

MARCELA GOMES D'AMATO

ANÁLISE DE EXPOSIÇÃO DE FUNCIONÁRIOS A RADIAÇÃO IONIZANTE NA
METALURGIA DO ESTANHO

São Paulo

2022

MARCELA GOMES D'AMATO

Versão Original

ANÁLISE DE EXPOSIÇÃO DE FUNCIONÁRIOS A RADIAÇÃO IONIZANTE NA
METALURGIA DO ESTANHO

Monografia apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Especialista em
Engenharia de Segurança do Trabalho

São Paulo

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo o apoio e por todas as oportunidades proporcionadas que me ajudaram a chegar até aqui, aos meus colegas da turma, a equipe do LACASEMIN - Laboratório de Controle Ambiental, Higiene e Segurança na Mineração, e aos meus companheiros de equipe da empresa que atuo hoje os quais me deram toda contribuição necessária para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

A radiação ionizante é exemplo de um dos agentes físicos dos quais os trabalhadores podem estar expostos em atividades industriais com consequências nocivas à saúde. Pelo do Decreto-Lei nº 5.452 de 1 de maio de 1943 e criação da Consolidação das Leis do Trabalho (CLT), onde estão especificados os direitos e deveres de grande parte dos trabalhadores brasileiros, entende-se que, no Brasil, é dever dos empregadores promover, prevenir e preservar a integridade física do trabalhador durante a realização da sua função. Nesse sentido, o trabalho tem como objetivo, de acordo com a legislação vigente e normas dos órgãos reguladores, avaliar a exposição de funcionários a radiação ionizante proveniente da matéria-prima utilizada no processo de metalurgia do estanho refinado, que contém elementos radioativos naturais (como urânio e tório) em sua composição, pela utilização de dosímetros individuais, definir as áreas da produção onde ocorre o maior nível de exposição e sugerir melhorias para redução de impactos aos trabalhadores associados a exposição ocupacional.

Palavras-chave: agentes físicos; radiação ionizante; radiação natural; exposição ocupacional; proteção radiológica;

ABSTRACT

Ionizing radiation is an example of one of the physical agents from which workers may be exposed in industrial activities with harmful health consequences. By Decree-Law N° 5.452 of May 1, 1943 and creation of the Consolidation of Labor Laws (CLT), where the rights and duties of most Brazilian workers are specified, it is understood that, in Brazil, it is the duty of employers to promote, prevent and preserve the physical integrity of the worker during the performance of their function. In this sense, the course conclusion paper aims, according to current legislation and regulatory standards, to evaluate the exposure of employees to ionizing radiation from the raw material used in the process of refined tin metallurgy, which contains natural radioactive elements (such as uranium and thorium) in its composition, by the use of individual dosimeters, to define the areas of production where the highest level of exposure occurs and suggest improvements to reduce impacts to the workers associated with occupational exposure.

Keywords: physical agents; ionizing radiation; natural radiation; occupational exposure; radiological protection;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Séries radioativas naturais	14
Figura 2: Limites de Dose Anuais.....	15
Figura 3: Concentração de radionuclídeos nos materiais	20
Figura 4: Fluxograma Processos.....	21
Figura 5: Dosímetros OSLD	22
Figura 6: Número de funcionários Próprios 2021	27

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Doses mensais 2021 (mSv)	27
Gráfico 2: Doses mensais - Administrativo (mSv)	28
Gráfico 3: Doses mensais - Jigagem (mSv)	28
Gráfico 4: Doses mensais - Manutenção (mSv)	29
Gráfico 5: Doses mensais - Redução e Refino (mSv)	29
Gráfico 6: Doses mensais - Sinterização (mSv)	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ca	Cálcio
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DNA	Ácido desoxirribonucleico
F	Flúor
FeSn	Ferro-estanho
Gy	Gray
IOE	Indivíduo ocupacionalmente exposto
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
J	Joules
LED	Diodos emissores de luz
mSv	Milisievert
MTE	Ministério do Trabalho e Previdência
Na	Sódio
Nb	Nióbio
O	Oxigênio
OSL	Luminescência Opticamente Estimulada
OSLD	Dosimetria por Luminescência Oticamente Estimulada
PMT	Fotomultiplicadora
PPR	Plano de Proteção Radiológica
SERAD	Setor de Radioproteção ou Proteção Radiológica
Ta	Tântalo
Th	Tório
U	Urânio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVO	11
1.2 JUSTIFICATIVA	11
2 REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1. RADIAÇÕES	12
2.2. RADIAÇÃO IONIZANTE E SEUS EFEITOS BIOLÓGICOS	12
2.3. RADIAÇÃO NATURAL	13
2.4. NORMAS RELACIONADAS	14
2.4.1. NBR ABNT NR 15 e CNEN - NN-3.01: "Diretrizes Básicas de Radioproteção"	14
2.4.2. POSIÇÃO REGULATÓRIA CNEN - 3.01 / 004:2011 – “Restrição de dose, níveis de referência ocupacionais e classificação de áreas”	16
2.4.3. CNEN-NN-5.01: “Transporte de Materiais Radioativos”	17
2.4.4. NBR ABNT NR 16 e Portaria MTE nº 518 de 04/04/2003	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	18
3.1.1. Instalação e processo produtivo	18
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS	22
3.3. MÉTODOS	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1. RESULTADOS	27
4.2. DISCUSSÃO	30
4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
5 CONCLUSÕES	33
REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

As atividades realizadas em ambientes industriais, expõe os trabalhadores a diversos agentes que podem causar danos à saúde. As origens desses agentes podem ser físicas, químicas ou biológicas, sendo exemplos de agentes físicos ocupacionais os ruídos, as vibrações, as pressões anormais, as temperaturas extremas (calor ou frio), a umidade, as radiações ionizantes e não ionizantes, bem como o infrassom e ultrassom.

As radiações ionizantes, classificadas como alfa, beta ou gama, de acordo com as características da emissão, são radiações que possuem energia necessária para romper ligações entre os elétrons de uma molécula modificando-a.

Fontes naturais da radiação ionizante são os raios cósmicos e os radionuclídeos provenientes da crosta terrestre, encontrados em locais como no solo, nas rochas, nos materiais de construção, na água potável e no próprio corpo humano (INCA, 2021). Existem três famílias ou séries de elementos radioativos naturais, e elas variam de acordo com a sua sequência de decaimento (processo de estabilização). São elas: série do urânio, série do actínio e a série do tório.

A empresa estudada produz estanho através do processamento de concentrados de cassiterita, por processos de separação hidrogravimétrico e eletromagnético.

Os funcionários da empresa estão expostos a radiação ionizante proveniente dos elementos radioativos, como o urânio e tório, presentes nos concentrados de cassiterita durante todo o processo de produção do estanho refinado.

Entende-se como saúde do trabalho ou saúde ocupacional a promoção, prevenção e preservação da integridade física do trabalhador durante a realização da sua função, detectando fatores que possam interferir na sua saúde

No Brasil, é de responsabilidade dos empregadores, através da engenharia de segurança e da higiene ocupacional, avaliar, controlar e monitorar as exposições a estes agentes, de maneira que os trabalhos em ambientes agressivos possam ser realizados sem que a saúde dos colaboradores envolvidos seja prejudicada (USP, 2016 apud Francisca, 2019).

