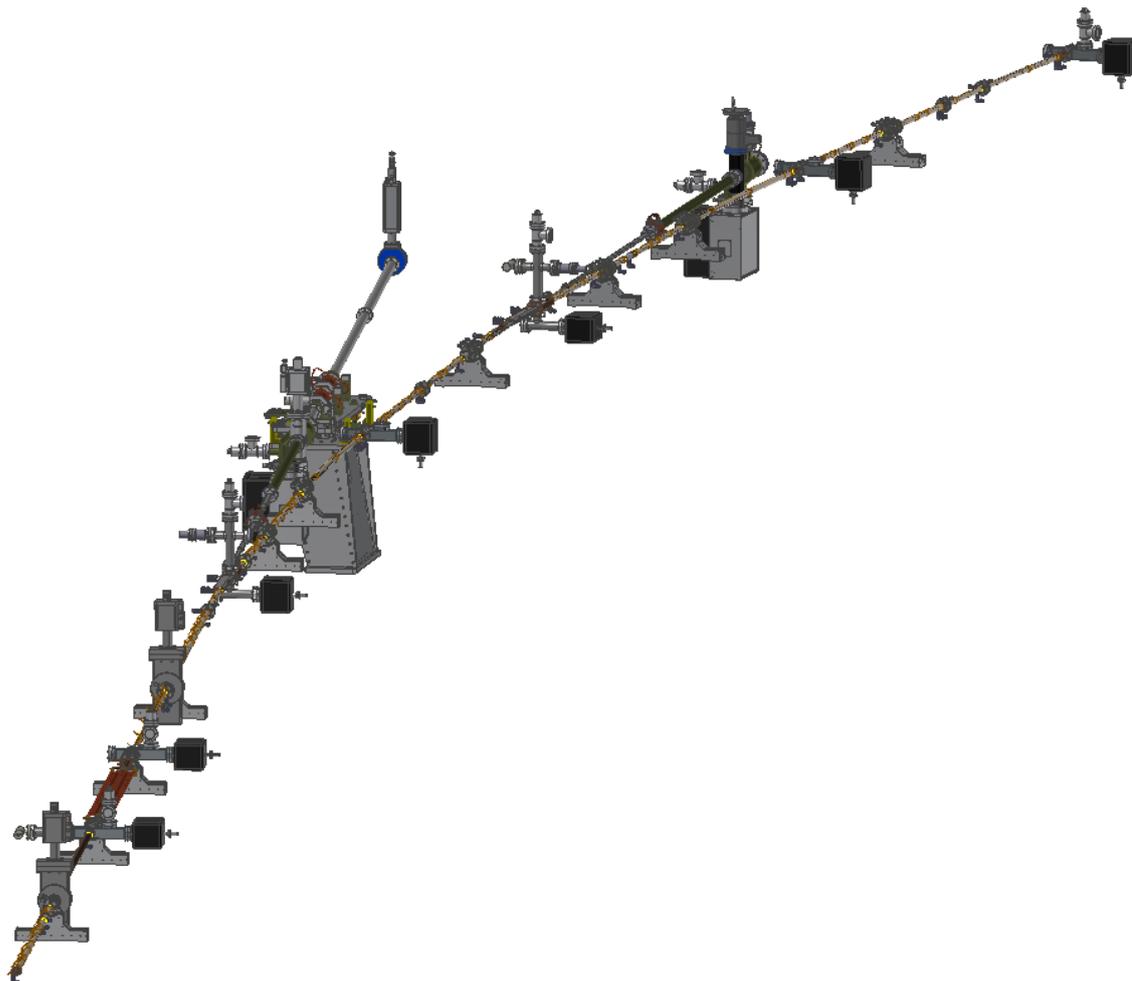
3.2.4 PREPARAÇÃO DA GEOMETRIA E REGIÃO MAGNÉTICA

Conforme apresentado nas subseções anteriores, para utilizar a rotina de automação, assim como o SYNRAD+, é necessário dois *inputs* principais, a geometria em que se deseja traçar o feixe de luz, e as regiões magnéticas do sistema.

Levando isso em consideração, o primeiro passo de qualquer simulação é obter de forma precisa a geometria de todo o trecho a ser analisado, isto é, os comprimentos e seções transversais das câmaras deste, considerando aberturas verticais e horizontais existentes em cada uma delas.

No CNPEM, já existem desenhos CAD (do inglês, *Computer Aided Design*), feitos e constantemente atualizados no INVENTOR, de cada um dos setores do anel de armazenamento, a Figura 21 exemplifica o desenho de parte de um setor de baixo beta, setor 6 como exemplo. Contudo, para utilização desses desenhos no SYNRAD, é necessário extrair a geometria interna deste, visto que o SYNRAD utiliza o formato .stl de arquivo para geometria.

Figura 21 – Modelo CAD do setor 6 no INVENTOR



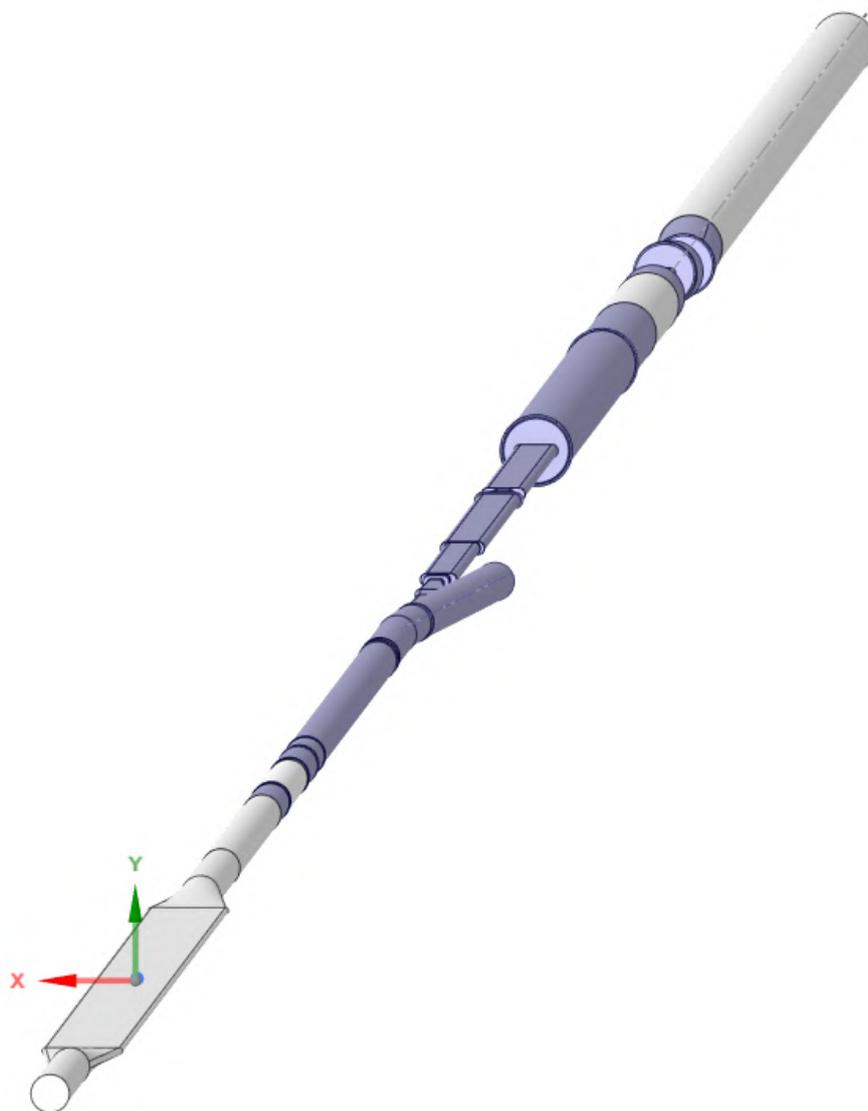
Fonte: Autor.

O processo de extração de geometria interna, é realizado no SPACECLAIM, uma das ferramentas de CAD do ANSYS, visto que este possui uma ferramenta dedicada para essa tarefa, e foi observado que a exportação para formato .stl no SPACECLAIM é melhor realizada que pelo INVENTOR.

Recentemente no VAC, foi realizada a extração e montagem das geometrias internas das câmaras de vácuo, da sombra ao final do TR até o FE, que compõem trechos de alto e baixo beta, com simplificações realizadas na câmara da VPSC1, para facilitar simulações no ANSYS, conforme discutido em uma seção posterior.

Dessa forma qualquer necessidade de preparação de geometria interna, seja em alto ou baixo beta, para análise de *ray-tracing* será facilitada, visto que o usuário só precisará preparar a geometria interna da câmara do ID e do restante do TR. A Figura 22 apresenta a montagem do trecho de baixo beta preparado para o IVU.

Figura 22 – Geometria interna do TR ao final do FE do setor 6



Fonte: Autor.

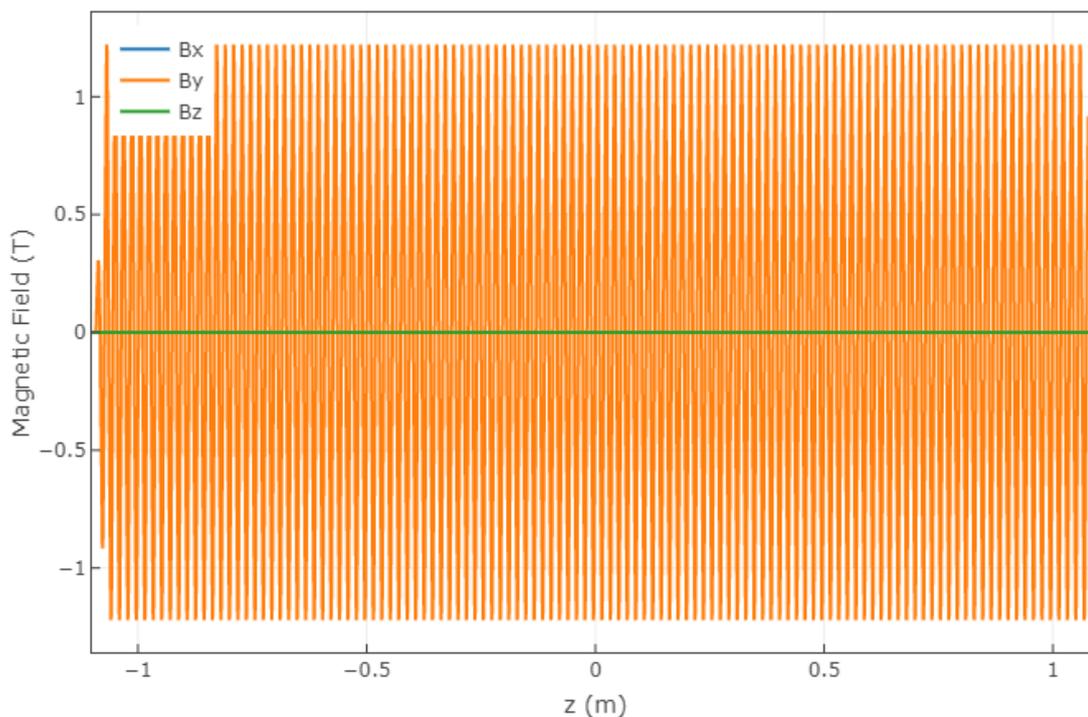
Um vez que a geometria interna já foi preparada, ela é exportada em formato .stl para o SYNRAD+, para criação do arquivo base para rodar as simulações automatizadas. Entretanto ainda é preciso preparar a região magnética do ID, isso é realizado a partir da inserção de parâmetros diversos, dentre estes é necessário inserir um arquivo de campo magnético, o qual é gerado no CNPEM a partir de outro software, o SPECTRA.

Segundo Tanaka (2021) o SPECTRA é um programa de computador utilizado para calcular numericamente as características da radiação síncrotron emitida das mais variadas fontes de luz síncrotron. Para o uso em *ray-tracing* o SPECTRA é utilizado para a geração de campos magnéticos de dipolos e IDs principalmente. Para fazer isso o usuário deve inserir diversos parâmetros da máquina, assim como da fonte de luz síncrotron.

Uma vez definidos os parâmetros, ao utilizar uma ferramenta do software é então gerado o campo magnético, sendo possível exportar os pontos desse gráfico em um arquivo

de texto, que após configurado conforme instruções no site oficial do SYNRAD+, é possível finalizar a configuração do campo magnético neste. A Figura 23 apresenta o campo magnético do IVU18 após configuração do SPECTRA.

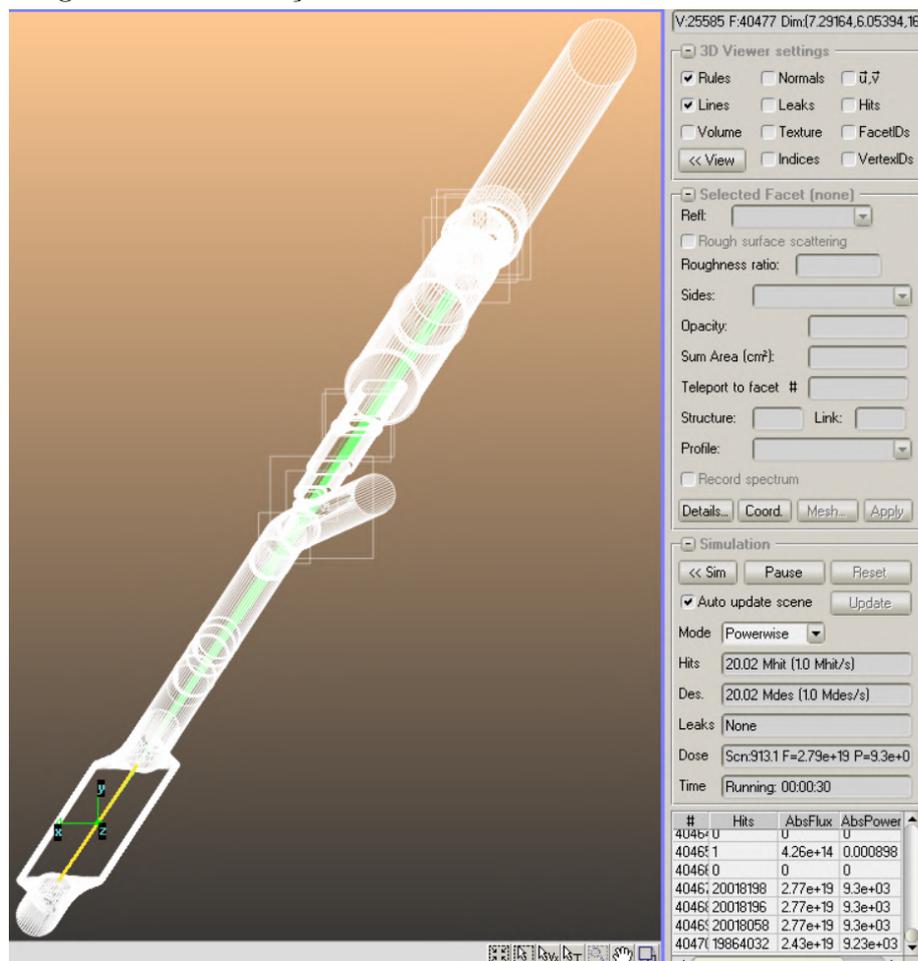
Figura 23 – Campo magnético resultante do IVU18 gerado no SPECTRA.



Fonte: Autor.

O campo magnético é adicionado ao SYNRAD+, e o feixe de elétrons resultante da configuração se torna visível na interface gráfica deste, por fim são configuradas algumas opções da simulação e da geometria para a análise, que fogem do escopo deste trabalho. A potência total do feixe de luz é comparada com o valor indicado pelo SPECTRA. A Figura 24 apresenta a interface gráfica de um arquivo completo com a simulação em andamento.

Figura 24 – Simulação do IVU18 em andamento no SYNRAD+.



Fonte: Autor.

3.2.5 VALIDAÇÃO E ANÁLISE NO SYNRAD

A validação dos limites do AIE obtidos via MATLAB é feita uma vez que as simulações são finalizadas. Para isso os arquivos são abertos, e é verificado se as geometrias limitantes analisadas estão protegidas de qualquer carga significativa de feixe, conforme definido pela análise de BRT.

Caso elas estejam seguras, a análise é validada, entretanto ainda resta verificar as potências resultantes nas câmaras do dipolo B1 (VCB1), e da estação de bombeamento que extrai o feixe de luz (VPSC1). A partir dos planos que existem no início e final dessas câmaras é levantada a potência total absorvida pelas câmaras, e a partir de uma ferramenta de análise de malha, é verificada a densidade de potência nessas câmaras, sendo esse parâmetro importante para essa análise.

Para avaliar se o feixe incidente pode ser danoso as câmaras, utiliza-se a densidade de potência como um importante indicador, visto que se essa for elevada, gera uma grande concentração de calor, enquanto uma potência total na câmara se bem distribuída, não é suficiente para danificar a mesma. Considerando a geometria dessas câmaras, e a

refrigeração delas, o valor de densidade de potência necessário para danificá-las é subjetivo.

Na grande maioria dos casos, é necessário realizar a análise com MEF no ANSYS, conforme detalhado na subseção seguinte, para verificar a integridade dessas duas câmaras. Isso é realizado por meio de simulações termo-estruturais, que irão utilizar a potência nas paredes dessas câmaras no SYNRAD como *input* para as mesmas no ANSYS.