1.1 OBJETIVO

O trabalho tem como objetivo avaliar a exposição de funcionários a radiação ionizante proveniente da matéria-prima utilizada no processo de metalurgia do estanho, definir as áreas da produção onde ocorre o maior nível de exposição e sugerir melhorias para redução de impactos aos trabalhadores associados a exposição ocupacional.

1.2 JUSTIFICATIVA

A motivação para a elaboração deste trabalho foi a oportunidade de aplicar os conhecimentos no tema de proteção radiológica adquiridos ao longo do curso objetivando aperfeiçoar atuação na atividade profissional e, pela análise dos resultados, sugerir soluções visando contribuir com a saúde e segurança dos funcionários da empresa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta embasamento teórico e específico necessário para a análise de resultados e elaboração das considerações finais deste trabalho.

2.1. RADIAÇÕES

Radiações podem ser entendidas como ondas eletromagnéticas ou partículas que se propagam com determinada velocidade e energia (DILL, 2018, pág.02). Podem originar de fontes naturais, quando provenientes de núcleos de materiais radioativos, ou podem ser geradas pela ação do homem, através dos aceleradores de partículas ou reatores (DILL, 2018).

De acordo com a intensidade de energia são, normalmente, classificadas em radiações não ionizantes, quando apenas causam a excitação eletrônica de átomos e moléculas, e ionizantes, quando são capazes de causar o rompimento das ligações moleculares (FRANCISCA, 2019).

As radiações possuem aplicações benéficas na área da medicina (diagnósticos e tratamentos), agricultura (autorradiografia de plantas, estudo de comportamento de insetos e eliminação de pragas) (CARDOSO, 2012) e na indústria, em diferentes ramos, como gamagrafia industrial, análises laboratoriais, modificações de materiais poliméricos, preservação e desinfecção de produtos alimentícios, esterilização de produtos farmacêuticos (PINO; GIOVEDI, 2013, pág. 49), dentre outras.

2.2. RADIAÇÃO IONIZANTE E SEUS EFEITOS BIOLÓGICOS

Um dos agentes físicos aos quais os trabalhadores podem estar expostos é a radiação ionizante (FRANCISCA, 2019). Segundo Pino e Giovedi (2013, pág.47) a radiação ionizante é a radiação transmitida por partículas de alta energia (partículas alfa, partículas beta, prótons, elétrons, nêutrons) ou ondas eletromagnéticas (raios X, raios gama) capazes de interagir com a matéria, arrancando elétrons de seus átomos (ionização) e modificando as moléculas (NOUAILHETAS; YANNICK et al, 2005, pág. 03).

O efeito das radiações ionizantes em um indivíduo depende basicamente da dose absorvida (alta/baixa), da taxa de exposição (crônica/aguda), da forma da exposição (corpo inteiro/localizada) (NOUAILHETAS; YANNICK et al, 2005, pág. 31), tipo de

tecido e do órgão exposto e da eficiência dos mecanismos de reparação celular do DNA (ALMEIDA, 2007).

Dessa forma, de acordo com Dill (2018, pág.3 e 4) alguns exemplos de alterações na matéria que a interação com a radiação ionizante pode ocasionar são: inflamações, bolhas, lesões, epilação, eritema e escamações na pele; perda de leucócitos, diminuição do número de plaquetas ou anemia no sistema hematopoiético; no aparelho digestivo pode resultar na inibição da proliferação celular ou diminuição/supressão de secreções; no sistema reprodutor podem causar redução da fertilidade ou esterilidade; pericardites no sistema cardiovascular; fibrose renal no sistema urinário; hepatite no fígado; dentre outros, podendo chegar até o desenvolvimento de doenças como o câncer (FRANCISCA, 2019, pág. 34).

Quando exposta num intervalo de tempo pequeno de até alguns dias à radiação, uma pessoa pode apresentar o que se chama Síndrome Aguda da Radiação.

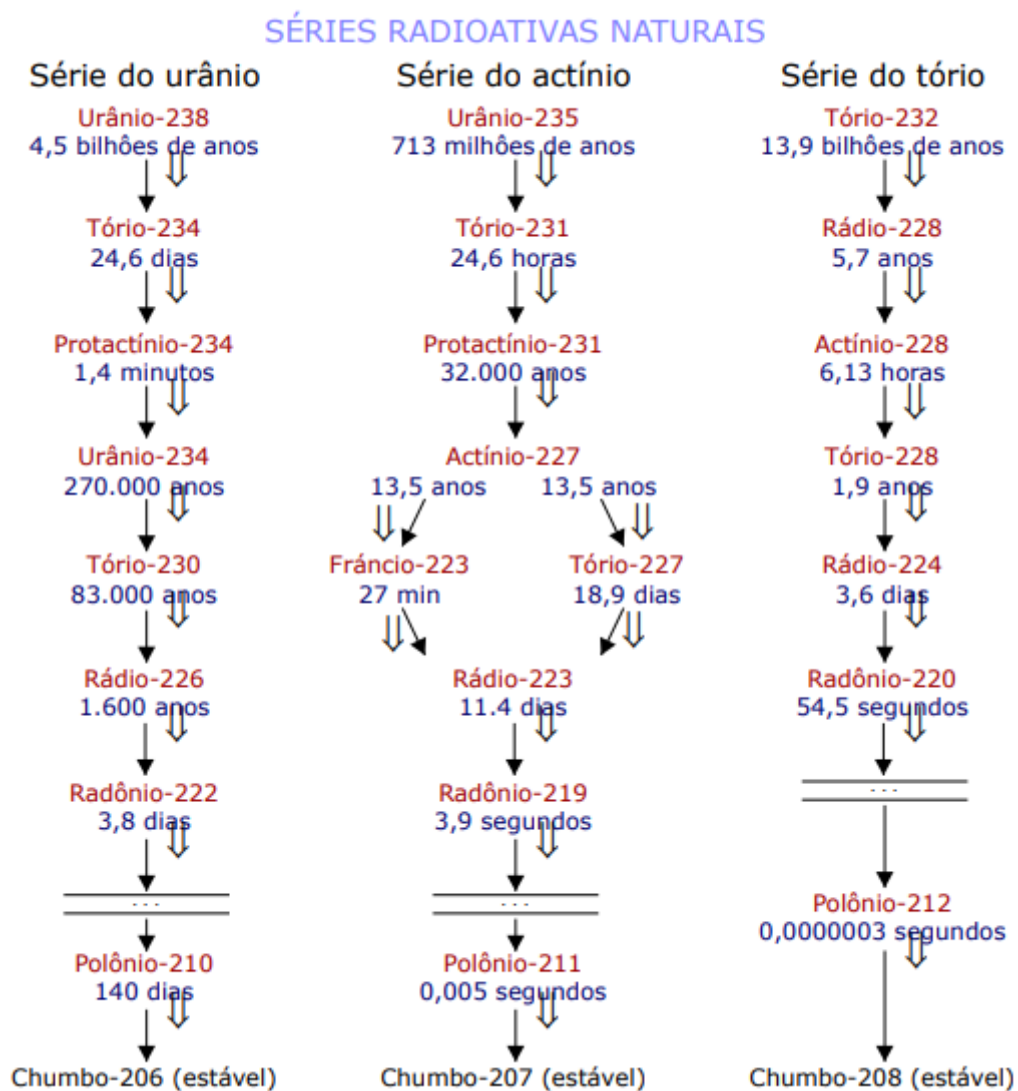
Segundo Okuno (2013, pág 192) essa síndrome pode variar com a dose, sendo a unidade Gray (Gy) a dose absorvida de 1 joule por quilograma, ou seja: $1\text{Gy}=1\text{J/kg}$ (USP, 2020, pág 206). Caso a dose absorvida pelo corpo todo for de 0,25 a 1 Gy, alguns indivíduos podem ter náusea, diarreia e depressão no sistema sanguíneo; entre 1 e 3 Gy, além de sintomas anteriores, pode ter forte infecção causada por agentes oportunistas; entre 3 e 5 Gy pode ocorrer hemorragia, perda de pelos e esterilidade temporária ou permanente; em torno de 10 Gy ocorre a inflamação dos pulmões, e para doses maiores os efeitos podem incluir danos no sistema nervoso e cardiovascular levando o indivíduo à óbito em poucos dias.

2.3. RADIAÇÃO NATURAL

Na natureza existem elementos radioativos que realizam desintegrações sucessivas, até que o núcleo atinja uma configuração estável. Segundo Cardoso, (2012, pág.21), isso significa que, após um decaimento radioativo, o núcleo não possui, ainda, uma organização interna estável e, assim, ele executa outra transmutação para melhorá-la e, ainda não conseguindo, prossegue, até atingir a configuração de equilíbrio.

No estudo da radioatividade, constatou-se que existem apenas três famílias ou séries de elementos radioativos naturais, estas variam de acordo com a sua sequência de decaimento (processo de estabilização), sendo elas: série do urânio, série do actínio e a série do tório (FRANCISCA, 2019, pág. 22).

Figura 1: Séries radioativas naturais



Fonte: CARDOSO, 2012, pág. 22

As três séries naturais terminam em isótopos estáveis do chumbo, respectivamente: chumbo-206, chumbo-207 e chumbo-208 (CARDOSO, 2012, pág. 21).

2.4. NORMAS RELACIONADAS

2.4.1. NBR ABNT NR 15 e CNEN - NN-3.01: "Diretrizes Básicas de Radioproteção"

De acordo com o Anexo Nº 5 sobre radiações ionizantes da Norma Regulamentadora Nº 15: "Atividades e Operações Insalubres", para atividades onde trabalhadores possam ser expostos a radiações ionizantes, deve-se seguir os

princípios, obrigações e controles básicos para a proteção do homem e do meio ambiente constantes na Norma CNEN-NN-3.01: "Diretrizes Básicas de Radioproteção", de julho de 1988, ou daquela que venha a substituí-la.

A Norma CNEN-NN-3.01, da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que é o organismo nacional, ligado ao Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), responsável por todo o controle da energia nuclear no território nacional, possui o objetivo de estabelecer os requisitos básicos de proteção radiológica das pessoas em relação à exposição à radiação ionizante.

Com relação à limitação da dose equivalente, a CNEN-NN-3.01 estabelece que:

- Nenhum trabalhador deve ser exposto sem que seja necessário, que tenha conhecimento dos riscos e esteja devidamente treinado;
- Em exposições de rotina, nenhum trabalhador deve receber, por ano, doses equivalentes superiores aos limites da Figura 2;
- Nenhum indivíduo do público deve receber, por ano, doses equivalentes superiores aos limites estabelecidos na Figura 2;

Figura 2: Limites de Dose Anuais

Limites de Dose Anuais ^[a]			
Grandeza	Órgão	<i>Indivíduo ocupacionalmente exposto</i>	<i>Indivíduo do público</i>
<i>Dose efetiva</i>	Corpo inteiro	20 mSv ^[b]	1 mSv ^[c]
<i>Dose equivalente</i>	Cristalino	20 mSv ^[b] (Alterado pela Resolução CNEN 114/2011)	15 mSv
	Pele ^[d]	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	---

[a] Para fins de *controle administrativo* efetuado pela CNEN, o termo *dose* anual deve ser considerado como *dose* no ano calendário, isto é, no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano.

[b] Média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

(Alterado pela Resolução CNEN 114/2011)

[c] Em circunstâncias especiais, a CNEN poderá autorizar um valor de *dose efetiva* de até 5 mSv em um ano, desde que a *dose efetiva* média em um período de 5 anos consecutivos, não exceda a 1 mSv por ano.

[d] Valor médio em 1 cm² de área, na região mais irradiada.

Os valores de *dose efetiva* se aplicam à soma das *doses efetivas*, causadas por *exposições* externas, com as *doses efetivas comprometidas* (integradas em 50 anos para adultos e até a idade de 70 anos para crianças), causadas por incorporações ocorridas no mesmo ano.

Fonte: NORMA CNEN-NN-3.01: "Diretrizes Básicas de Radioproteção"

Sendo:

- Indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE): – indivíduo sujeito à exposição ocupacional.
- Indivíduo do público: qualquer membro da população quando não submetido à exposição ocupacional ou exposição médica.
- Dose efetiva: **E** - é a soma das doses equivalentes ponderadas nos diversos órgãos e tecidos, $E = \sum W_T \cdot H_T$ onde H_T é a dose equivalente no tecido ou órgão e W_T é o fator de ponderação de órgão ou tecido. A unidade no sistema internacional é o joule por quilograma (J/kg), denominada sievert (Sv).
- Dose equivalente: **H_T** - grandeza expressa por $H_T = D_{TW_R}$, onde D_T é dose absorvida média no órgão ou tecido e w_R é o fator de ponderação da radiação. A unidade no sistema internacional é o joule por quilograma (J/kg), denominada sievert (Sv).

2.4.2. POSIÇÃO REGULATÓRIA CNEN - 3.01 / 004:2011 – “Restrição de dose, níveis de referência ocupacionais e classificação de áreas”

Esta posição regulatória, com a finalidade de garantir um nível adequado de proteção individual para cada IOE estabelece um valor de restrição de dose efetiva, levando em consideração as incertezas a ela associadas, relativa a qualquer fonte ou instalação sob o controle regulatório, definindo que:

- O nível de registro para monitoração individual mensal de IOE é de 0,10 mSv para dose efetiva: todas as doses maiores ou iguais a 0,10 mSv devem ser registradas;
- O nível de investigação para monitoração individual de IOE deve ser, para dose efetiva, 6 mSv por ano ou 1 mSv em qualquer mês.

CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS

Esta norma também define sistema de classificação de áreas, com o intuito de auxiliar o controle das exposições ocupacionais, caracterizando os locais de trabalho em dois tipos de áreas conforme abaixo:

- Áreas Controladas: qualquer área na qual medidas específicas de proteção radiológica são ou podem ser necessárias para controlar as exposições de

rotina e evitar a disseminação da contaminação durante as condições normais de operação;

- Áreas Supervisionadas: qualquer área sob vigilância não classificada como controlada, mas onde as condições de exposição ocupacional necessitam ser mantidas sob supervisão.

Essa classificação deve ser realizada sempre que houver previsão de exposição ocupacional e deve ser mencionada no Plano de Proteção Radiológica (PPR).

2.4.3. CNEN-NN-5.01: “Transporte de Materiais Radioativos”

O objetivo desta Norma é estabelecer requisitos de radioproteção e segurança de pessoas, bens e do meio ambiente, com relação ao TRANSPORTE DE MATERIAIS RADIOATIVOS, compreendendo especificações sobre os materiais radioativos transportados, embalagens selecionadas, requisitos de projetos, responsabilidades administrativas e disposições pertinentes ao transporte propriamente dito, sendo aplicável:

- a) ao transporte por terra, água ou ar;
- b) ao projeto, fabricação, ensaios e manutenção de embalagens;
- c) à preparação, expedição, manuseio, carregamento, armazenagem em trânsito e recebimento no destino final de embalados; e,
- d) ao transporte de embalagens vazias, que tenham encerrado material radioativo.