3.3 VALIDAÇÃO DOS COMPONENTES ROBUSTOS UTILIZANDO ANSYS

A última etapa do método proposto é a validação dos limites obtidos, realizando simulações termo-estruturais dos componentes de vácuo do anel de armazenamento, considerando as potências e densidades de potências críticas obtidas pelo *ray-tracing* das posições limite do AIE definido nas etapas anteriores.

Considerando os componentes subsequentes ao final da VCM, tem-se a VCB1 que limita horizontalmente a passagem do feixe na parede externa, e a VPSC1 em seguida limitando também horizontalmente, contudo na parede interna do caminho de extração da luz. Dessa forma dois dos vértices do AIE causam maior incidência na VCB1, e os outros dois na VPSC1.

Para realizar as simulações pelo MEF, com a maior confiabilidade possível, é necessário tornar o processo de exportação do carregamento do SYNRAD para o ANSYS viável e prático. Para isso simplificações na geometria de ambas as câmaras são consideradas, visto que a geometria gerada pelo .stl e usada no SYNRAD, é restrita apenas a uma composição de faces planas, que não condiz com a realidade da geometria das câmaras.

Dessa forma é realizado um procedimento para simplificar superfícies curvas das câmaras em faces planas que evitem triangulações no arquivo stl. Contudo até o momento em que este trabalho foi escrito, simplificações confiáveis só foram alcançadas na VPSC1.

Apesar de não possuir tanta confiabilidade, as simulações e validação da câmara da VCB1 não podem ser descartadas. Uma vez que os dois limites do AIE que tem potência máxima na VPSC1 estejam validadas, simulações com simplificação no carregamento do SYNRAD serão realizadas para VCB1, para validar o AIE em sua totalidade.

As simplificações geométricas da VPSC1 e do carregamento da VCB1 efetuadas, as condições de contorno utilizadas e as análises realizadas para verificação da integridade de ambas as câmaras são descritas nas subseções subsequentes.

3.3.1 SIMPLIFICAÇÕES E CARREGAMENTO DA VPSC1

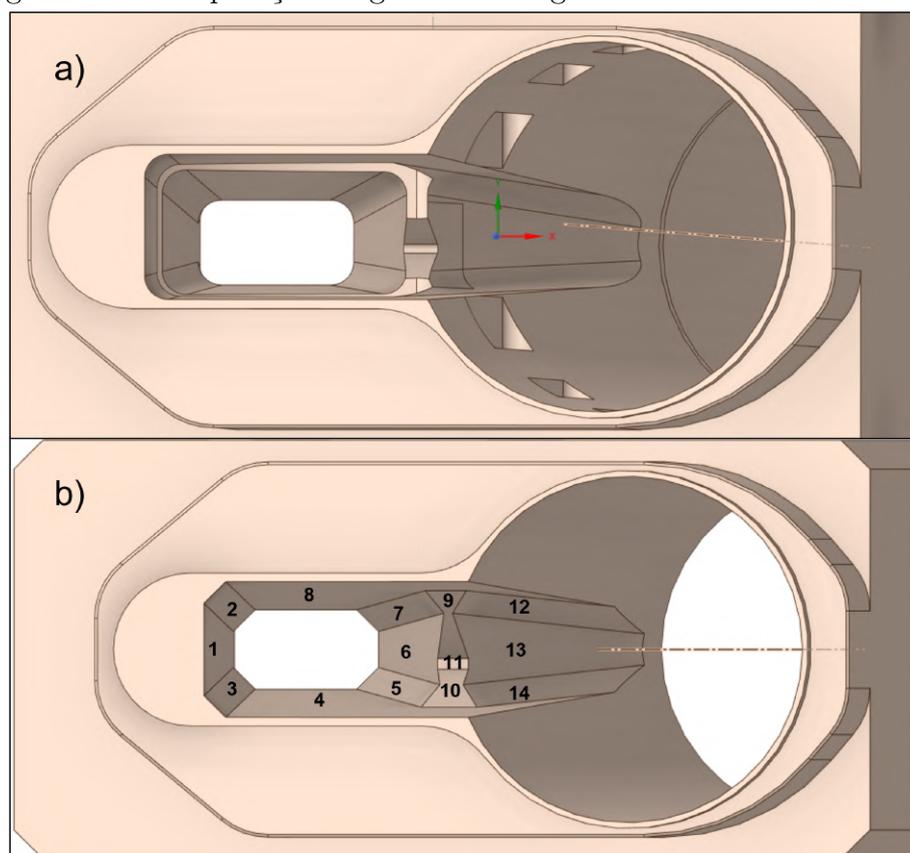
Para a importação das densidades de potência, é utilizado o módulo do ANSYS MECHANICAL "*External Data*", que possibilita importar um arquivo .txt, com uma matriz de dados, e então no ambiente do ANSYS referenciar quais são os parâmetros das linhas e colunas dessa matriz.

Os arquivos .txt importados do SYNRAD, possuem valores nodais de densidade

de potência da face selecionada, isto é, cada valor de densidade de potência do arquivo possui coordenadas em x, y e z, que permitem um mapeamento da densidade de potência na região.

Devido ao efeito de triangulação do .stl, e com o objetivo de reduzir o número de arquivos a serem importados, foi previamente realizada a simplificação das geometrias da câmara da VPSC1. A Figura 25, apresenta a geometria da VPSC1 antes e após a simplificação, respectivamente representadas pelos itens 'a)' e 'b)'.

Figura 25 – Comparação da geometria original e modificada da VPSC1.

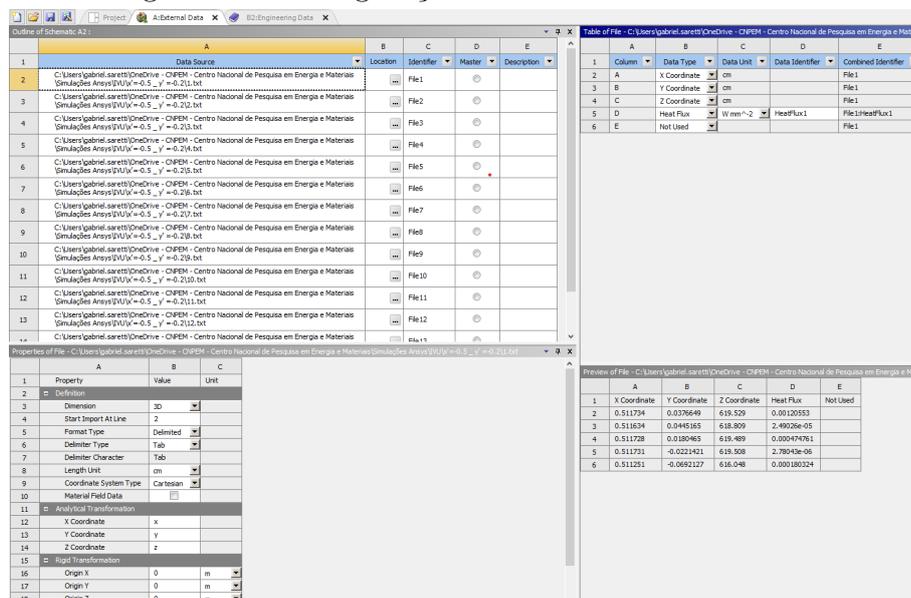


Fonte: Autor.

Com a geometria previamente simplificada, e com os resultados das simulações do SYNRADCLI, cada uma das 14 faces numeradas na Figura 25 são exportadas em arquivos distintos para serem importados no ANSYS. Na interface do módulo *External Data*, são adicionados os arquivos e configurados como exemplificado na Figura 26, para o caso do IVU18.

Uma vez adicionados os arquivos, basta configurar as simulações termo-estruturais, considerando o material, condições de contorno, malha a ser aplicada e análises necessárias.

Figura 26 – Configuração do módulo *External Data*.



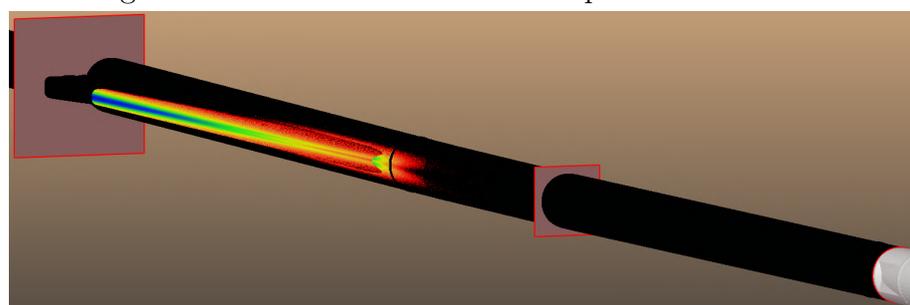
Fonte: Autor.

3.3.2 SIMPLIFICAÇÕES E CARREGAMENTO DA VCB1

Devido a dificuldade encontrada em simplificar a geometria da VCB1, não é possível utilizar a importação de carregamento realizada na VPSC1. Dessa forma outra abordagem, comumente empregada para verificações rápidas no Grupo de Vácuo é utilizada.

Neste método a potência total depositada na câmara da VCB1 é distribuída em uma área de dimensões similares à região onde ocorre incidência de feixe nesta câmara. Na Figura 27 é exemplificada a região de incidência e planos de análise criados para análise de potência depositada, em uma simulação do IVU que possui polarização horizontal.

Figura 27 – Malha de densidade de potências da VCB1

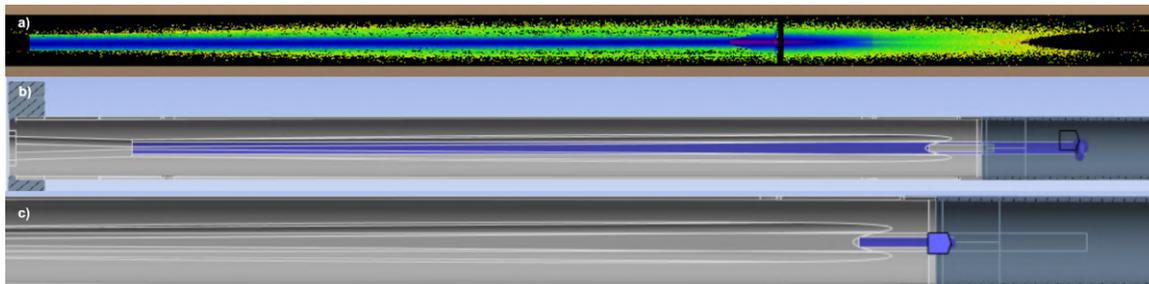


Fonte: Autor.

O SYNRAD possibilita que o usuário cheque as coordenadas de faces e nós da geometria, assim o tamanho da área em que ocorre incidência pode ser obtido e aproximado para aplicação no ANSYS. A geometria real da câmara é inserida no ANSYS SPACE CLAIM, e nesta são criados um ou mais planos no centro da câmara considerando coordenadas obtidas via SYNRAD, os quais são projetados na respectiva parede da câmara.

A Figura 28 ilustra a distribuição de densidade de potência para um caso de um ondulador linear em etapa conceitual de projeto, assim como a criação de planos nas regiões de menor e maior intensidade no ANSYS, respectivamente representadas pelos itens 'a)', 'b)' e 'c)'.

Figura 28 – Abordagem de criação de planos para inserir carregamentos no ANSYS.



Fonte: VAC.

Assim resta aplicar por meio do carregamento “*Heat Flow*” a potência total depositada naquela região para ter um carregamento que se aproxime da distribuição de potências obtida no SYNRAD.

Considerando que cada ID e cada desvio de feixe pode causar incidências diferentes na VCB1, é necessário avaliar caso a caso a melhor forma de criar geometrias aproximadas para a aplicação das potências do SYNRAD, sendo necessário em alguns casos criar áreas distintas, para densidades de potência mais intensas.

3.3.3 CRITÉRIOS DE PROJETO DE RAY-TRACING PARA CÂMARAS ABSORVEDORAS

Primeiro passo é a definição dos critérios para avaliação dos resultados das simulações de elementos finitos. Comumente para projeto de câmaras absorvedoras como a VCB1 e a VPSC1, são utilizados os seguintes critérios:

- Temperatura máxima nas câmaras deve ser significativamente abaixo da temperatura de fusão do cobre $T_F = 1083^\circ C$, por via de regra câmaras padrão abaixo de $150^\circ C$ e câmaras maciças abaixo de $200^\circ C$;
- Temperatura nos canais de refrigeração abaixo da temperatura de ebulição da água. No Sirius os canais são alimentados com água pressurizada à 6 bar, que possui temperatura de ebulição corresponde a aproximadamente $T_w = 160^\circ C$;
- A tensão por carga térmica, isto é, a tensão de von Mises máxima (σ_{max}^{VM}) deve ser inferior à tensão de limite de escoamento (S_y) e ao limite de resistência a tração (S_U) do material das câmaras.

Contudo, segundo o trabalho realizado por Zhang, Biasci e Plan (2002), os quais efetuaram simulações e ensaios utilizando absorvedores de cobre OFHC sob incidência de raio-X, declaram que o critério de $\sigma_{max}^{VM} < S_y, S_U$ é muito conservador, visto que

câmaras absorvedoras são componentes maciços e segundo dados experimentais, as tensões geradas são majoritariamente compressivas e concentradas em pequenas áreas, causando deformação plástica desprezível.

Ao final do trabalho Zhang, Biasci e Plan (2002) propuseram um critério audacioso, em que o projeto dos novos absorvedores deve considerar como critério de projeto que $\sigma_{max}^{VM} < 2 \times S_U$. Para o Grupo de vácuo, um critério intermediário é considerado, visto que não foram realizadas validações experimentais com as câmaras do Sirius, o qual avalia que $\sigma_{max}^{VM} < 2 \times S_y$.

3.3.4 SETUP DAS SIMULAÇÕES

Iniciando pela configuração do material, ambas as câmaras são feitas a partir de tubos retangulares recozidos da liga de Cobre Elox Prata 0,09% fornecidos pela empresa Termomecanica. Propriedades físicas e mecânicas dessa liga encontradas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades Físicas e mecânicas da Liga Cobre elox Prata 0,09%

Matéria prima	Ponto de Fusão (°C)	Condutibilidade Térmica a 20°C (W/m.K)	Módulo de Elasticidade a 20°C (MPa)	Limite de escoamento (MPa) mín (1)
Barra Retangular Recozida	1083	389,11	115000	55

(1) O valor indicado corresponde à carga unitária capaz de provocar uma deformação permanente de 0,5%.

Fonte: Adaptada de Termomecanica (2023). Disponível em: <https://www.termomecanica.com.br/barras-vergalhoes-e-perfis>. Acesso em 15 mar. 2023.

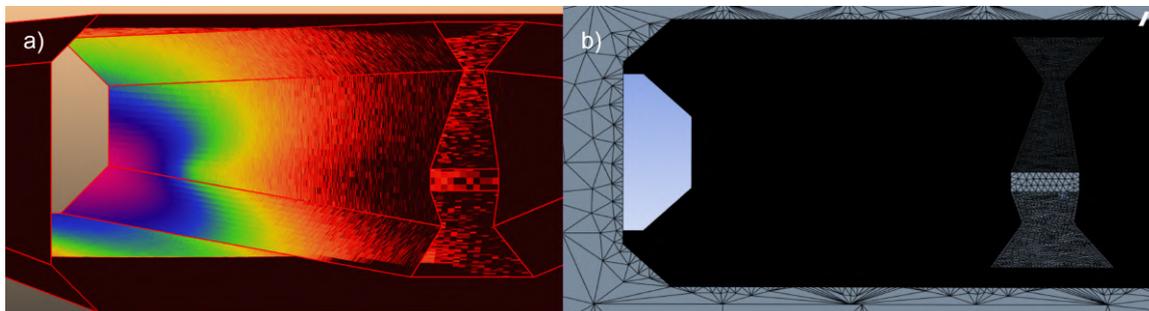
Para as simulações são utilizados materiais da biblioteca interna do ANSYS, em que as câmaras de CuAg serão atribuídas com “*Copper Alloy*”, e os flanges com “*Stainless Steel*”. Essa simplificação não é problemática, visto que segundo a literatura utilizada, qualquer simulação que $\sigma_{max}^{VM} < 2 \times S_y$ será considerada em regime elástico, por possuir deformação plástica local e desprezível.

As geometrias utilizadas são as câmaras das quais foram extraídas as geometrias internas da VCB1 e da VPSC1 simplificada, visto que o uso dessas evita qualquer possível erro tanto no processo de importação de carregamento, devido ao uso de .stl do SYNRAD, quanto na criação de planos para aplicação de carregamento de forma manual.

A malha de elementos finitos utilizada no ANSYS foi refinada apenas nas faces de interesse, isto é, onde há carregamento, e essa foi definida pelo tamanho do elemento no valor de 0,2 mm, mesma dimensão utilizada no SYNRAD para a malha de densidade

de potências. A Figura 29, ilustra a malha da geometria para a câmara da VPSC1, no SYNRAD e no ANSYS, representadas pelos itens 'a)' e 'b)' respectivamente.

Figura 29 – Malhas aplicadas para VPSC1 no SYNRAD e ANSYS.



Fonte: Autor.

É digno de nota mencionar que um controle de malha melhor seria ideal para reduzir variações de posição dos nós do SYNRAD com o ANSYS, quando utilizada a abordagem de importação de potências. Entretanto, tendo em mente a dificuldade envolvida, e com o objetivo de garantir a confiabilidade da simulação, a variação dos valores de densidade de potência entre softwares são checados em cada uma das simulações.

Próximo passo é a definição das condições de contorno (CC). Para a simulação térmica de ambas as câmaras, é inserida a CC de coeficiente de convectivo nas faces dos canais de refrigeração, com valor de $0,01 \text{ W/mm}^2\text{K}$, valor conservador utilizado, visto que segundo cálculos de transferência de calor, os canais de refrigeração dessas câmaras em temperatura ambiente devem ser de aproximadamente $0,03 \text{ W/mm}^2\text{K}$.