Ainda define, de acordo com o Art. 23 do Regulamento do Serviço Postal aprovado pelo Decreto Federal Nº 83.858, de 15/8/79, que não é permitido o transporte de substância radioativa por via postal.

2.4.4. NBR ABNT NR 16 e Portaria MTE nº 518 de 04/04/2003

A Portaria 518 de 2003 do MTE caracteriza as atividades e operações com radiações ionizantes ou substâncias radioativas como de periculosidade, havendo assim a obrigatoriedade do pagamento de adicional de periculosidade de 30% (trinta por cento) incidente sobre o salário (sem os acréscimos resultantes de gratificações, prêmios ou participação nos lucros da empresa) aos trabalhadores nestas condições.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O conteúdo abaixo apresentado foi baseado em dados internos e confidencias da empresa avaliada.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1.1. Instalação e processo produtivo

Situada Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), a empresa atua na mineração e metalurgia de estanho e minerais industriais desde 1969. Na planta, ocorre a fundição do concentrado de cassiterita para obtenção do estanho refinado, high grade, 99,9% de pureza e suas ligas.

O concentrado de cassiterita é proveniente da concentração de minérios de aluvião, rochas intemperizadas e primárias (Ferron & Prado, 2005 *apud* Garcia, 2009, pág. 13) contendo urânio (U) e tório (Th) associados e outros radionuclídeos. A presença de U e de Th nesse mineral são devidas a um complexo de minerais existentes, tais como o pirocloro $[(Na_3Ca)_2(Nb,Ta)-(O_3F)_7]$.

O processo de obtenção de estanho pode, basicamente, ser dividido em cinco partes:

- Sinterização: processo metalúrgico que tem por finalidade a aglomeração de partículas minerais através de fusão redutora-oxidante em temperatura média de 1.000 a 1.200°C com a queima do combustível, usualmente carvão vegetal. Possui como produto final o sínter, massa aglomerada heterogênea com composição química e granulometria definida utilizada subsequentemente no processo de redução.

Instalação: Realizada em galpão fechado, de alvenaria e estrutura metálica. A entrada e saída do material se dá por meio de correias transportadoras.

- Redução: Os processos de redução e refino do estanho são processos pirometalúrgicos que tem como objetivo a produção de estanho metálico (material com teor de estanho superior a 95%) a partir do sínter de cassiterita, escórias e concentrados jigados. Ocorre em forno elétrico de redução com

fundentes e redutores (dolomita, fluorita, coque e carvão vegetal). Tem como produto final o estanho metálico.

Instalação: realizada em galpão parcialmente fechado, de alvenaria e estrutura metálica, com pé direito de 15 m. A entrada de material se dá por meio de correias transportadoras. A saída de material é feita por pás carregadeiras, caminhões e empilhadeiras

- Refino: refino do estanho metálico obtido do processo de redução, produzido a teores de estanho da ordem de 99,9%. O refino acontece no forno revérbero, e sua principal função é a remoção de ferro e compostos ferrosos. Após processamento no forno revérbero, o estanho metálico passa pela etapa de refino nos cadinhos onde ocorre a retirada de contaminantes como zinco e cobre antes de ser enviado para o processamento nos cristalizadores, onde atinge a especificação final para comercialização.

Instalação: realizada em galpão parcialmente fechado, de alvenaria e estrutura metálica. A entrada e saída de material é feita por empilhadeiras e pás carregadeiras.

- Jigagem: No processo de redução são geradas escórias denominadas escória rica, formada na fusão primária da cassiterita, a qual é britada e retorna ao forno, e escória pobre, formada na fusão secundária e que segue para o processo de Jigagem visando recuperar o estanho contido. As escórias são resfriadas por aspersão de água ao chegarem à Jigagem, passam por uma moega e uma série de britadores onde há separação da fração magnética de FeSn, vai para o silo pulmão, moinho e trommel. Finalmente passa pelos jigs onde são separados a escória concentrada (que retorna para o forno) e a escória de estanho (resíduo), que é destinada às pilhas de escória.

Uma outra linha do processo é o processo de beneficiamento, onde há processamento da escória das pilhas, material também chamado de rejigado, por um circuito de espirais. O produto final é a obtenção de um concentrado com no mínimo 17% de estanho contido. O resíduo deste processo é destinado novamente à pilha de escória.

Instalação: realizada a céu aberto. As plantas são construídas em estruturas metálicas.

- Transporte: todo transporte é realizado devidamente sinalizado e documentado de acordo com o Plano de Transportes de Materiais Radioativos, em consonância com a Norma CNEN 5.01 – “Transporte de Materiais Radioativos”.

Os radionuclídeos estão presentes no concentrado de cassiterita, sendo que ao longo do processo se concentram quase totalmente na escória rejeito (Garcia, 2009, pág. 21).

Figura 3: Concentração de radionuclídeos nos materiais

Amostras	Concentrações				
	ThO ₂ (mg.kg ⁻¹)	U ₃ O ₈ (mg.kg ⁻¹)	²¹⁰ Pb (Bq.kg ⁻¹)	²²⁶ Ra (Bq.kg ⁻¹)	²²⁸ Ra (Bq.kg ⁻¹)
Concentrado Cassiterita	20.200	4.400	13.476 ± 3.300	15.226 ± 4.200	64.321 ± 4.200
Cassiterita Sinterizada	18.000	4.000	10.211 ± 2.500	15.231 ± 4.200	57.506 ± 3.800
Estanho Refinado	< 10	< 10	99 ± 38	< 60	< 21
Chumbo	< 10	< 10	2.521.467 ± 600.000	< 2.000	< 66
Liga FeSn	580	99	601 ± 150	559 ± 190	1.108 ± 74
Fração Magnética	3.500	290	2.014 ± 500	2.428 ± 690	5.789 ± 380
Escória Final	20.080	6.700	9.253 ± 2.200	25.823 ± 8.800	67.332 ± 4.500

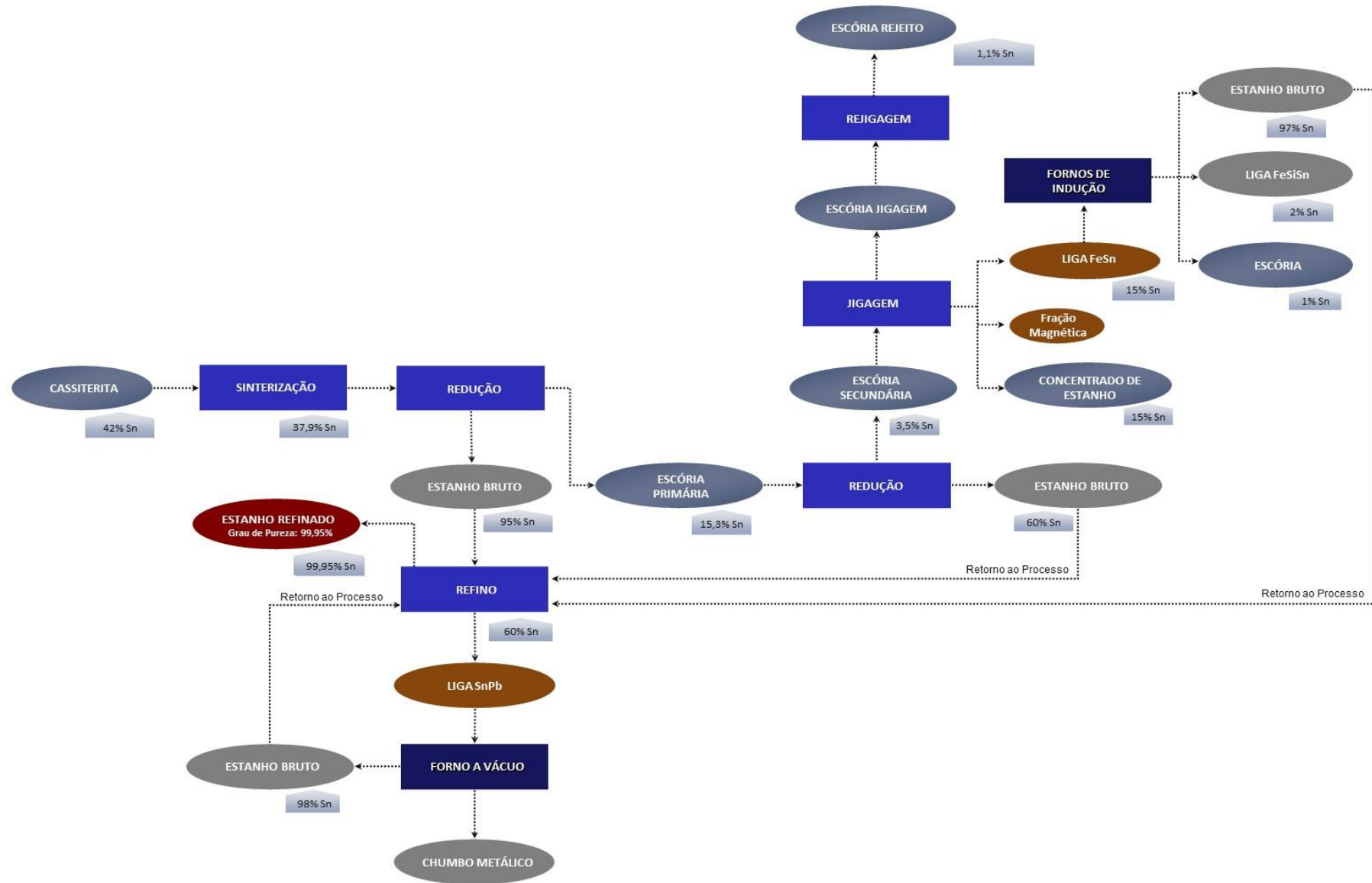
Obs: As concentrações estão reportadas da seguinte maneira:

- U₃O₈ e ThO₂ nas amostras sólidas estão reportados em mg.kg⁻¹
- ²²⁶Ra, ²²⁸Ra e ²¹⁰Pb nas amostras sólidas estão reportados em Bq.kg⁻¹
- 1 mg.kg⁻¹ de U₃O₈ corresponde matematicamente a 10,5 Bq.kg⁻¹ de ²³⁸U + 10,5 Bq.kg⁻¹ de ²³⁴U
- 1 mg.kg⁻¹ de ThO₂ corresponde matematicamente a 3,6 Bq.kg⁻¹ de ²³²Th

Fonte: Fukuma e Villegas, 2018

O fluxograma dos processos pode ser visto na figura 4 abaixo:

Figura 4: Fluxograma Processos



3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

- Dosímetro OSLD (Dosimetria por Luminescência Ópticamente Estimulada):
 - Os Dosímetros pessoais tipo OSLD utilizados na instalação são certificados pela CNEN e são fornecidos pelo laboratório credenciado Sapra Landauer, o mesmo responsável pela leitura dos mesmos e entrega de relatórios mensais.
 - São utilizados por todos os funcionários ocupacionalmente exposto a radiações ionizantes, nos campos raios X, gama e beta. Para estimar a dose de corpo inteiro (tórax convencional), os monitores são disponibilizados em forma de crachá e carregados por cada funcionário individualmente.
 - Design: Os dosímetros são compostos por um case contendo filtros de plástico e metal (alumínio e cobre) e slide com um conjunto de quatro detectores de óxido de alumínio, ambos com números de série gravados em códigos de barra 1D e 2D, permitindo rastreabilidade em todo o processo de utilização, e envolvidos em uma bolsa plástica à prova d'água.

Figura 5: Dosímetros OSLD



Fonte: SAPRA Landauer, 2022

- Tecnologia: De acordo com a Sapra Landauer (2022), a faixa dinâmica de resposta linear dos dosímetros é de 0,1 mSv a 10,0 Sv. A Dosimetria por Luminescência Oticamente Estimulada (OLSD) emprega como dosímetro um material fotoluminescente, que após exposto à radiação ionizante, quando estimulado por luz apresenta a propriedade de emitir luz em quantidade proporcional à dose de radiação que recebeu ao longo de um determinado período de exposição, denominada fotoluminescência. No processo de leitura, um conjunto de diodos emissores de luz (LED) estimula os sensores e a luz emitida pelo material de Luminescência Oticamente Estimulada (OSL) é captada através de um sistema de contagem de fótons de alta sensibilidade de uma fotomultiplicadora (PMT). Com base nas medições dos quatro sensores OSL em associação ao conjunto de filtros, um algoritmo de cálculo determina a dose a que aquele monitor foi exposto.
- Verificação e Manutenção: A verificação do estado operacional dos equipamentos de detecção e monitoração é realizada periodicamente (validade semanal, devendo ser refeita antes do uso, caso o medidor não seja utilizado por períodos maiores que uma semana), utilizando-se uma fonte de aferição de Césio 137 e uma fonte de minério que emite radiações alfa, beta e gama, confeccionada pela empresa, sendo os registros dos resultados arquivados pelo Setor de Radioproteção ou Proteção Radiológica (SERAD). Sempre que necessário, e sob a supervisão do SERAD, os detectores e monitores são encaminhados para manutenções corretivas. Além de equipamentos de detecção e monitoração de radiação, seja individual, de área ou ambiental, ainda são disponibilizados aos trabalhadores equipamentos de proteção individual (EPI), como máscara respiratória, luvas, vestimentas, sapatos de segurança, óculos de proteção visual, protetor auricular etc.

3.3. MÉTODOS

- GESTÃO DE DOSÍMETROS

- Dosímetros individuais: são entregues a cada um dos funcionários, de acordo com sua área de atuação, e devem ser trocados mensalmente junto ao Setor de Proteção Radiológica (SERAD); cada funcionário é responsável pelo seu dosímetro, sendo obrigatória a utilização durante toda a jornada de trabalho, sempre na altura do tórax, para que fique exposto e, sendo de extrema importância a devolução do dosímetro no armário fornecido pelo SERAD todos os dias após o período de serviço. Cabe também ao trabalhador ter cuidado para não perder, estragar, amassar, romper o lacre ou molhar o dosímetro. Caso ocorra qualquer problema relacionado a dosimetria deve-se comunicar o SERAD uma vez que, qualquer um desses fatores poderá alterar a leitura feita no laboratório ou até inviabilizá-la. Os procedimentos mencionados acima, possuem listas e fichas de coleta de rubrica de ciência de todos os envolvidos.