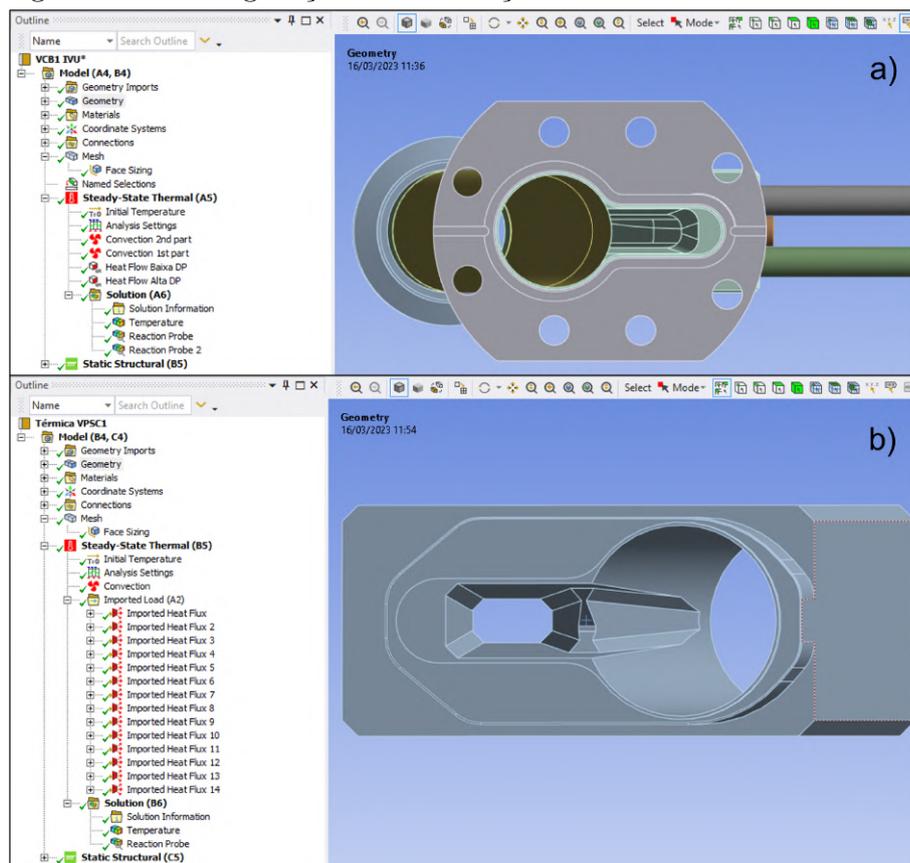
Já os carregamentos são inseridos conforme definido nas subseções anteriores. A Figura 30, ilustra o *setup* padrão de simulação térmica da câmara VCB1 e da VPSC1 respectivamente representadas pelos itens a) e b), em que a diferença na configuração das cargas térmicas é evidenciada.

Uma vez realizadas as simulações é utilizado o “Probe” da CC de coeficiente de convecção para checar se a potência dissipada pela convecção é equivalente à potência dissipada no SYNRAD, assim como é verificada a distribuição de temperatura na câmara, para avaliar se a simulação teve um resultado plausível.

Uma vez que as simulações térmicas são realizadas e seus resultados verificados, a distribuição de temperatura obtida é utilizada como carga térmica para a simulação estrutural. Além do carregamento são inseridas duas CC de “Remote Displacement” nas flanges ou faces equivalentes às extremidades das câmaras.

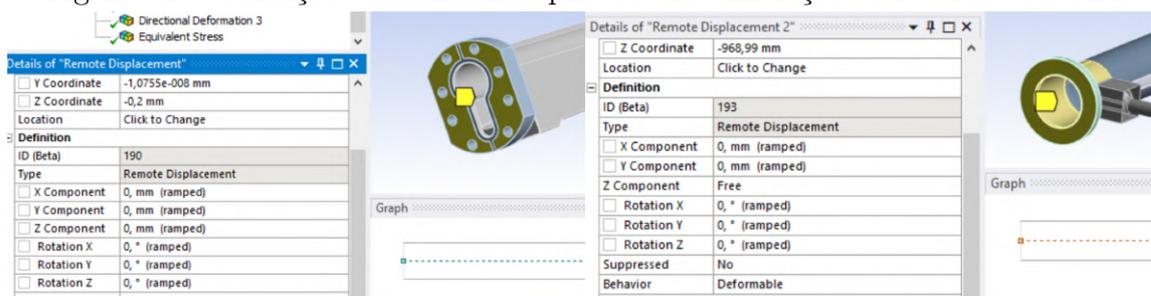
Essas CC permitem a execução das simulações estruturais, e simulam a realidade da estrutura do anel de armazenamento, em que uma delas é completamente fixa, enquanto a outra possui liberdade apenas em Z, simulando a dilatação e compressão que pode ocorrer na direção axial devido aos bellows existentes na máquina. A Figura 31, ilustra as condições de contorno aplicadas na VCB1 como exemplo.

Figura 30 – Configurações de simulação térmica da VCB1 e VPSC1.



Fonte: Autor.

Figura 31 – Condições de contorno aplicadas na simulação estrutural da VCB1.



Fonte: VAC.

Caso ambas as simulações térmicas e estruturais da VCB1 e da VPSC1, para os quatro limites obtidos do AIE sejam seguros, isto é não causem danos às câmaras, o AIE é aprovado e pode ser implementado no Sistema de Interlock de Órbita, entretanto caso não sejam validados, é realizada uma nova iteração, reduzindo os limites com o objetivo de obter um novo AIE, que seja seguro para a máquina.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta a aplicação do método proposto para os dispositivos de inserção IVU18 e Delta 52 curto. Os envelopes seguros de interlock são definidos ao final das respectivas subseções, sendo discutido ao final da seção a eficiência do método utilizado.

4.1 IVU - IN VACUUM UNDULATOR

O IVU18, está em etapa de de projeto conceitual, e uma análise de ray-tracing e limites de interlock foi requisitada para avaliar a viabilidade deste dispositivo de inserção. A Tabela 4 apresenta os parâmetros geométricos considerados para a câmara do IVU18, assim como os parâmetros magnéticos do mesmo.

Tabela 4 – Parâmetros do IVU18.

Parâmetros geométricos da câmara de vácuo		Parâmetros magnéticos do IVU	
Comprimento total (mm)	2200	Comprimento total do ID (mm)	2200
Abertura horizontal (mm)	50	Período magnético (mm)	18,5
Abertura vertical (mm)	4	Campo magnético (T)	1,22

Fonte: Autor.

Ao inserir os parâmetros da Tabela 4 no SPECTRA, o *software* é capaz de calcular a partir da Equação 4, que a potência total do feixe de luz do IVU18, gera um feixe de luz com potência total de 9,12 kW.

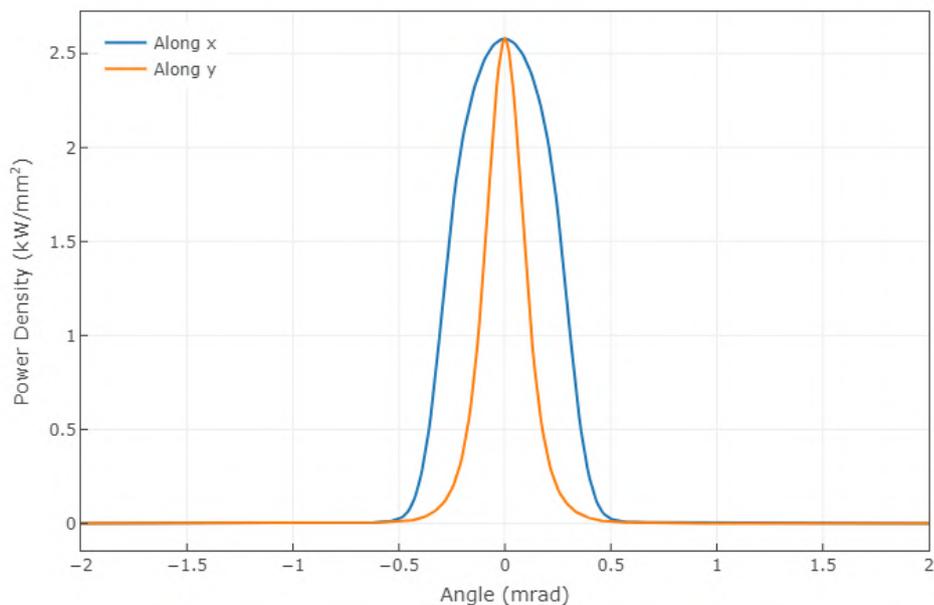
$$P_T = 0,633LIE^2B^2 \quad (4)$$

Em que, P_T é a potência total em kW, L é o comprimento do ondulator em metros, I é a corrente do feixe em mA, E é a energia do feixe em GeV, e B é o campo magnético máximo do ondulator em T.

o SPECTRA viabiliza a geração do gráfico de perfil do feixe de luz do IVU18, Figura 32, do qual é possível obter os ângulos de divergência horizontal e vertical totais de 1,6 mrad e 1,32 mrad respectivamente, em que a densidade de potência do feixe se torna desprezível.

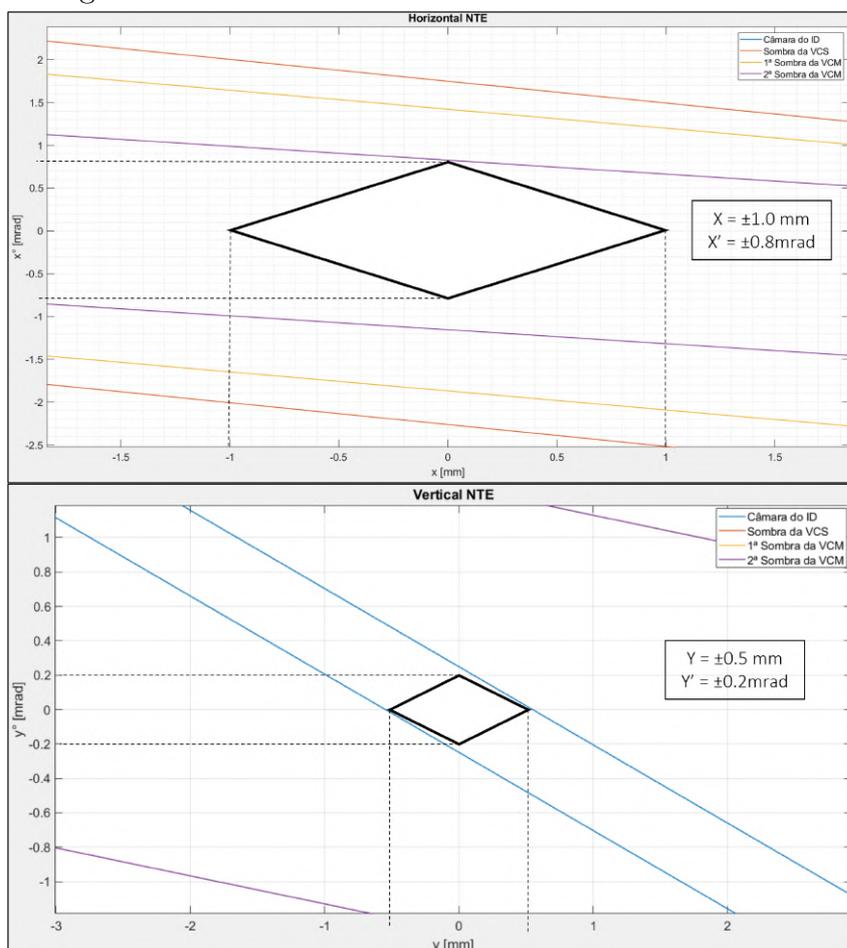
A partir dos ângulos de divergência obtidos e parâmetros geométricos das aberturas limitantes, foi gerado o mapa de fases horizontal e vertical, os quais são apresentados na Figura 33 com os respectivos AIE propostos.

Figura 32 – Distribuição de densidade de potência angular do IVU18.



Fonte: Autor.

Figura 33 – NTE horizontal e vertical iniciais do IVU18.



Fonte: Autor.

Os limites de posição e ângulo horizontais são de $\pm 1 \text{ mm}$ e $\pm 0,8 \text{ mrad}$, enquanto os limites verticais são de $\pm 0,5 \text{ mm}$ e $\pm 0,2 \text{ mrad}$. Os limites inicialmente definidos são simulados no SYNRAD utilizando a rotina desenvolvida e POWERSHELL para verificar se há incidência de feixe nas aberturas analisadas.

A Tabela 5, apresenta as potências depositadas por câmara para simulações de diferentes condições de desvio dos AIE apresentados.

Tabela 5 – Potência absorvida para desvios limite de ângulo.

Câmara	Potência absorvida (W) em diferentes condições de desvio de feixe de elétrons					
	Feixe Ideal	$x' = -0,8$ $y' = 0,2$	$x' = -0,8$ $y' = -0,2$	$x' = 0,8$ $y' = 0,2$	$x' = 0,8$ $y' = -0,2$	$x' = 0,8$ $y' = 0$
	VCS-TR	0,01	0	0	0	0
Válvula+BPM	0	0	0	0	0	0
VCM - Cu 1 (1)	0	0	0	0	0,01	0,01
VCM - INOX (1)	0	0	0	0,01	0	0
VCM - Cu 2 (1)	0,02	0,1	0,1	0,23	0,23	0,23
VCB1 - PADRÃO	0,01	0,1	0,1	0,04	0,04	0,03
VCB1 - ABS	32,54	72,47	72,55	4623,04	4618,91	4249,54
VPSC1 - ABS	57,33	5442,18	5442,29	319,96	323,68	93,7

(1) Três diferentes tubos que compõem a VCM: tubo menor de cobre, tubo de Inox da corretora, tubo maior de cobre.

Fonte: Autor.

É observada incidência desprezível nas câmaras do TR e na VCM, como previsto na rotina de MATLAB, contudo os valores de potência e densidade de potência obtidos para as câmaras da VCB1 e VPSC1 são extremamente elevados devido ao desvio de ângulo de 0.8 mrad na primeira iteração do NTE.

Em virtude da experiência prévia de simulações termo-estruturais realizadas pelo Grupo de Vácuo, é de conhecimento que essas câmaras não suportariam cargas térmicas tão elevadas, dessa forma um novo NTE horizontal é proposto, com limites de posição e ângulo de $\pm 0.5 \text{ mrad}$ e $\pm 0.5 \text{ mm}$, respectivamente.

Novas simulações são realizadas com os novos limites, as quais os valores de potência absorvida das câmaras da VCB1 e VPSC1 são listadas na Tabela 6 e comparadas com a condição de feixe ideal.

Tabela 6 – Potência absorvida para desvios limite de ângulo do novo AIE.

Câmara	Potência absorvida (W) em diferentes condições de desvio de feixe de elétrons		
	Feixe Ideal	$x' = -0,5$ $y' = 0,2$	$x' = -0,5$ $y' = 0$
VCB1 - PADRÃO	0,01	0,03	0,01
VCB1 - ABSORVEDORA	32,54	72,67	450,16
VPSC1 - ABSORVEDORA	57,33	1267,51	76,21

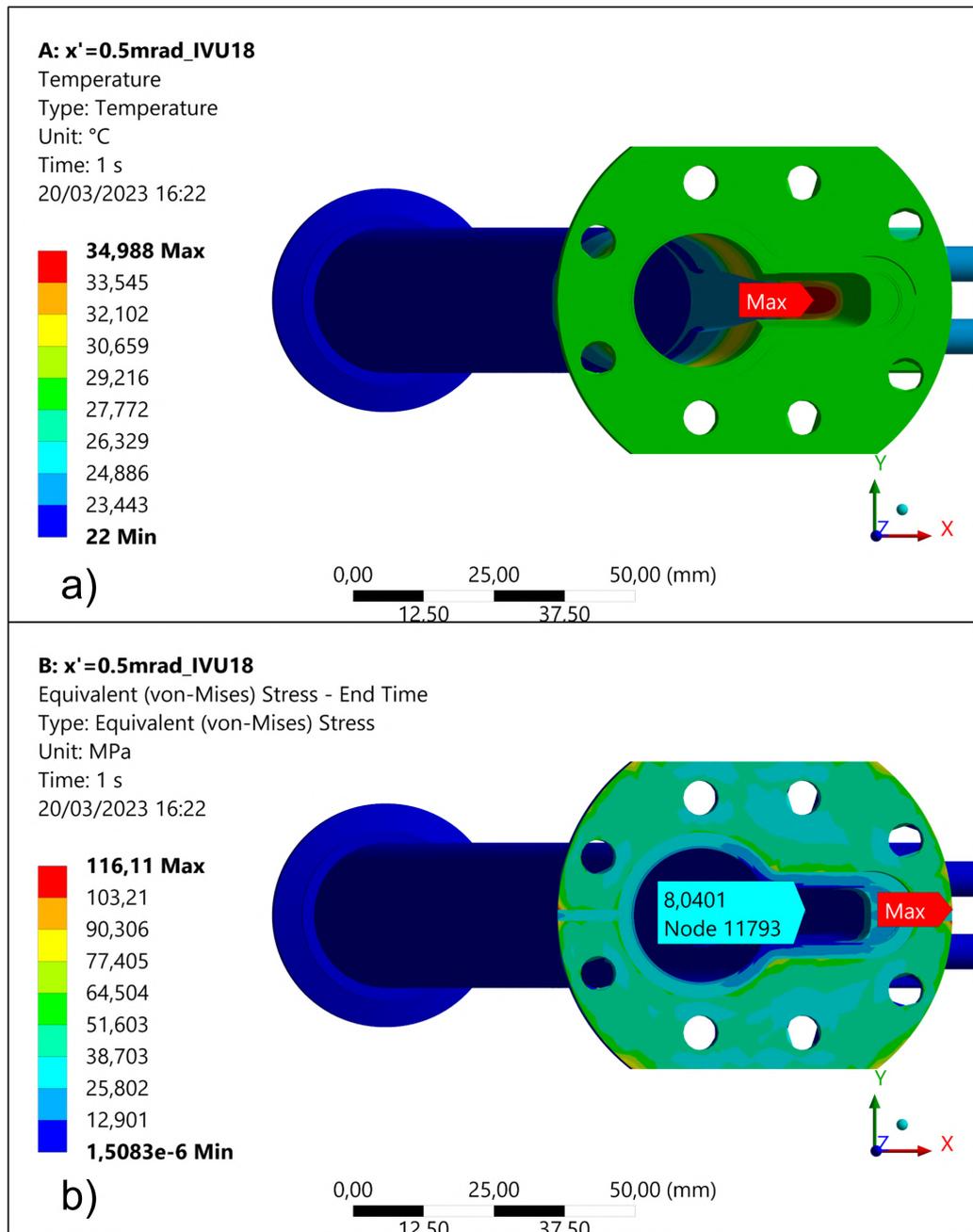
Fonte: Autor.