- AVALIAÇÃO DE DOSES

- Premissa adotada: A empresa monitora os limites de exposição ocupacionais visando cumprir o limite de dose anual para IOE previsto pela norma Norma CNEN-NN – 3.01 – “Diretrizes Básicas de Radioproteção”, de 20 mSv/ano, visando sempre a proteção e a segurança de seus funcionários. Além disso, de acordo com a POSIÇÃO REGULATÓRIA CNEN - 3.01 / 004:2011 – “Restrição de dose, níveis de referência ocupacionais e classificação de áreas”, adota o nível de investigação para monitoração individual do IOE como sendo 6 mSv por ano e 1 mSv em qualquer mês, para dose efetiva.
- Leitura da dose (mSv): após o término de cada mês, todos os dosímetros são recolhidos e enviados ao laboratório especializado, o qual realiza as leituras e envia relatório final. Os relatórios são arquivados pelo SERAD e neles constam os resultados nominais e mensais para cada IOE. Os relatórios ficam retidos pela equipe do SERAD até 01 ano após sua emissão.

Os padrões de leitura considerados são:

- ANR - Leitura abaixo do nível de registro (valores abaixo de 0,1 mSv)
 - OD - Excedido o limite derivado de trabalho - considerando valores iguais ao acima de: 4,0 mSv p/ monitores de corpo inteiro e 40,0 mSv p/ monitores de extremidades (para outros tipos não se aplica estes limites)
 - LI - Leitura impossível
 - ND - Monitor não devolvido
 - NU - Monitor não utilizado
 - EC - Excedido o limite de certificação concedido pelo IRD/CNEN
 - EX - Monitor extraviado
 - (*) - Monitores de extremidades não são certificados pelo IRD/CNEN
- Inspeções Radiológicas: com o objetivo de proteger o IOE dos efeitos nocivos da radiação ionizante, o histórico de doses é avaliado visando identificar aqueles que excederam ou atingiram o nível de investigação adotado pela empresa (1 mSv em qualquer mês). Em caso de dose mensal superior a 1mSv e inferior a 4mSv a investigação é realizada apenas pela equipe de proteção radiológica. Em caso de dose mensal superior a 4mSv é necessária a participação do supervisor da área. O procedimento consiste em entrevistar o IOE pretendendo coletar informações sobre possível perda ou uso incorreto do dosímetro, sua exposição proposital ou acidental ou mesmo sua guarda em local indevido (fora do armário). Além disso, a entrevista visa a coleta de informações sobre possíveis mudanças na rotina normal, como, por exemplo, o trabalho em áreas diferentes. Após análise da investigação de doses, são tomadas medidas e/ou providências de modo a atender o disposto na “Norma CNEN-NN – 3.01 – Diretrizes Básicas de Radioproteção”. Os procedimentos mencionados acima, possuem listas e fichas de coleta de rubrica de ciência da dose e ações tomadas.

- **REGISTRO DE DOSES**

- Os relatórios de Registros de Doses, Notificações de Extravio de Dosímetros e Histórico de Doses dos Funcionários, ficam retidos pela equipe do SERAD 30 anos após o IOE terminar sua ocupação ou até que ele atinja 75 anos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. RESULTADOS

No ano de 2021, 270 funcionários próprios da empresa analisada foram submetidos ao controle de dosimetria para radiação ionizante em todas as áreas envolvidas na produção de estanho refinado.

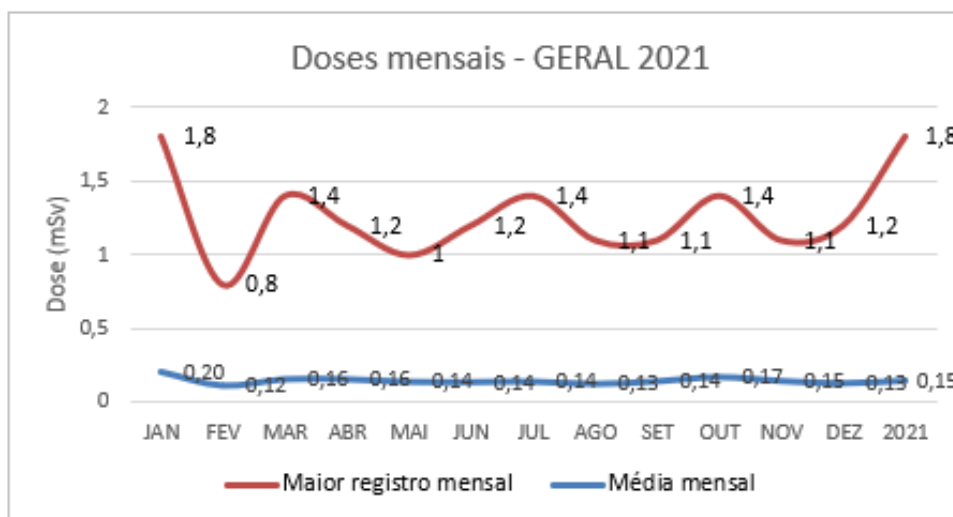
Figura 6: Número de funcionários Próprios 2021

Área	Número de Funcionários
Administrativo	52
Jigagem	34
Manutenção	61
Redução e Refino	83
Sinterização	40
Total	270

Fonte: Autor, 2022

- Geral

Gráfico 1: Doses mensais 2021 (mSv)

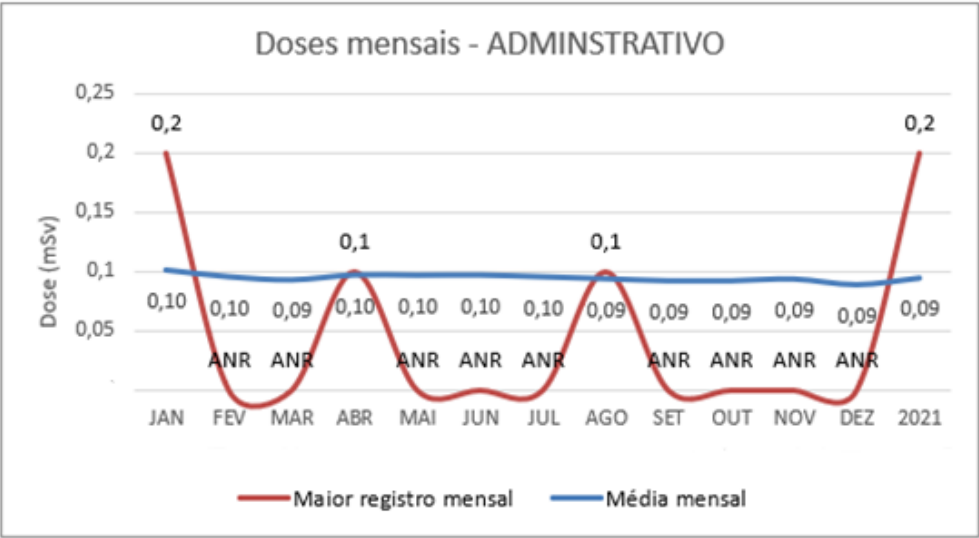


Fonte: Autor, 2022

Seguem abaixo, resultados por área:

- Administrativo

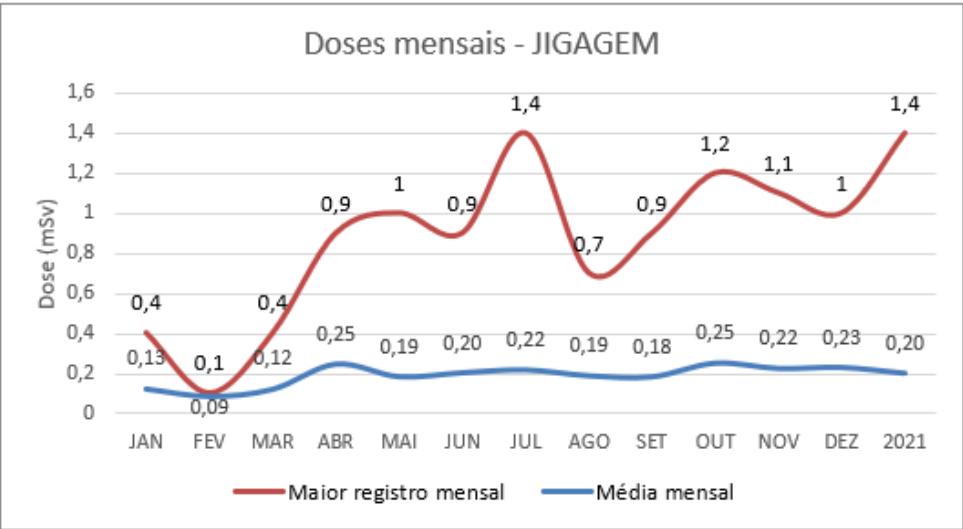
Gráfico 2: Doses mensais - Administrativo (mSv)



Fonte: Autor, 2022

- Jigagem

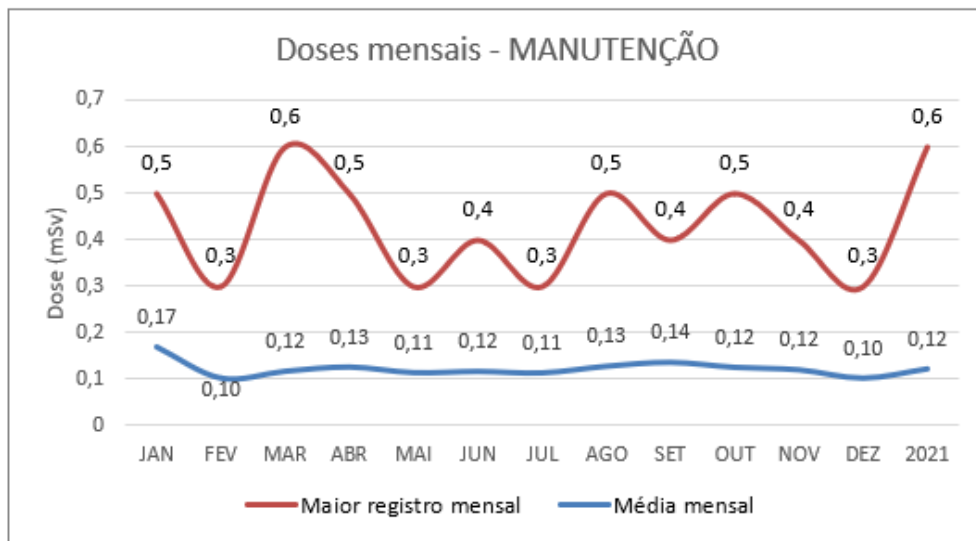
Gráfico 3: Doses mensais - Jigagem (mSv)



Fonte: Autor, 2022

- Manutenção

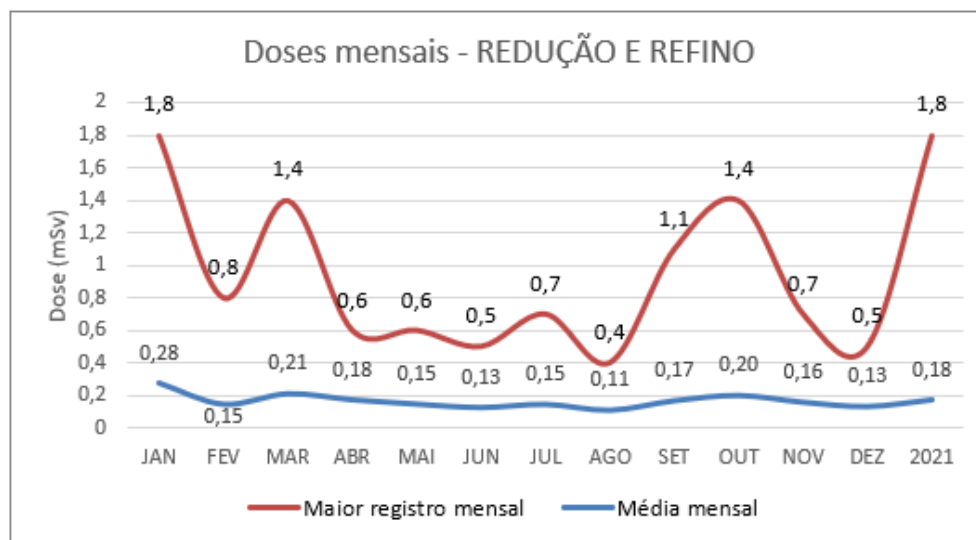
Gráfico 4: Doses mensais - Manutenção (mSv)



Fonte: Autor, 2022

- Redução e Refino

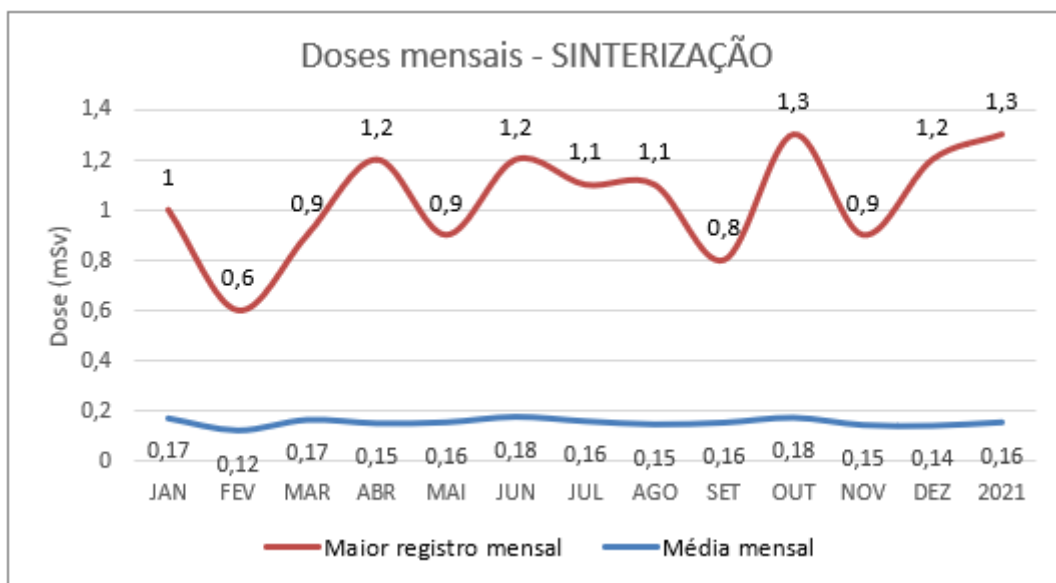
Gráfico 5: Doses mensais - Redução e Refino (mSv)



Fonte: Autor, 2022

- Sinterização

Gráfico 6: Doses mensais - Sinterização (mSv)



Fonte: Autor, 2022

4.2. DISCUSSÃO

Durante todo ao ano de 2021, não houve casos em que a dose acumulada de cada IOE ultrapassou 20,0 mSv/ano. Para resultados mensais acima de 1,0 mSv, de acordo com a POSIÇÃO REGULATÓRIA CNEN - 3.01 / 004:2011 – “Restrição de dose, níveis de referência ocupacionais e classificação de áreas”, foram realizadas as investigações de dose a fim de avaliar as causas e consequências dos fatos que levaram à detecção deste nível, bem como a proposição de ações corretivas necessárias.