Observa-se uma redução significativa dos parâmetros em ambas as câmaras. O caso de $x' = -0,5$ mrad e $y' = 0,2$ mrad é utilizado para analisar a VPSC1, enquanto o caso de $x' = 0,5$ mrad usado para a análise da VCB1.

Para a simulação da VPSC1 é utilizada a importação de densidade de potências do SYNRAD. Enquanto para a simulação da VCB1 é realizada pela abordagem de criação de planos no ANSYS para inserção do carregamento, motivo pelo qual não é considerada a combinação de desvio de ângulo pois isso dificultaria a criação de planos representativos.

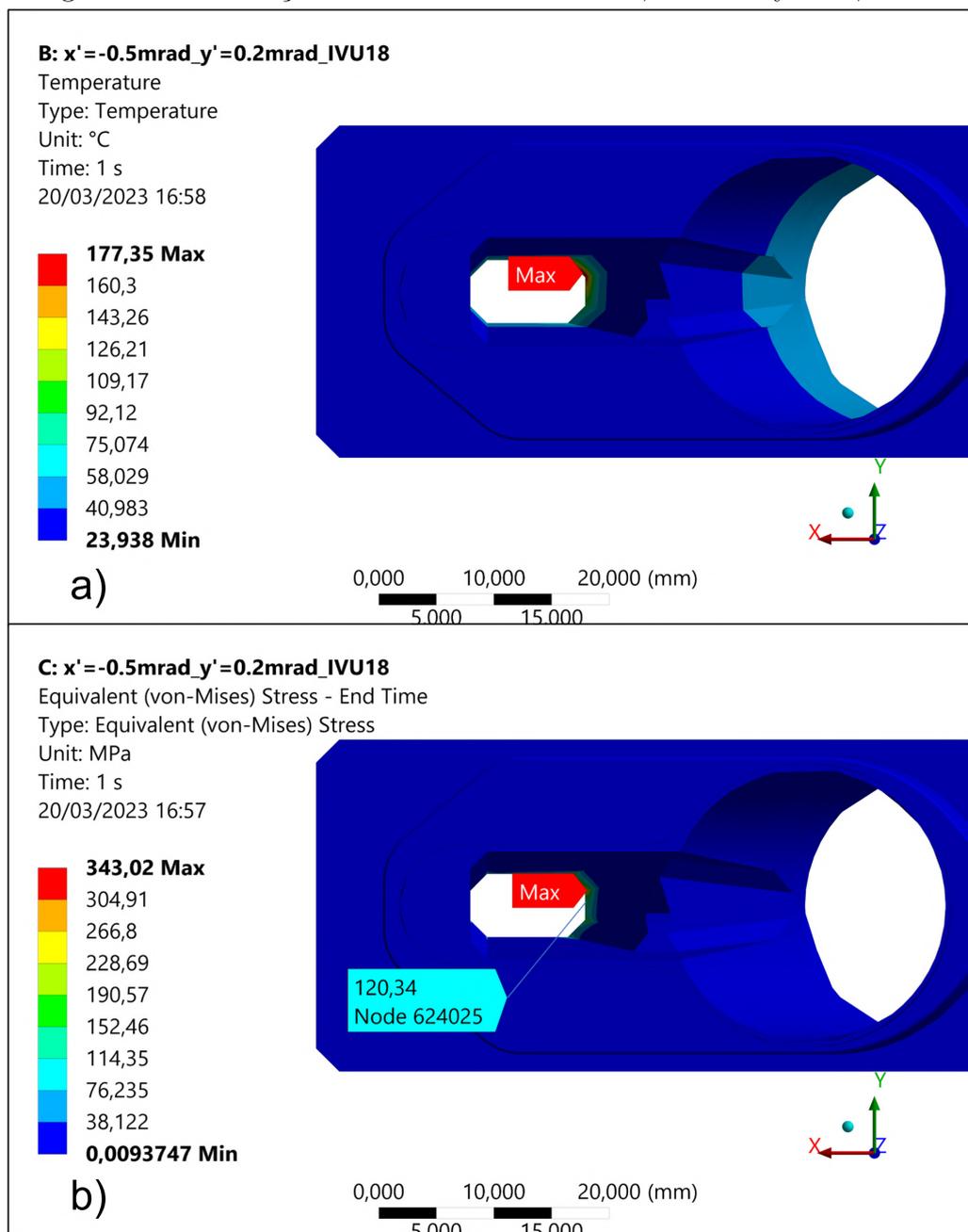
A temperatura máxima e tensão de von Mises equivalente para as simulações da VCB1 e da VPSC1 são apresentadas nos itens a) e b) da Figura 34 e da Figura 35 respectivamente.

Figura 34 – Simulações da VCB1 com $x' = 0,5$ mrad.



Fonte: Autor.

Figura 35 – Simulações da VPSC1 com $x' = -0,5$ mrad e $y' = 0,2$ mrad.



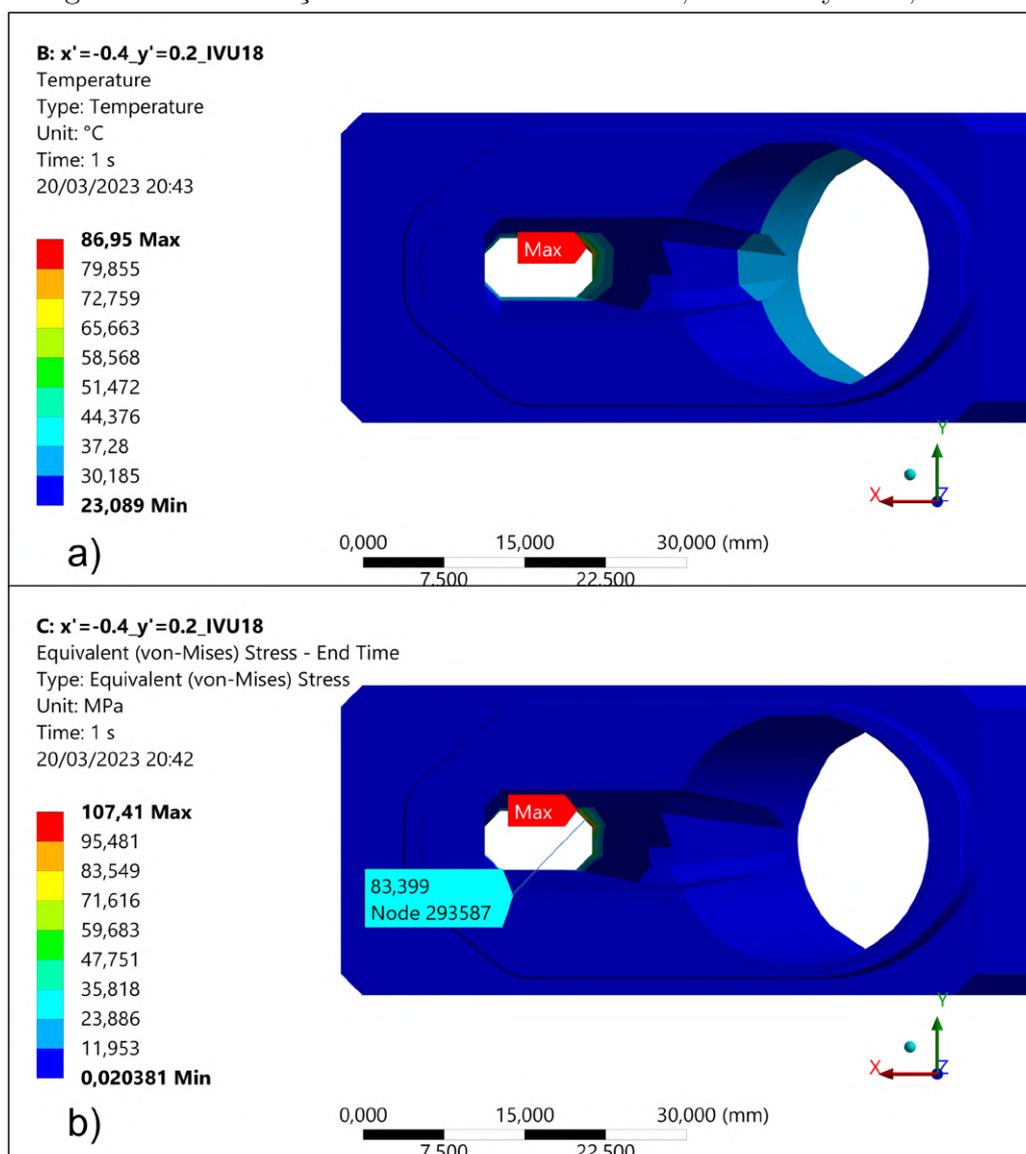
Fonte: Autor.

Para o caso de $x' = 0,5$ mrad, obteve-se uma T_{max} de $34,99^{\circ}C$ e uma σ_{max}^{VM} de $116,11$ MPa, em concentradores de tensão nas extremidades do flange. Enquanto o caso de $x' = -0,5$ mrad e $y' = 0,2$ mrad, resultou em uma T_{max} de $177,35^{\circ}C$ e σ_{max}^{VM} de $343,02$ MPa no concentrador de tensão da região de incidência de feixe.

A partir dos resultados obtidos, observa-se que a câmara da VCB1 está dentro dos critérios definidos, enquanto a σ_{max}^{VM} da VPSC1 não satisfaz o critério de tensão, reprovando os limites considerados. Os limites para o NTE horizontal são então reduzidos para ± 0.4 mrad e ± 0.5 mm respectivamente.

Considerando que a VCB1 foi aprovada para um limite maior, é simulado apenas o caso de $x' = -0,4$ mrad e $y' = 0,2$ mrad no SYNRAD, do qual obteve-se uma potência depositada de $565,61W$ e densidade de potência máxima de $18,05 W/mm^2$ na VPSC1. Os itens a) e b) da Figura 36 apresentam a T_{max} e a σ_{max}^{VM} , obtidas das simulações termo-estruturais realizadas.

Figura 36 – Simulações da VPSC1 com $x' = -0,4$ mrad e $y' = 0,2$ mrad.

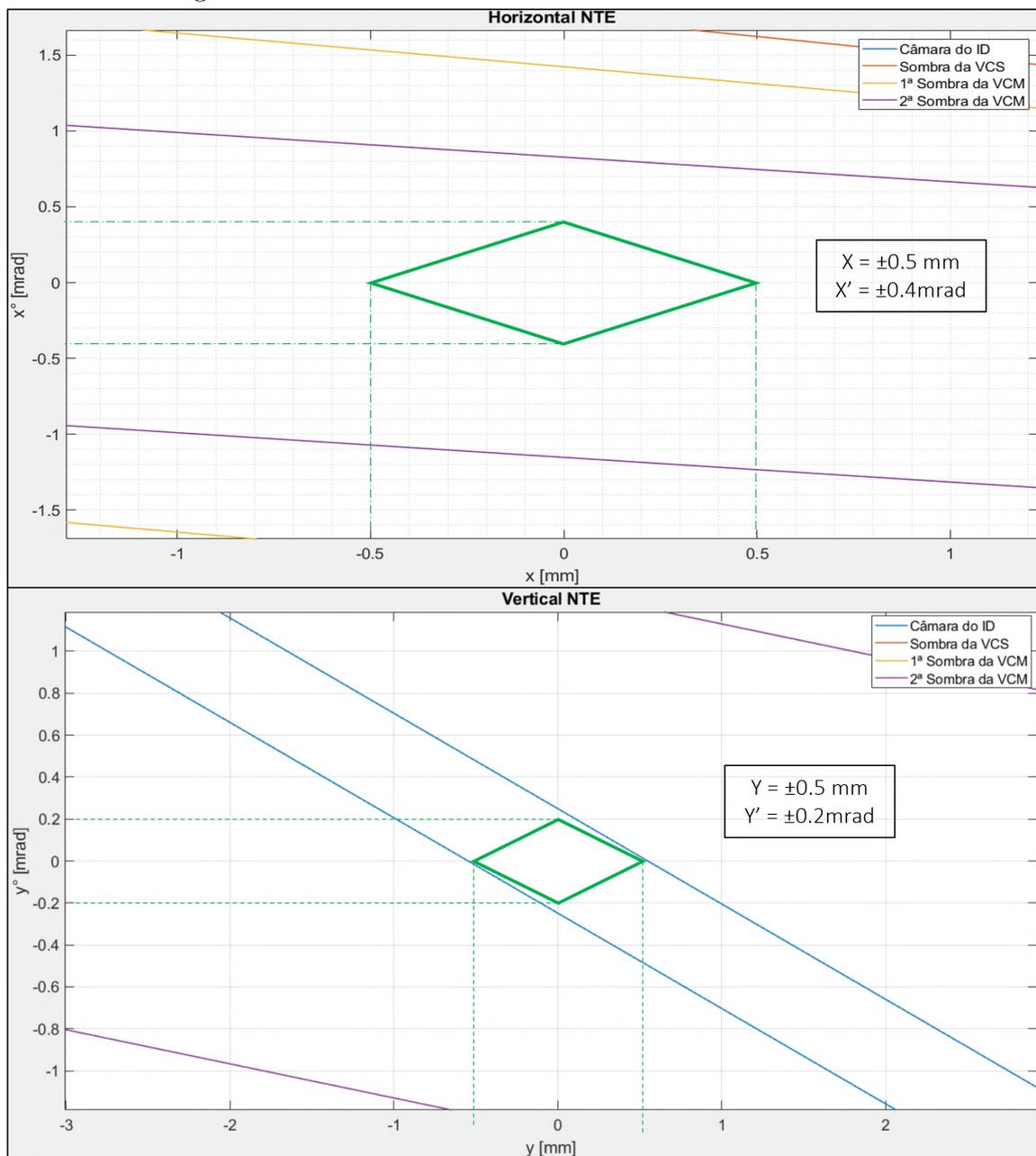


Fonte: Autor.

A partir da Figura 36, observa-se uma T_{max} de $86,95^{\circ}C$ e σ_{max}^{VM} de $107,41$ MPa, valores que estão abaixo dos critérios limite estabelecidos.

Com a análise realizada, são aprovados os limites de posição e ângulo horizontais e verticais de $x = \pm 0,5$ mm e $x' = \pm 0,4$ mrad e $y = \pm 0,5$ mm e $y' = \pm 0,2$ mrad. A Figura 37, apresenta a versão final do AIE do IVU18 representada por mapas de fases com losangos verdes.

Figura 37 – AIE horizontal e vertical definitivos do IVU18.



Fonte: Autor.

4.2 EPU DELTA 52 CURTO

O EPU Delta 52, diferente do IVU18, é um ondulador elíptico que permite diferentes tipos de polarização de feixe de luz, sendo versátil por permitir diferentes técnicas ópticas para pesquisa de materiais.

A princípio há demanda para instalação de dois EPU Delta52 no Sirius, um curto de aproximadamente 1,2 metros, com instalação prevista para 2023 e um longo de 3,2 metros sem data definida. A Tabela 7 lista os parâmetros geométricos e magnéticos do Delta52 curto.

Tabela 7 – Parâmetros do EPU Delta52 Curto.

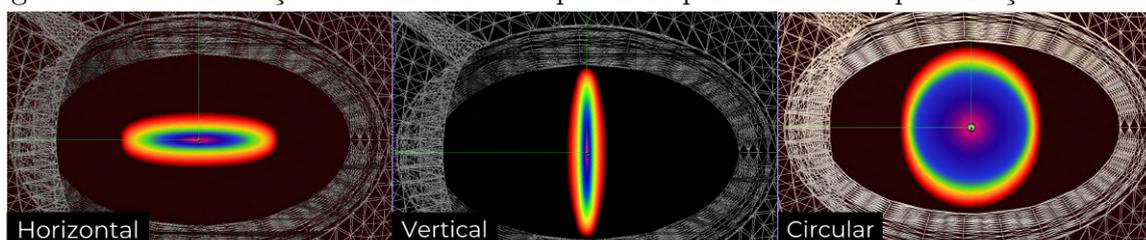
Parâmetros geométricos da câmara de vácuo	Parâmetros magnéticos do Delta52 curto		
Comprimento total (mm)	1400	Comprimento total do ID (mm)	1200
Abertura horizontal (mm)	13	Período magnético (mm)	52,5
Abertura vertical (mm)	7,6	Campo magnético máximo (T)	1,193

Fonte: Autor.

Considerando que o EPU Delta52, permite polarização horizontal, vertical e circular, foi realizado uma pesquisa para atender as necessidades dos usuários do Sirius. Da qual avaliou que este ID deverá ser utilizado em polarização circular majoritariamente.

A Figura 38, ilustra a distribuição de densidade de potência do feixe de luz para as polarizações horizontal, vertical e circular, respectivamente.

Figura 38 – Distribuição de densidade de potência para diferentes polarizações do EPU.

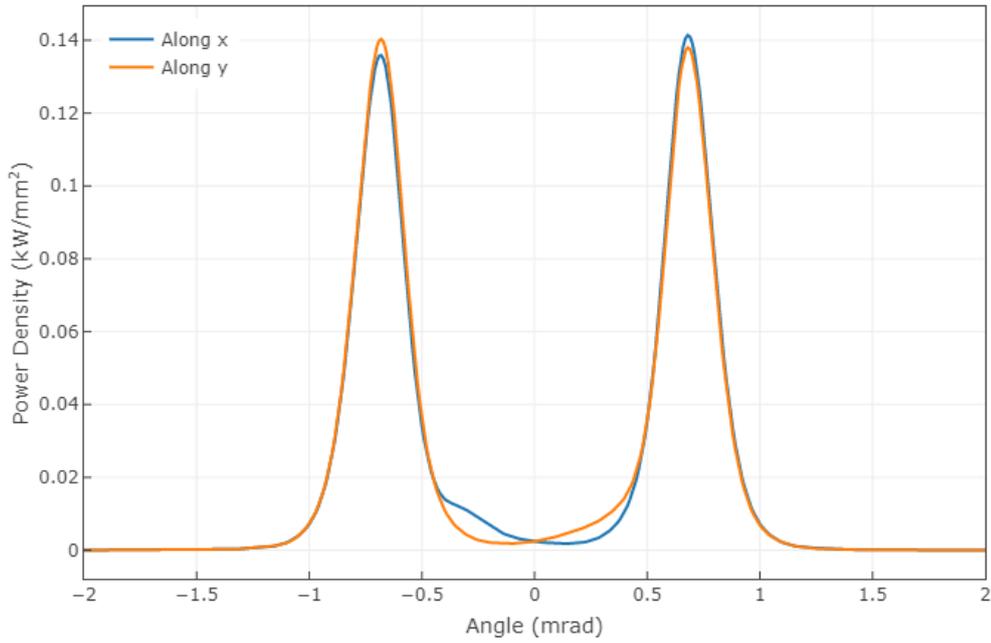


Fonte: Autor.

Para o uso em polarização circular, este é configurado para atuar com campo magnético $B_x = B_y = 0,845 T$. Configurando o ID para essa condição no SPECTRA, são obtidos os ângulos de divergência horizontal e vertical totais de 2,4 mrad cada um, conforme Figura 39.

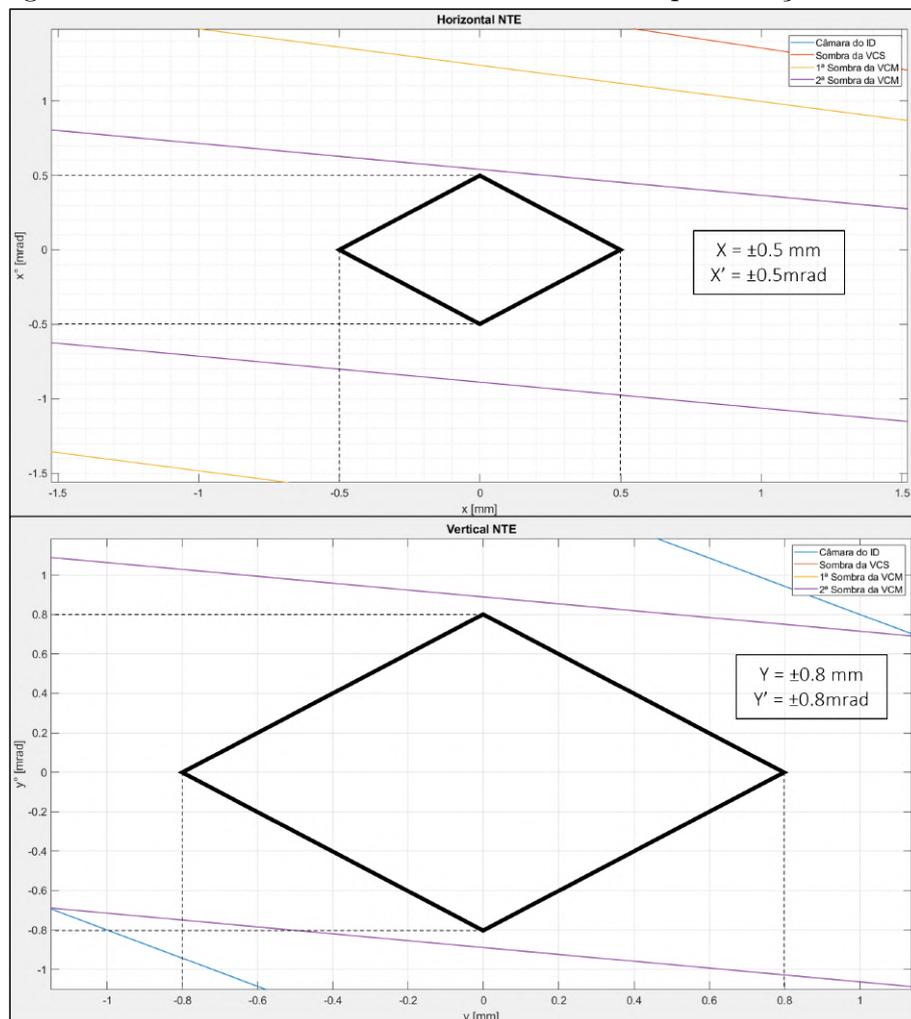
A partir dos ângulos considerados e das aberturas limitantes já conhecidas, foram gerados com a rotina de MATLAB, os mapas de fases horizontal e vertical, com os respectivos NTE's propostos na Figura 40.

Figura 39 – Distribuição de densidade de potência angular para polarização circular.



Fonte: Autor.

Figura 40 – NTE horizontal e vertical iniciais da polarização circular.



Fonte: Autor.

Os limites de posição e ângulo horizontais e verticais obtidos são de $\pm 0,5 \text{ mm}$ $\pm 0,5 \text{ mrad}$ e $\pm 0,8 \text{ mm}$ $\pm 0,8 \text{ mrad}$, respectivamente. O próximo passo do método foi realizado, em que os desvios de ângulo críticos foram simulados no SYNRAD via POWERSHELL, para verificar se há incidência nas aberturas consideradas.

A Tabela 8, apresenta as potências depositadas em cada uma das câmaras do modelo, para os desvios de ângulo críticos dos NTE's propostos.

Tabela 8 – Potência absorvida para desvios limite de ângulo da polarização circular.

Câmara	Potência absorvida (W) em diferentes condições de desvio de feixe de elétrons					
	Feixe Ideal	$x' = -0,5$ $y' = 0,8$	$x' = -0,5$ $y' = -0,8$	$x' = 0,5$ $y' = 0,8$	$x' = 0,5$ $y' = -0,8$	$x' = 0,5$ $y' = 0$
VCS-TR	0	0	0	0	0	0
Válvula+BPM	0	0	0	0,01	0	0
VCM - Cu 1 (1)	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0
VCM - INOX (1)	0	0	0	0	0	0
VCM - Cu 2 (1)	0,08	0,99	0,94	1,19	1,17	0,17
VCB1 - PADRÃO	0,06	1,58	1,48	2,01	1,95	0,17
VCB1 - ABS	1619,3	2650,04	2625,85	3195,07	3172,97	1427,44
VPSC1 - ABS	1130,08	773,56	779,85	190,26	184,56	1910,72

(1) Três diferentes tubos que compõem a VCM: tubo menor de cobre, tubo de Inox da corretora, tubo maior de cobre.

Fonte: Autor

Observa-se incidência desprezível nas câmaras e aberturas consideradas no TR e na VCM, apesar de superiores ao caso do IVU18. Dos resultados obtidos constata-se valores elevados de potência na VCB1, mesmo em limites que seriam casos críticos para a VPSC1, isso ocorre devido a abertura vertical limitante da VCB1 e dispersão vertical da polarização circular.

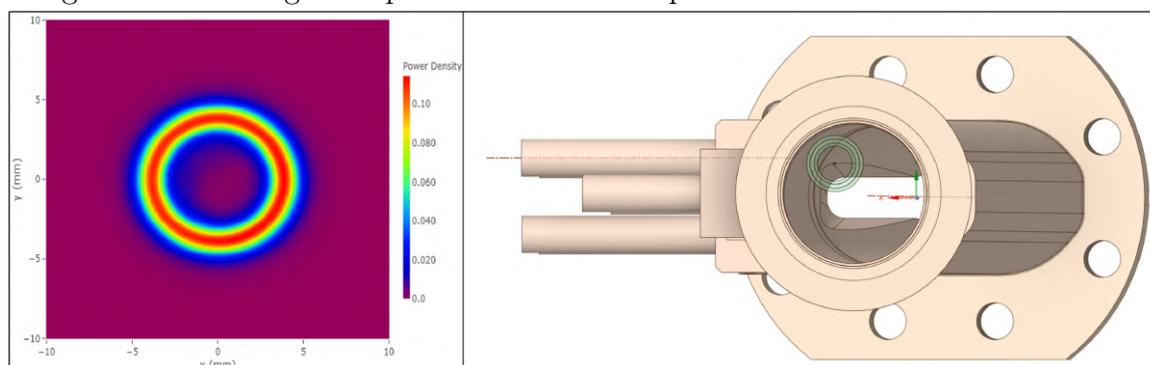
São realizadas as simulações termo-estruturais para os piores casos de cada uma das câmaras. Para a VCB1 é utilizado o desvio de ângulo combinado de $x'=0,5 \text{ mrad}$ e $y'=0,8 \text{ mrad}$, enquanto para a VPSC1 é utilizado o desvio angular isolado de $x'=-0,5 \text{ mrad}$.

Enquanto para a carga térmica da VPSC1, é mantido o método tradicional de importação de arquivos, alterações são necessárias para a VCB1 devido a polarização circular. Para gerar uma região representativa para alocação dos carregamentos da polarização circular na VCB1, são criadas superfícies anelares no início da câmara em um plano rotacionado em relação ao flange, com os desvios angulares apropriados.

As geometrias dessas superfícies foram obtidas a partir de um gráfico gerado via SPECTRA, em que é possível plotar a distribuição de densidade de potências do feixe no

plano XY para uma distância desejada do ponto de observação. A Figura 41 representa o perfil gerado pelo SPECTRA considerando uma distância de 6,6 m, equivalente ao centro da VCB1, e as superfícies anelares criadas no SPACECLAIM respectivamente.

Figura 41 – Perfil gerado pelo SPECTRA e superfícies criadas no SPACECLAIM

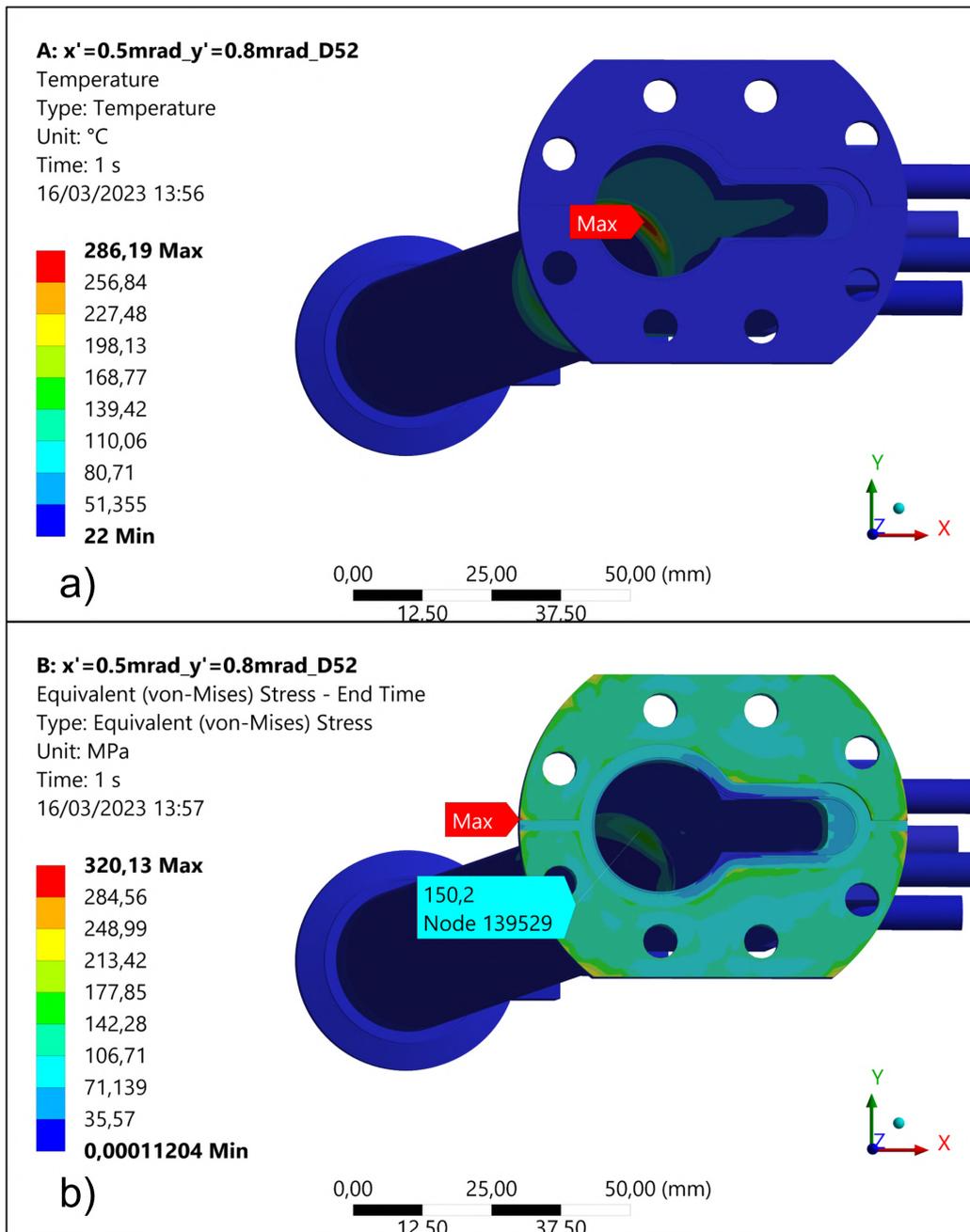


Fonte: Autor.

As superfícies criadas no SPACECLAIM são projetadas nas paredes internas da VCB1, e a potência absorvida pela VCB1 é distribuída entre as regiões projetadas, de forma que os anéis interno, intermediário e externo, recebem $1/4$, $1/2$ e $1/4$ da potência total respectivamente.

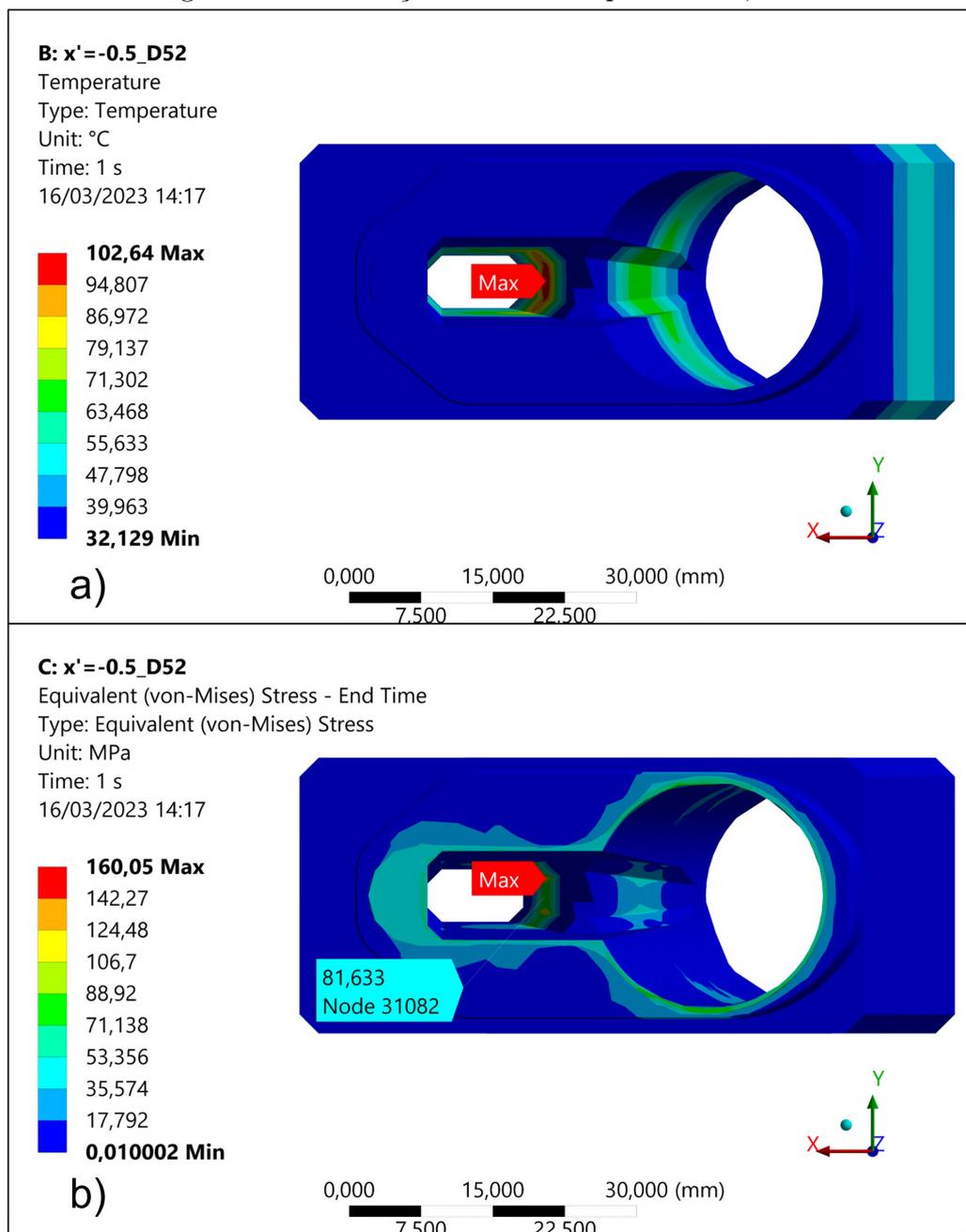
A temperatura máxima e tensão de von Mises equivalente para as simulações da VCB1 e da VPSC1 são apresentadas pelos itens a) e b) da Figura 42 e da Figura 43 respectivamente.