De acordo com os padrões de leitura considerados pelo laboratório especializado Sapra Landauer, leituras abaixo do nível de registro (ANR) consideram valores medidos abaixo de 0,1 mSv e, a maior ocorrência desses resultados pode ser vista na área Administrativa, por ser o local de trabalho onde os IOEs estão mais afastados da matéria prima, produtos e subprodutos da metalurgia do estanho.

Nota-se que os maiores registros mensais de doses foram registrados para funcionários que atuam nas áreas de Jigagem, Redução, Refino e Sinterização. Na área da Sinterização isso se dá pelo fato de um maior contato com a matéria-prima bruta (concentrado de cassiterita) que possui os radionuclídeos associados e, nas áreas de Jigagem, Redução e Refino, por serem as áreas da operação que contém

as escórias do processo e, a fração de material radioativo está mais concentrada nesses materiais.

4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após análise dos resultados de doses para o ano de 2021 conclui-se que não houve casos em que a dose acumulada de cada IOE ultrapassou 20,0 mSv/ano, estando em conformidade com o limite de dose anual para indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE) estipulado pela norma CNEN-NN-3.01: "Diretrizes Básicas de Radioproteção vigente.

Nota-se também que, as áreas com maior registro mensal de doses são aquelas em que há maior ocorrência do manuseio de material pelos funcionários, maior exposição de material que contém radionuclídeos e presença de escória, onde a fração de material radioativo está mais concentrada, sendo estas as áreas de Jigagem, Redução, Refino e Sinterização.

Visando reduzir exposições ocupacionais, evitar exposições desnecessárias à radiação ionizante, evitar contaminação externa, interna e incorporação de material radioativo por inalação ou ingestão além de ter em vista a segurança e proteção radiológica dos colaboradores aos impactos associados a exposição ocupacional, deve-se seguir o Plano de Proteção Radiológica (PPR) elaborado com base nas normas e legislações vigentes e estabelecer medidas de boas práticas de proteção como:

- Delimitar, controlar e sinalizar as áreas controladas e supervisionadas;
- Garantir que todos os colaboradores sejam submetidos a exames periódicos ocupacionais;
- Aplicar Investigação de doses sempre que necessário, de acordo com normas e legislação vigentes;
- Avaliar o histórico de doses, identificando e informando ao colaborador exposto e ao seu gestor a situação das suas doses, bem como medidas paliativas e corretiva;
- Proporcionar treinamento de funcionários novos e reciclagem anual;
- Manter uma cultura de segurança para estimular e fortalecer atitudes e comportamentos que contribuam para aprimorar a segurança das fontes e da proteção radiológica;

- Garantir o pagamento de periculosidade/insalubridade.

5 CONCLUSÕES

Diante de tudo que foi explanado no presente trabalho, através da análise de doses mensais pelos gráficos gerados e, em alinhamento com as normas e legislação vigentes, pode-se afirmar que os objetivos propostos: de avaliar a exposição de funcionários a radiação ionizante proveniente da matéria-prima utilizada no processo de metalurgia do estanho; de definir as áreas da produção onde ocorre o maior nível de exposição e sugerir melhorias para redução de impactos aos trabalhadores associados a exposição ocupacional; foram alcançados com êxito.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Ronaldo J. **“Estudo dos Efeitos Biológicos da Radiação, com ênfase nos Raios-X”**. GOIÂNIA, 2007. Disponível em: https://radiologia-rx.webnode.com.br/_files/200000207-6ac0e6b3e0/Estudo%20dos%20Efeitos%20da%20Radia%C3%A7%C3%A3o.pdf

CARDOSO, Eliezer de Moura. **A energia nuclear**/Eliezer de Moura Cardoso. - 3.ed.- Rio de Janeiro: CNEN, 2012. (Apostila educativa) 52 p. Disponível em:<<http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/energia.pdf>> Acesso em: 10 de janeiro de 2022.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. Normas para Proteção Radiológica. **CNEN NN 3.01 Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Resolução 164/14 Março/2014.** Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/normas.asp?grupo=3>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2022.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. Normas para Proteção Radiológica. **Posição Regulatória 3.01 / 004:2011 - Restrição de dose, níveis de referência ocupacionais e classificação de áreas.** Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_04.pdf>. Acesso em: 10 de janeiro de 2022.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. Normas para Proteção Radiológica. **Norma CNEN NE 5.01 – Transporte De Materiais Radioativos. Resolução CNEN 013/88 Agosto/1988.** Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm501.pdf>> Acesso em: 10 de janeiro de 2022.

DILL, Manuella Delavechia. **Avaliação de periculosidade por radiação ionizante.** 2018.

FRANCISCA, Diego Diegues. **Novo método de avaliação da exposição ocupacional ao gás radônio em ambientes de mineração**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2019.

FUKUMA, H.T., VILLEGAS, R.A.S., **Relatório Técnico RT – LAPOC N° 03/18 – Inspeção de Processos na Instalação da Mineração Taboca – Unidade Pirapora do Bom Jesus/SP**. Poços de Caldas, MG:2018.

GARCIA, Márcia Aparecida Antico. **Caracterização radioquímica e impacto radiológico Ambiental no processamento da casiterita para a produção de estanho e chumbo metálico**. 2009. Tese de Doutorado. M.Sc. Dissertation, São Paulo, SP, Br: IPEN/USP.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA. **Norma Regulamentadora NR 15 – Atividades e Operações Insalubres**. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-15-atualizada-2021.pdf>> Acesso em: 10 de janeiro de 2022.

Monitor Inlight® Saprã Dosimetria por Luminescência Opticamente Estimulada (OSLD) – Saprã Landauer – disponível em: <file:///C:/Users/mdamato/Desktop/Individual/Pessoal/TCC/Docs%20Taboca/PDF-Dos%C3%ADmetro-Saprã-OSLD_FINAL.pdf> Acesso em: 20 de fevereiro de 2022.

NOUAILHETAS, YANNICK et al. **Radiações Ionizantes e a vida**. Rio de Janeiro: CNEN, 2005.

OKUNO, Emico. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. **Estudos avançados**, v. 27, p. 185-200, 2013.

PINO, Eddy Segura; GIOVEDI, Claudia. Radiação ionizante e suas aplicações na indústria. **UNILUS Ensino e Pesquisa**, v. 2, n. 2, p. 47-52, 2013.

RADIOLÓGICA, Proteção. Noções Básicas de Proteção Radiológica. **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. IPEN**, 2002.

USP - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Politécnica Programa de Educação Continuada. **Apostila do Curso de Engenharia de Segurança do Trabalho – Disciplina Higiene do Trabalho – Parte B**. Epusp - EAD/ PECE, 2020. 378.