Figura 42 – Simulações da VCB1 para $x'=0,5\text{mrad}$ e $y'=0,8\text{mrad}$.



Fonte: Autor.

Figura 43 – Simulações da VPSC1 para $x' = -0,5 \text{ mrad}$.



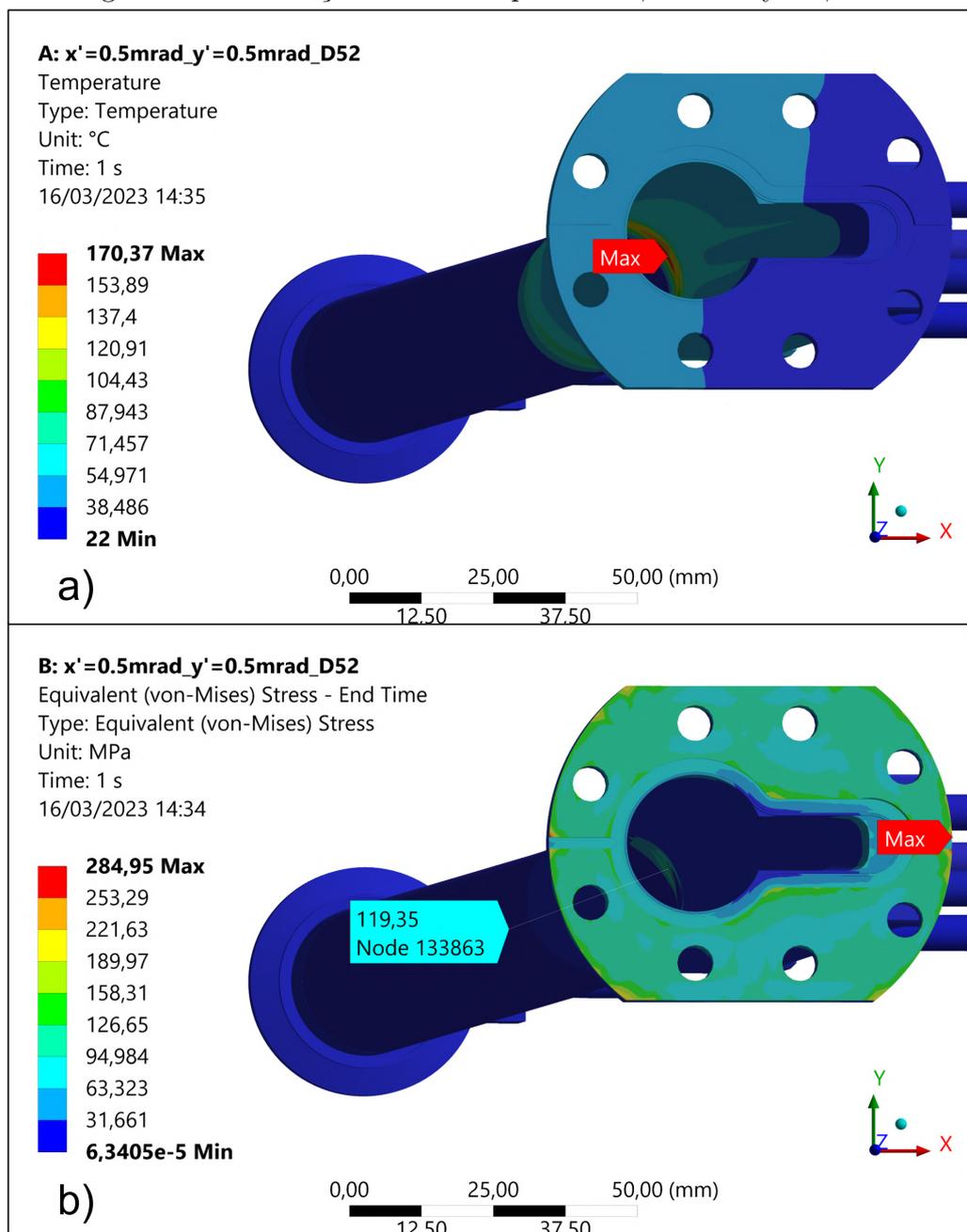
Fonte: Autor.

Para o caso de $x' = 0,5 \text{ mrad}$ e $y' = 0,8 \text{ mrad}$, obteve-se T_{max} de $286,19^\circ\text{C}$ e uma σ_{max}^{VM} de $320,13 \text{ MPa}$, na região de temperatura mais elevada. Enquanto o caso de $x' = -0,5 \text{ mrad}$ resultou em uma T_{max} de $102,64^\circ\text{C}$ e uma σ_{max}^{VM} de $81,63 \text{ MPa}$ fora dos concentradores de tensão.

A partir dos resultados obtidos, nota-se que mesmo com o caso de maior potência absorvida na VPSC1, a mesma está dentro dos critérios limite. Contudo com relação a VCB1, tanto a T_{max} , quanto σ_{max}^{VM} não satisfazem os critérios estabelecidos. Dessa forma é considerada uma redução no NTE vertical, para $\pm 0,5 \text{ mrad}$ e $\pm 0,5 \text{ mm}$ respectivamente.

A condição de $x'=0,5$ mrad e $y'=0,5$ mrad foi simulada no SYNRAD, e obteve-se uma potência absorvida de 2856,77 W na VCB1, com pico de densidade de potência de $20,54 \text{ W/mm}^2$. Considerando a nova projeção, é realizada a simulação termo-estrutural dessa condição de desvio, da qual os resultados de T_{max} e σ_{max}^{VM} são apresentados pelos itens a) e b) da Figura 44.

Figura 44 – Simulações da VCB1 para $x'=0,5$ mrad e $y'=0,5$ mrad.



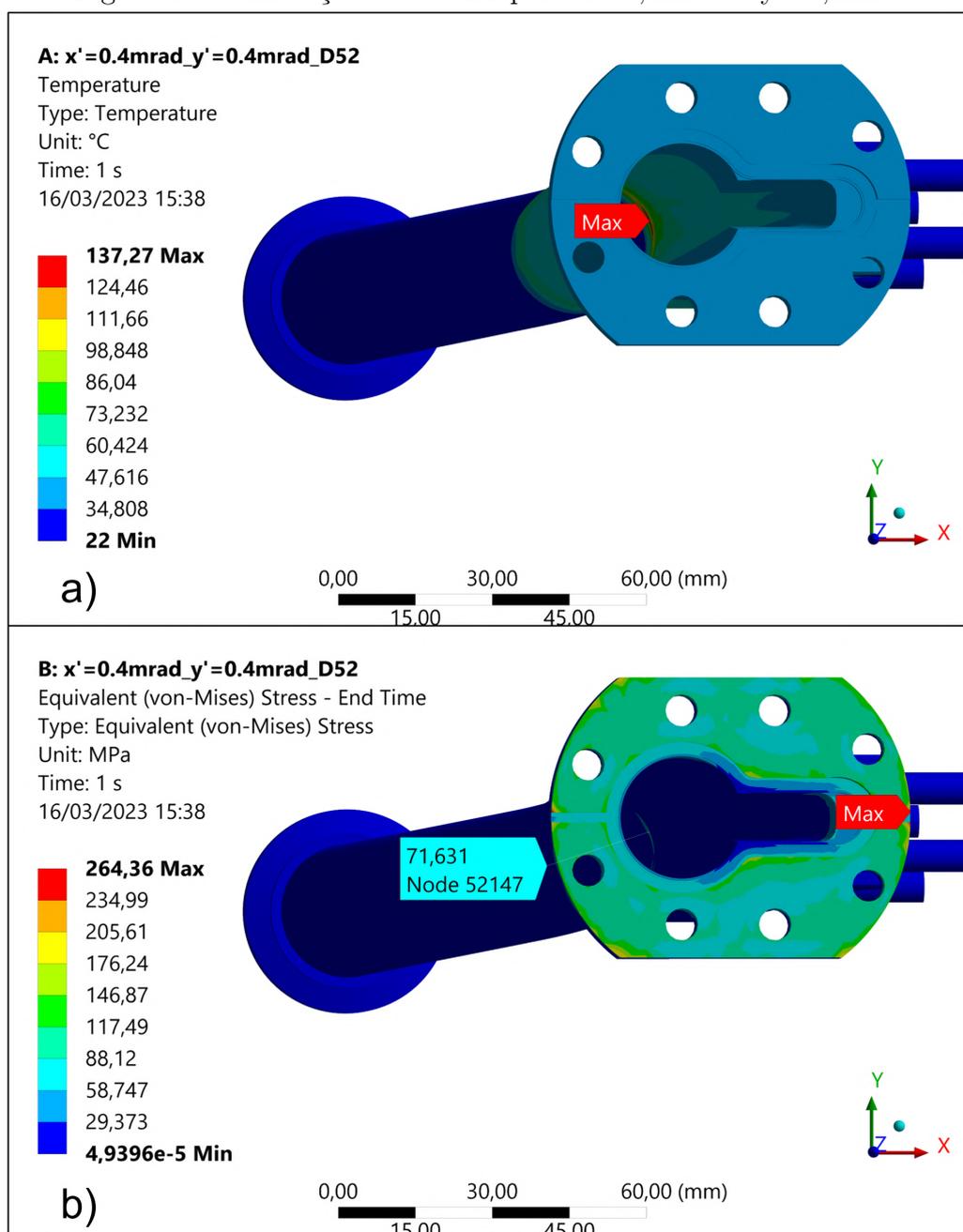
Fonte: Autor.

Das simulações realizadas obteve-se uma T_{max} de $170,37^\circ\text{C}$ na seção transversal padrão da VCB1, e uma σ_{max}^{VM} de 119,35 MPa fora dos concentradores de tensão. Indicando novamente que ambos os parâmetros não satisfazem os critérios estabelecidos. Os NTE

horizontal e vertical são reduzidos para $\pm 0,5 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mrad}$ e $\pm 0,5 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mrad}$, respectivamente.

Uma nova simulação é efetuada considerando desvio angular combinado de $x'=0,4 \text{ mrad}$ e $y'=0,4 \text{ mrad}$, do qual obteve-se uma potência absorvida de $2639,38 \text{ W}$ na VCB1, com pico de densidade de potência de $12,99 \text{ W/mm}^2$. Os carregamentos são inseridos seguindo método descrito. Os resultados de T_{max} e σ_{max}^{VM} são apresentados pelos itens a) e b) da Figura 45.

Figura 45 – Simulações da VCB1 para $x'=0,4\text{mrad}$ e $y'=0,4\text{mrad}$.



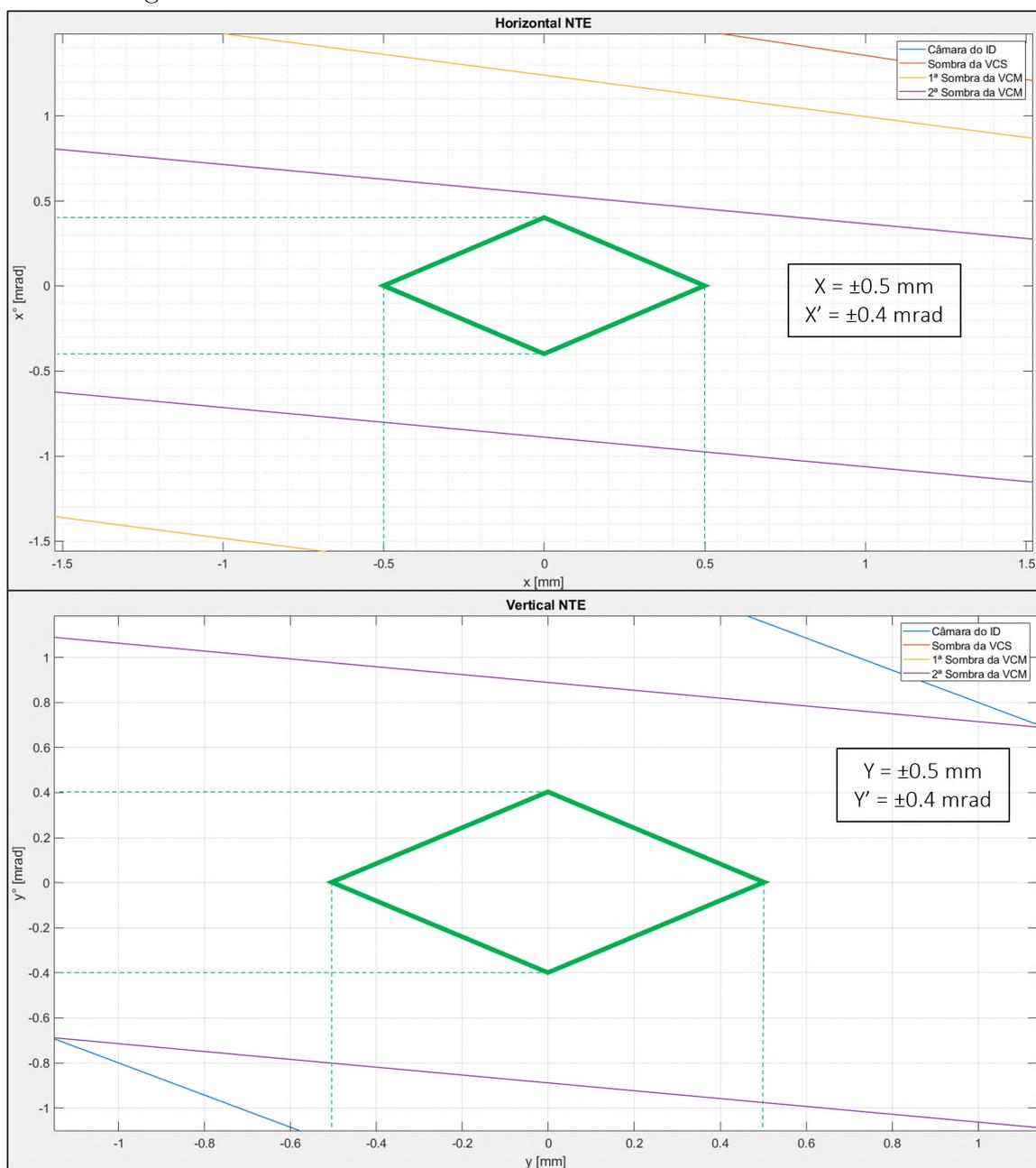
Fonte: Autor.

Dos resultados obtidos, tem-se uma T_{max} de $137,27^\circ\text{C}$ na região mais robusta da

câmara, e uma σ_{max}^{VM} de 71,63 MPa fora dos concentradores de tensão. Apesar da pequena redução na potência absorvida, a mudança na região de incidência e consequentemente densidade de potência, foram suficientes para reduzir significativamente ambos os parâmetros analisados, tornando-os admissíveis para os critérios estabelecidos.

Dessa forma defini-se o AIE horizontal e vertical da polarização circular do Delta52 curto como $\pm 0,5 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mrad}$ e $\pm 0,5 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mrad}$, respectivamente. A Figura 46, apresenta a versão final do AIE do Delta 52 curto com polarização circular, as quais são representadas por mapas de fase com losangos verdes.

Figura 46 – AIE horizontal e vertical definitivos do Delta 52 curto.



Fonte: Autor.

4.3 EFICIÊNCIA DO MÉTODO

Para a aplicação e uso do método propôs-se o teste do mesmo em dois dispositivos de inserção completamente distintos, O EPU Delta 52 curto e o IVU18. A diferença desses IDs, deu-se pelos ângulos de divergência, intensidade do feixe emitido, e pela polarização destes, isto é, as geometrias de feixe de luz de cada um.

O método proposto foi testado inicialmente com o IVU18, naturalmente do primeiro teste houveram contratempos previstos. Dentre os problemas enfrentados, cita-se principalmente, a incapacidade de acessar os resultados de densidade de potência das simulações de ray-tracing realizadas com SYNRADCLI, assim como dificuldades na importação dos carregamentos do SYNRAD para o ANSYS e a interpretação dos mesmos.

Dentre as principais dificuldades citadas, primeiramente a cerca do uso das rotinas automatizadas de SYNRADCLI, estas acabaram por serem utilizadas apenas na iteração inicial do IVU18, visto que a versão mais recente disponibilizada, apesar de ser a mais estável até o momento, apresenta um defeito em que as texturas de densidade de potência são deletadas, em caso de alteração da escala de cores da mesma.

Considerando a necessidade de exportação das densidades de potência para o ANSYS, optou-se por realizar as simulações no SYNRAD+, tornando o processo manual e mais lento. Esse defeito citado foi informado aos desenvolvedores, e os mesmos pretendem solucioná-lo assim que possível. Dessa forma o ganho da automatização do SYNRADCLI não pode ser aproveitado neste trabalho.

Quanto à importação dos carregamentos, as dificuldades encontradas ocorreram devido a dificuldade de configurar corretamente o módulo *external data*, e para interpretar se os valores importados estavam de fato corretos, que decorreu na necessidade de realizar testes simplificados inicialmente.

Devido aos imprevistos mencionados, levou-se cerca de 12 dias de trabalho, para completar o processo completo do método, desde o momento que os parâmetros do ID foram obtidos, solução das dificuldades encontradas, e por fim definição dos limites seguros de posição e ângulo do IVU18 na terceira e última iteração realizada.

Uma vez que os limites do IVU18 foram determinados, iniciou-se em seguida a aplicação do método para o caso da polarização circular do Delta 52 curto. Uma vez que o método como um todo já havia sido testado, e dificuldades envolvidas solucionadas, o processo com o Delta 52 se tornou muito mais ágil, levando apenas três dias de trabalho para a definição do AIE deste.

Além dos problemas não previstos, é notável que o método de aplicação de carga térmica na câmara da VCB1 não é o mais adequado. A necessidade de geometrias representativas e uso de carregamentos por vezes aproximados para cada condição de desvio, torna o processo consideravelmente mais lento, cansativo e menos confiável se comparado à VPSC1.

Com relação à análise de MATLAB, considerando apenas as quatro aberturas

iniciais do trecho, ela se provou confiável, pelo fato de que não há incidência significativa nas aberturas analisadas, contudo ele se mostra ineficiente da forma que é aplicada atualmente, visto que para ambos os dispositivos, foram necessárias três iterações até a definição do AIE de cada um.

Considerando como resultado final da aplicação do método, os limites seguros de posição e ângulo de ambos os dispositivos:

- IVU 18: $x = \pm 0,5 \text{ mm}$, $x' = \pm 0,4 \text{ mrad}$ e $y = \pm 0,5 \text{ mm}$, $y' = \pm 0,2 \text{ mrad}$
- Polarização circular - Delta 52 curto: $x = \pm 0,5 \text{ mm}$, $x' = \pm 0,4 \text{ mrad}$ e $y = \pm 0,5 \text{ mm}$, $y' = \pm 0,4 \text{ mrad}$

Haveria ainda a preocupação de que os limites estabelecidos, em especial de desvio angular do IVU18, poderia ser extremamente limitante tornando sua implementação inviável para a máquina, visto que possivelmente poderia afetar significativamente o tempo disponível de máquina, ao matar o feixe de elétrons continuamente.

Ao levar essa preocupação à Divisão de Aceleradores, foi informado por eles que os desvios de feixe de elétrons raramente ultrapassam a marca de dezenas de μm e μrad . Dessa forma, obteve-se desvios aceitáveis, mesmo realizando simulações considerando coeficientes de segurança elevados, que afetaram as simulações de elementos finitos.

Por fim é digno de nota mencionar que a verificação dos limites de posição de ambos os IDs foi negligenciada neste trabalho, devido ao prazo para finalização do mesmo, dificuldades enfrentadas no uso do SYNRADCLI e na criação dos carregamentos da VCB1. Dessa forma não foram realizadas simulações de ray-tracing e elementos finitos para desvios de posição.

Contudo, é de fácil visualização que os limites de posição definidos são conservadores, visto que estes foram em termos gerais mantidos bem inferiores aos valores indicados pelos NTE das aberturas limitantes, diferente dos desvios de ângulo que possuem maior potencial de danificar as câmaras de vácuo, devido a região e ângulo de incidência destes, que exige maior cuidado para defini-los.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho, foi proposto o desenvolvimento de um método para definição dos limites de desvio de posição e ângulo do feixe de elétrons para o sistema de interlock de órbita do Sirius. Como principais objetivos do método, este deveria ser de fácil utilização, assim como permitir a definição destes limites de forma ágil, visto a importância desses parâmetros em projetos de IDs.

Para verificar a eficiência do método, este foi aplicado para o IVU18 e o EPU Delta 52 curto, em que foram necessários 12 e 3 dias de trabalho para a definição dos limites do AIE de ambos, respectivamente.

Com relação a rotina de BRT no MATLAB, não foram observadas dificuldades ou problemas no uso da mesma, entretanto, nota-se que as aberturas analisadas neste trabalho apontaram para AIE iniciais muito abertos, que foram posteriormente reduzidos iterativamente, devido aos resultados obtidos via simulações de elementos finitos.

No tocante da rotina automatizada de SYNRADCLI via POWERSHELL, esta não foi efetivamente utilizada no trabalho, devido a problemas existentes no *software* por ainda estar em etapa de testes. Devido a isso, as simulações em condições limites foram realizadas no SYNRAD+ manualmente, freando as simulações de ray-tracing e aplicação do método.

Acerca da etapa de análise por elementos finitos, apesar da dificuldade inicial para uso da abordagem de importação de carregamentos, esta se mostrou eficiente e confiável. Contudo, para as simulações da câmara VCB1, a não aplicação desse método tornou as análises de elementos finitos trabalhosas e menos confiáveis.

Conclui-se que, mesmo com as dificuldades e problemas identificados, a aplicação do método permite definir, de forma rápida e prática, limites de posição e ângulo para realizar, enfim, a implementação do sistema de interlock de órbita do anel de armazenamento do Sirius.

Para trabalhos futuro recomenda-se, aperfeiçoamento do método desenvolvido, em que a análise de BRT seja mais assertiva na definição do AIE e as simulações de elementos finitos da VCB1 sejam otimizadas, assim como realizar a análise do efeito da implementação do Interlock de Órbita no tempo disponível de máquina, comparando o tempo disponível antes e após a adição.

REFERÊNCIAS

- CHOI, J.; WILLEKE, F. Active interlock for the nsls-ii damping wiggler. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 681, p. 1–6, 2012. ISSN 0168-9002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900212002367>>. Citado na página 31.
- CNPEM. 2023. Disponível em: <<https://cnpem.br/>>. Citado na página 19.
- CNPEM, L. **Projeto Sirius: a nova fonte de luz síncrotron brasileira**. [S.l.]: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 26.
- FLILLER, R. et al. Re-evaluation of active interlock envelopes considering insertion device correction coils. v. 1, n. 1, 6 2018. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/1504394>>. Citado na página 32.
- KERSEVAN, R.; ADY, M. Recent Developments of Monte-Carlo Codes Molflow+ and Synrad+. In: **Proc. 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC'19), Melbourne, Australia, 19-24 May 2019**. Geneva, Switzerland: JACoW Publishing, 2019. (International Particle Accelerator Conference, 10), p. 1327–1330. ISBN 978-3-95450-208-0. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPMP037>. Disponível em: <<http://jacow.org/ipac2019/papers/tupmp037.pdf>>. Citado na página 41.
- LIGHTSOURCES. 2021. Disponível em: <<https://lightsources.org/lightsources-of-the-world/americas/brazilian-synchrotron-light-laboratory/>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.
- LIU, L.; NEUENSCHWANDER, R. T.; RODRIGUES, A. R. D. Synchrotron radiation sources in brazil. **Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.**, The Royal Society, v. 377, n. 2147, p. 1. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.
- RAMOS, B. et al. Aluminum Vacuum Chamber for the Sirius Commissioning Undulators. In: **12th International Particle Accelerator Conference**. [S.l.: s.n.], 2021. Citado na página 29.
- ROBINSON, A. L. History of synchrotron radiation. **Synchrotron Radiation News**, Taylor, Francis, v. 28, n. 4, p. 4–9, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/08940886.2015.1059228>>. Citado na página 22.
- ROCHA, T. et al. Aluminum Vacuum Chamber for the Sirius DELTA 52 Undulator. In: **12th International Particle Accelerator Conference**. [S.l.: s.n.], 2021. Citado na página 30.
- SELETSKIY, S. et al. Upgrade of NSLS-II Active Interlock System. In: **7th International Particle Accelerator Conference**. [S.l.: s.n.], 2016. p. THPOY023. Citado na página 32.
- SELETSKIY, S.; SHAFTAN, T. Reviewed approach to defining the active interlock envelope for front end ray tracing. v. 1, n. 1, 9 2015. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/1340327>>. Citado na página 30.

SELETSKIY, S.; SHAFTAN, T. Comprehensive Approach to Synchrotron Radiation Protection of NSLS-II. In: **Proc. of International Particle Accelerator Conference (IPAC'16), Busan, Korea, May 8-13, 2016**. Geneva, Switzerland: JACoW, 2016. (International Particle Accelerator Conference, 7), p. 4211–4213. ISBN 978-3-95450-147-2. Doi:10.18429/JACoW-IPAC2016-THPOY047. Disponível em: <<http://jacow.org/ipac2016/papers/thpoy047.pdf>>. Citado 5 vezes nas páginas 31, 32, 34, 35 e 36.

SERAPHIM, R. et al. Vacuum System Design for the Sirius Storage Ring. In: **Proc. 6th International Particle Accelerator Conference (IPAC'15), Richmond, VA, USA, May 3-8, 2015**. Geneva, Switzerland: JACoW, 2015. (International Particle Accelerator Conference, 6), p. 2744–2746. ISBN 978-3-95450-168-7. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2015-WEPMA003>. Disponível em: <<http://jacow.org/ipac2015/papers/wepma003.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

TANAKA, T. Major upgrade of the synchrotron radiation calculation code spectra. **Journal of Synchrotron Radiation**, v. 28, n. 4, p. 1267–1272, 2021. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1107/S1600577521004100>>. Citado na página 47.

TERMOMECANICA. **Barras, Vergalhões e perfis**. 2023. Disponível em: <<https://www.termomecanica.com.br/barras-vergalhoes-e-perfis>>. Citado na página 54.

WIEDEMANN, H. Synchrotron radiation primer. **Stanford Synchrotron Radiation Laboratory, SSRL**, p. 1–1, Oct 1998. Citado na página 22.

ZHANG, L.; BIASCI, J.; PLAN, B. ESRF thermal absorbers: temperature, stress and material criteria. In: **2nd International Workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation**. [S.l.: s.n.], 2002. p. 5–6. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 54.

APÊNDICE A – Rotina MATLAB de back ray-tracing

```
1. % Rotina desenvolvida por Gabriel de Gois Saretti, Grupo de Vácuo - AVM.
2. % Última atualização 06/02/2023 - Contato: gabriel.saretti@cnpem.br
3.
4. %% Rotina para definição do AIE (Active Interlock Envelope), utilizando o método de Back
   Ray-tracing.
5.
6. clc, clear, close all;
7.
8. %% Parametrização inicial da geometria do Setor.
9.
10. SecG = 'BRT3'; %nome do arquivo de Excel sem extensão, em que há planilhas com as
    geometrias para diferentes IDs.
11.
12. temp_geo_file = xlsread(strcat(SecG, '.xls'), 'PAPU', 'B4:F12'); %Função abre o arquivo de
    Excel, e lê as informações do intervalo de células definidos para a planilha.
13. SecG = temp_geo_file;
14.
15. A = 12; %abertura da câmara do ponto de observação em mm (ID geralmente).
16.
17. S0 = SecG(:,1); %cria um vetor com as distâncias de cada abertura em relação ao
    início da câmara do ID.
18. Xe = SecG(:,2); %cria um vetor com a geometria horizontal externa de cada
    abertura limitante.
19. Xi = SecG(:,3); %cria um vetor com a geometria horizontal interna de cada
    abertura limitante.
20. Ys = SecG(:,4); %cria um vetor com a geometria vertical superior de cada abertura
    limitante.
21. Yi = SecG(:,5); %cria um vetor com a geometria vertical inferior de cada abertura
    limitante.
22.
23. S_c = S0 - 0; %Vetor que pode ser utilizado para mudar o ponto de observação, (-
    0) implica no início do ID por padrão.
24.
25. %% Configurações da divergência do feixe de luz síncrotron.
26.
27. div_H = 1.2e-3; %Valor referente a metade do ângulo total de divergência do feixe
    de luz na horizontal em rad.
28.
29. %Valores de divergência horizontal já utilizados:
30.
31. %(0.8e-3: Delta52curto [PolV])(1.2e-3: Delta52curto [PolH]) (1.3e-3: Delta52curto
    [PolC]).
32. %(1.4e-3: Delta52longo [PolH]).
33. %(0.8e-3: IVU [PolH]).
34. %(1.2e-3: PAPU [PolH] - 99.17%).
35.
36. div_V = 0.5e-3; %Valor referente a metade do ângulo total de divergência do feixe
    de luz na vertical em rad.
37.
38. %Valores de divergência vertical já utilizados:
39.
40. %(1.2e-3: Delta52curto [PolV]) (0.5e-3: Delta52curto [PolH]) (1.3e-3: Delta52curto
    [PolC]).
41. %(0.7e-3: Delta52longo [PolH]).
42. %(0.66e-3: IVU [PolH]).
43. %(0.5e-3: PAPU [PolH] - 99.45%).
44.
45. %% variáveis/vetores auxiliares
46.
47. L_geo = length(SecG); %cria variável com o tamanho maximo da matriz de
    geometria.
48.
49. Avec = [-A -A A A -A]; %cria vetor que possibilita os plots dos envelopes de
    interlock. o 5º ponto serve para 'fechar o diamante'.
50.
51. i = 1; %cria um contador para o while
52.
53. %% Cálculos dos valores do NTE horizontal.
54.
```

```

55. % Vetores de zeros são criados para definir os 4 pontos do envelope, seus
56. % valores são posteriormente substituídos durante o while que realiza os
57. % cálculos.
58.
59. X1abs = zeros(L_geo,1);
60. X1ord = zeros(L_geo,1);
61.
62. X2abs = zeros(L_geo,1);
63. X2ord = zeros(L_geo,1);
64.
65. while i <=L_geo
66.     %ordXe(i,1) = atan(SecG(i,2)/SecG(i,1))*1000;           %Cria um vetor de ângulos de
        abertura horizontal em relação a parede externa
67.     X1abs(i,1) = 1000*((A-Xi(i))/S_c(i) + div_H);
68.     X1ord(i,1) = 1000*((A+Xe(i))/S_c(i) - div_H);
69.
70.     %ordXi(i,1) = atan(-(SecG(i,3)/SecG(i,1)))*1000;       %Cria um vetor de ângulos de
        abertura horizontal em relação a parede interna
71.     X2abs(i,1) = 1000*((Xe(i)-A)/S_c(i) - div_H);
72.     X2ord(i,1) = 1000*(-(A+Xi(i))/S_c(i)+ div_H);
73.     i = i + 1;
74. end
75. i = 1;               %reinicia o contador do while
76.
77. %% Cálculos dos valores do NTE vertical.
78.
79. % Vetores de zeros são criados para definir os 4 pontos do envelope, seus
80. % valores são posteriormente substituídos durante o while que realiza os
81. % cálculos.
82.
83. Y1abs = zeros(L_geo,1);
84. Y1ord = zeros(L_geo,1);
85.
86. Y2abs = zeros(L_geo,1);
87. Y2ord = zeros(L_geo,1);
88.
89. while i <= L_geo
90.     %ordYs(i,1) = atan(SecG(i,4)/SecG(i,1))*1000;           %Cria um vetor de ângulos de
        abertura vertical em relação a parede externa
91.     Y1abs(i,1) = 1000*((A-Yi(i))/S_c(i) + div_V);
92.     Y1ord(i,1) = 1000*((A+Ys(i))/S_c(i) - div_V);
93.
94.     %ordYi(i,1) = atan(-(SecG(i,5)/SecG(i,1)))*1000;       %Cria um vetor de ângulos de
        abertura vertical em relação a parede interna
95.     Y2abs(i,1) = 1000*((Ys(i)-A)/S_c(i) - div_V);
96.     Y2ord(i,1) = 1000*(-(A+Yi(i))/S_c(i)+ div_V);
97.     i = i + 1;
98. end
99.
100. i = 1;              %reinicia o contador do while
101.
102. %% NTE HORIZONTAL
103.
104. %função while é utilizada para realizar a sobreposição dos envelopes
105. %seguros de cada abertura.
106.
107. while i<= 4          %Número de aberturas consideradas para a análise.
108.     yi = [X1abs(i) X1ord(i) X2abs(i) X2ord(i) X1abs(i)];
109.
110.     figure(1)
111.     plot(Avec,yi,'linewidth',1.2)
112.     hold on
113.
114.     i = i+1;
115. end
116. title('Horizontal NTE')
117. xlabel('x [mm]')
118. ylabel('x° [mrad]')
119. legend('Câmara do ID', 'Sombra da VCS', '1ª Sombra da VCM', '2ª Sombra da VCM') %,'Saída da
        VCB1', 'Saída da VPSC1') %,'Saída da Máscara do FE', 'Saída do 1º PhotonShutter', 'Saída do
        2º PhotonShutter')
120. xlim([-1.2 1.2])
121. ylim([-1 0.7])
122. set(gca, 'fontsize', 14)

```

```

123.grid minor
124.hold off
125.i = 1;
126.
127.%% NTE VERTICAL
128.
129.%função while é utilizada para realizar a sobreposição dos envelopes
130.%seguros de cada abertura.
131.
132.while i<= 4           %Número de aberturas consideradas para a análise.
133.    yi = [Y1abs(i) Y1ord(i) Y2abs(i) Y2ord(i) Y1abs(i)];
134.
135.    figure(2)
136.    plot(Avec,yi,'linewidth',1.2)
137.    hold on
138.
139.    i = i+1;
140.
141.end
142.title('Vertical NTE')
143.xlabel('y [mm]')
144.ylabel('y° [mrad]')
145.legend('Câmara do ID','Sombra da VCS','1ª Sombra da VCM','2ª Sombra da VCM') %,'Saída da
VCB1','Saída da VPSC1') %,'Saída da Máscara do FE','Saída do 1º PhotonShutter','Saída do
2º PhotonShutter')
146.%xlim([-2 2])
147.%ylim([-1 1])
148.set(gca,'fontsize',14)
149.grid on
150.hold off

```

APÊNDICE B – Rotina POWERSHELL de setup do SYNRADCLI

```
1. #This Script is a friendly menu, used to run Position or Angle Beam position sweep
   simulations for different ID polarizations in SynRadCLI
2. #In order to do this, it calls another script as function.
3. #This script was developed by Gabriel Saretti - Vacuum Group (VAC) - CNPEM - 07/07/2022
4. #Last updated: 01/02/2023 - IVU ID testing and Synrad version update.
5.
6. clear
7.
8. # 1. Polarization Entry
9.
10. $Pol = Read-Host("Choose the Polarization for the simulation, 'H' for Horizontal, 'V' for
    vertical and 'C' for circular") #reads the user input for the choosen type of
    polarization to be run.
11. while ( $Pol -notin "H", "V", "C"){
12. Write-Host "`n"
13.
14. $Pol = Read-Host("Input must be H, V or C, for horizontal, vertical or circular
    Polarization, respectively")
15. }
16.
17. if ($Pol -eq "c"){
18. Write-Host "Circular Polarization Chosen" #select Circular polarization input
    file
19. }
20. Elseif ($Pol -eq "v"){
21. Write-Host "Vertical Polarization Chosen" #select Vertical polarization input
    file
22. }
23. Else {
24. Write-Host "Horizontal Polarization Chosen" #select Horizontal polarization
    input file
25. }
26.
27. # 2. Settings of the directories paths and file names
28.
29. $resPath = "C:\synrad_win_1.5.5_beta\SweepResults\" #Variable for
    the Results folder directory.
30. $binPath = "C:\synrad_win_1.5.5_beta\" #Variable for
    the Bin folder directory.
31. $inPath = "C:\synrad_win_1.5.5_beta\SweepInputs\" #Variable for
    the Input file folder directory.
32. $tempPath = "C:\synrad_win_1.5.5_beta\Temp\" #Variable for
    the Temporary folder directory.
33.
34. # 2.1. Input and parameter files names depending of the polarization chosen
35.
36. if ($Pol -eq "h"){
37. $inName = "IVU18_2200_PolH" #Variable for
    the Input file name w/o extension.
38. $paramFile = "IVU_mag_PolH.param" #Variable for the
    .Param file to be modified in the loop.
39. }
40. Elseif ($Pol -eq "v"){
41. $inName = "SCW_1200_PolH" #Variable for the
    Input file name w/o extension.
42. $paramFile = "WSC-3GeV-100mA_1T_V1.5.5.param" #Variable for
    the .Param file to be modified in the loop.
43. }
44. Else {
45. $inName = "D52-3200_PolC" #Variable for the
    Input file name w/o extension.
46. $paramFile = "Delta52_3200-PolCMag.param" #Variable for the
    .Param file to be modified in the loop.
47. }
48.
49. # 3. Beam undesired misteering correction variables setup for different polarization
    conditions, if it has.
50.
51. if ($Pol -eq "h"){
52. $corTheta = 7.036354514e-6 #Variable for
    beam misteering in XZ plane (Horizontal pol.)
```

```

53. $corAlfa = 0 #Variable for
    beam misteering in YZ plane (Horizontal pol.)
54. }
55. Elseif ($Pol -eq "v"){
56. $corTheta = 9.53461778136281E-04 #Variable for
    beam misteering in XZ plane (Vertical pol.)
57. $corAlfa = -0 #Variable for
    beam misteering in YZ plane (Vertical pol.)
58. }
59. Else {
60. $corTheta = 0 #Variable for
    beam misteering in XZ plane (Circular pol.)
61. $corAlfa = -0 #Variable for
    beam misteering in YZ plane (Circular pol.)
62. }
63.
64. Start-Sleep 2
65.
66. # 4. Calls the Main script.
67.
68. invoke-expression -Command $PSScriptRoot\BeamPosition Sweep_Synrad1.5.5.ps1 #open
    the coupled script as a function
69.
70.
71. ## Delta52 Missterring corrections
72.
73. #PolH: $corTheta = 1.114173724e-5
74. #PolV: $corAlfa = -0.0009932351354
75. #PolC: $corTheta = 8.197273557e-06 || $corAlfa = -0.0007300380946
76.
77. ## IVU18 Missterring corrections
78.
79. #PolH: $corTheta = 7.036354514e-6
80.
81. ## SCW Missterring corrections
82.
83. #PolH $corTheta = 9.53461778136281E-04

```

APÊNDICE C – Rotina POWERSHELL de loop do SYNRADCLI

```
1. #This script reads the user inputs for electron beam position, and run Synrad Simulation
   'X' times, for each beam position defined by the user.
2. #This script was developed by Gabriel Saretti - Vacuum Group (VAC) - CNPEM - 21/09/2022
3. #Last updated: 31/01/2023 - IVU ID testing and Synrad version update.
4.
5. clear #clear command window
6.
7. # Install-Module -Name 7Zip4Powershell -RequiredVersion 2.0.0 #Intall the 7zip compress
   and extract library, 1 use required.
8.
9. # _____#
   _____#
10.
11. # 1. User Inputs
12.
13. # 1.1 Beam Position variables
14.
15. [float]$X0 = Read-Host("Insert the first X axis Beam Start Position in cm")
   #X Beam Start Position of the 1st run.
16. [float]$X = Read-Host("Insert the last X axis Beam Start Position in cm")
   #X Beam Start Position of the last run.
17. [float]$dX = Read-Host("Insert the X axis Beam Start Position step in cm, that is greater
   than 0") #X Beam Start Position step beetwen runs.
18.
19. while ($dX -le 0){
   #While used to accept only a positive step entry
20. [float]$dX = Read-Host("Please insert a step greater than 0")
21. }
22.
23. Write-Host "`n"
24.
25. [float]$Y0 = Read-Host("Insert the first Y axis Beam Start Position in cm")
   #Y Beam Start Position of the 1st run.
26. [float]$Y = Read-Host("Insert the last Y axis Beam Start Position in cm")
   #Y Beam Start Position of the last run.
27. [float]$dY = Read-Host("Insert the Y axis Beam Start Position step in cm, that is greater
   than 0") #Y Beam Start Position step beetwen runs.
28.
29. while ($dY -le 0){
   #While used to accept only a positive step entry
30. [float]$dY = Read-Host("Please insert a step greater than 0")
31. }
32.
33. Write-Host "`n"
34.
35. [float]$Theta0 = Read-Host("Insert the first X' in mrad")
36. [float]$Theta = Read-Host("Insert the last X' in mrad")
37. [float]$dTheta = Read-Host("Insert the X' step in mrad, that is greater than 0")
38.
39. while ($dTheta -le 0){
   #While used to only accept positive step entries
40. [float]$dTheta = Read-Host("Please insert a step greater than 0")
41. }
42.
43. Write-Host "`n"
44.
45. [float]$Alfa0 = Read-Host("Insert the first Y' in mrad")
46. [float]$Alfa = Read-Host("Insert the last Y' in mrad")
47. [float]$dAlfa = Read-Host("Insert the Y' step in mrad, that is greater than 0")
48.
49. while ($dAlfa -le 0){
   #While used to only accept positive step entries
50. [float]$dAlfa = Read-Host("Please insert a step greater than 0")
51. }
52.
53. Write-Host "`n"
54.
55. # 1.2 Synrad Simulation variables
56.
```

```

57. #runT = Read-Host("Insert simulation total running time (in seconds)")
    #Simulation total running time.
58. $dispt = Read-Host("Insert time between two samples display (in seconds)")
    #Time step of simulation sample display.
59. $desl = Read-Host("Insert the desorption limit to finish the simulation (example: 300Mdes
    = 3e8)") #Dessorption limit for the simulation.
60.
61. # _____#
62.
63. # 2 Functions and Conversions
64.
65. # 2.1 Extract and Compact functions
66.
67. function extract7zInput{          #Input
68. Expand-7Zip -ArchiveFileName $synFP -TargetPath $tempPath #-Verbose
    #Verbose function is used if the user wants to see the detailed process
69. }
70.
71. function compact7zInput{          #Input
72. Compress 7Zip -Path $tempPath OutputPath $inPath -ArchiveFileName $syn7zFile #-Verbose
    #Verbose function is used if the user wants to see the detailed process
73. }
74.
75. function compact7zResult{          #Result
76. Compress 7Zip -Path $tempPath OutputPath $resPath -ArchiveFileName $resultFile
77. }
78.
79. # 2.2 Unit conversions, mrad to rad
80.
81. $Theta0 = $Theta0/1000.0
82. $Theta = $Theta/1000.0
83. $dTheta = $dTheta/1000.0
84.
85. $Alfa0 = $Alfa0/1000
86. $Alfa = $Alfa/1000
87. $dAlfa = $dAlfa/1000
88.
89. #-----#
90.
91. # 3. Input file name and directory creation using Main Script entries.
92.
93. $GeometryFile = "Geometry.syn"          #Variable for the
    Input file w/ extension syn.
94. $syn7zFile = $inName + ".syn7z"        #Variable for the
    Input file w/ extension syn7z.
95. $synFP = Join-Path $inPath $syn7zFile  #Variable for the
    Input file directory.
96.
97. #-----#
98.
99. # 4. Additional parameters
100.
101. # 4.1 Sweep Variables
102.
103. $Xa = [math]::Round($X0,3)             #Variable created
    for Xpos. sweep.
104. $Ya = [math]::Round($Y0,3)             #Variable created
    for Ypos. sweep.
105.
106. $Theta_a = [math]::Round($($Theta0),5) #Variable created
    for Xpos. sweep.
107. $Alfa_a = [math]::Round($($Alfa0),5)   #Variable created
    for Ypos. sweep.
108.
109. #4.2 Float error correction for while loop conditions
110.
111. $Err_X = $X*1e-3
112. $Err_Y = $Y*1e-3
113.
114. $Err_Theta = $Theta*1e-3
115. $Err_Alfa = $Alfa*1e-3

```

```

116.
117.# 4.3 User useful informations
118.
119.$cRuns = 1
                                                    #Variable used to display
    the simulations finished.
120.$cTotal = [math]::Round(((Y - $Ya)/$dY +1)*((X - $Xa)/$dX +1)*((Alfa - $Alfa_a)/$dAlfa
+1)*((Theta - $Theta_a)/$dTheta +1))
                                                    #Variable used to display
    Total simulations to be run.
121.$cRemains = [math]::Round($cTotal - $cRuns)
                                                    #Variable used to display
    simulations remaining.
122.
123.#-----#
-----#
124.
125.Set-Location $binPath
    folder to the Bin directory, necessary to run the SynradCLI.
                                                    #Set the bin
126.
127.#-----#
-----#
128.
129.# 5. Parameter Sweep and Start simulation process.
130.
131.while (($Ya - $Y) -le $Err_Y){
    for Y sweep
                                                    #Loop
132.
133.while (($Xa - $X) -le $Err_X){
    for X sweep
                                                    #Loop
134.
135.while (($Alfa_a - $Alfa) -le $Err_Alfa){
    for Y' sweep
                                                    #Loop
136.
137.while (($Theta_a - $Theta) -le $Err_Theta){
    for X' sweep
                                                    #Loop
138.
139.Get-ChildItem -Path $tempPath -Include * -File -Recurse | foreach {$_.Delete()}
    #Exclude the files at the temporary path.
140.
141.Start-Sleep 2
142.
143.extract7zInput #Extract Function
144.
145.Write-Host "Updated Beam start Position - X=$xa cm - Y=$ya cm - X'=$(Theta_a*1000) mrad -
Y'=$(Alfa_a*1000) mrad"
    #Indicate to the user which Beam position parameters
    is running at the moment.
146.
147.Write-Host "`n"
148.
149.Start-Sleep 2
150.
151.# 5.1.1 Modify the .param file with the new Beam Start Position
152.
153.$param = (Get-Content $tempPath$paramFile) -split " "
154.
155.[float]$L1 = $param[4]
    #.param file line referent to the Beam
    start position for Z axis.
156.# [float]$L2 = $param[14]
    #.param file line referent to the Beam
    end position for Z axis. Version 1.5.0
157.[float]$L2 = $param[16]
    #.param file line referent to the Beam
    end position for Z axis. Version 1.5.5
158.
159.$hx = $Xa - [math]::Tan($Theta_a)*((L2-$L1)/2)
    #calculate the beam start position
    correction in the X axis
160.$hy = $Ya - [math]::Tan($Alfa_a)*((L2-$L1)/2)
    #calculate the beam start position
    correction in the Y axis
161.
162.$param[6] = $Theta_a - $corTheta
    #.param file line referent to the Beam
    angle at the start position for XZ plane.
163.$param[7] = $Alfa_a - $corAlfa
    #.param file line referent to the Beam
    angle at the start position for YZ plane.
164.
165.$param[2] = $hx
    #.param file line referent to the Beam
    start position for X axis.

```

```

166.$param[3] = $hy #.param file line referent to the Beam
    start position for Y axis.
167.
168.$param | Set-Content $tempPath$paramFile -Force
169.
170.Start-Sleep 2
171.
172.compact7zInput #Compress Function
173.
174.#$resultFile = "results_" + "$($inName)" + "_X=" + "$($Xa)" + "_Y=" + "$($Ya)" + "_X'=" +
    "$($Theta_a*1000)" + "_Y'=" + "$($Alfa_a*1000)" + ".syn7z" #Generate the Results file name
    for each run.
175.
176.$resultFile =
    "results_{$($inName)_X={$($xa)_Y={$($ya)_X'={$($Theta_a*1000)_Y'={$($Alfa_a*1000)}.syn7z"
    #Generate the Results file name for each run.
177.
178.# 5.1.2 Define arguments for simulation
179.
180.Write-Host "Creating {$($resultFile)"
181.$ALLArgs = @("-f", "{$($synFP)", "--outputPath", "{$($tempPath)", "-o", "{$($GeometryFile)",
    "-s", "{$($dispT)", "-d", "{$($desL)", "--verbose", "--reset") #Verbose & #writeFacetDetails
    could be added
182.
183.# 5.1.3 Set the updated arguments and run.
184.
185.#Write-Host "{$($binPath)\synradCLI.exe" $AllArgs
186.
187.& "{$($binPath)\synradCLI.exe" $AllArgs
188."Finished run N° $cRuns - $cRuns/$cTotal Completed - $cRemains Remaining " #Display
    information about the progress of the simulations.
189.
190.Write-Host "`n"
191.
192.compact7zResult
193.
194.# 5.1.4 Update the X'-Sweep an Count variables
195.
196.$Theta_a = [math]::Round($Theta_a + $dTheta,5) #Update the X' for the next run
197.$cRuns = [math]::Round($cRuns + 1) #Update the N° of runs completed
198.$cRemains = [math]::Round($cTotal - $cRuns) #Update the N° of runs remaining
199.
200.Start-Sleep 3
201.}
202.
203.# 5.2 Update the Y'-Sweep and Reset the X'-Sweep for the next batch
204.
205.$Theta_a = [math]::Round($Theta0,5) #After a X-sweep batch of runs,
    resets the X-sweep variable for a new batch.
206.$Alfa_a = [math]::Round($Alfa_a + $dAlfa,5) #After a X-sweep batch of runs,
    updates the Y-sweep variable for a new batch.
207.
208.Start-Sleep 3
209.}
210.
211.# 5.3 Update the X-Sweep and Reset the Angle-Sweep for the next batch
212.
213.$Theta_a = [math]::Round($Theta0,5) #After a X-sweep batch of runs,
    resets the X'-sweep variable for a new batch.
214.$Alfa_a = [math]::Round($Alfa0,5) #After a X-sweep batch of runs,
    resets the Y'-sweep variable for a new batch.
215.$Xa = [math]::Round($Xa + $dX,3) #After a X-sweep batch of runs,
    update the X-sweep variable for a new batch.
216.
217.Start-Sleep 2
218.}
219.
220.# 5.4 Update the Y-Sweep and Reset the X-Sweep and the Angle-Sweep for the next batch
221.
222.$Theta_a = [math]::Round($Theta0,5) #After a X-sweep batch of runs,
    resets the X'-sweep variable for a new batch.
223.$Alfa_a = [math]::Round($Alfa0,5) #After a X-sweep batch of runs,
    resets the Y'-sweep variable for a new batch.

```

```
224.$Xa = [math]::Round($x0,3)           #After a X-sweep batch of runs,
      update the X-sweep variable for a new batch.
225.$Ya = [math]::Round($Ya + $dY,3)    #After a X-sweep batch of runs,
      update the Y-sweep variable for a new batch.
226.
227.Start-Sleep 2
228.
229.}
230.
231.Write-Host "All simulations were done"
```