

# Comparação dos Resultados de Medição de Umidade de Carvão Mineral em Usina Termelétrica

Ariel Cristiano Brambilla<sup>1</sup>

**Resumo** – Atualmente o mercado oferece diversos equipamentos capazes de verificar de forma on-line a composição química de materiais provenientes da mineração. Através de sistemas de micro-ondas, radiações ionizantes e não ionizantes é possível determinar, com certo grau de precisão, os principais elementos presentes na matéria prima, permitindo análises, cálculos e estimativas de maior aderência. O presente trabalho utiliza resultados de ensaios de umidade de carvão mineral, obtidas através de tecnologia de micro-ondas, comparadas com a metodologia usual utilizando estufas.

**Palavras-chave** – micro-ondas, umidade, carvão mineral, análises, estufas.

**Abstract** – Nowadays many kinds of equipment are capable to provide in real time, the chemical composition of mineral from mining, using microwave, radiation ionizing and nonionizing, it is possible determinate with a reasonable precision, the main elements of the mineral, allowing analysis, calculations e estimations more adherer. This paper compare coal moisture results, obtained through microwave device, with results obtained through oven procedure.

**Keywords** – *microwave, moisture, coal, analyses, oven.*

## I. INTRODUÇÃO

No ano de 2019 foram instalados equipamentos on-line para análise da composição química do carvão mineral abastecido nas usinas de Termelétricas Jorge Lacerda. Anteriormente, o processo de análise era feito somente via equipamentos de laboratório: estufas, calorímetro, termogravimétrico, analisador de Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre.

O equipamento de medição on-line instalado, utiliza técnicas de micro-ondas, radiação do tipo gama e emissão de nêutrons para obtenção da uma análise química do carvão mineral, gerando uma maior quantidade de dados para realização de análises. Com as técnicas de laboratório, são necessários procedimentos periódicos de amostragem, fracionamento, preparação e execução de análises em amostras de carvão, processos esses que demandam tempo e, na maioria dos casos, geram resultados de uma amostra de carvão mi-

neral que já foi consumido na caldeira.

Considerando a metodologia atual, a sistemática de coleta das amostras do laboratório de combustíveis obtém um resultado de umidade para cada dia de operação. Este resultado é aceito como representativo para as 24 horas de operação da caldeira. Por outro lado, o analisador on-line está configurado para entregar um resultado de umidade a cada 1 (um) minuto de operação.

O presente projeto tem como objetivo o estudo comparativo dos resultados do parâmetro de umidade do carvão mineral, através da análise dos dados geradores pelos dois métodos disponíveis: analisador on-line e utilização de estufas.

Utilizando estas informações é possível criar um banco de dados de maior precisão para avaliação do desempenho operacional das caldeiras, permitindo análises de maior aderência técnica.

## II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

### A. Motivação

Posterior a instalação dos equipamentos de medição on-line, é necessário verificar os ajustes do sistema de controle e análise que geram os resultados de qualidade do carvão mineral. Este procedimento é necessário para compatibilizar o equipamento com o tipo de carvão mineral utilizado na região: betuminoso e subbetuminoso.

Além da necessidade da parametrização indicada, a comparação dos resultados de qualidade é necessária para validar o método de medição on-line.

### B. Metodologia

Os resultados e respostas a serem obtidos acerca da problematização apresentada neste artigo, foi utilizado o método de pesquisa exploratória. Este tipo de pesquisa visa oferecer informações e orientar a formulação das hipóteses do estudo Rauen [1].

Neste estudo de caso, a coleta de dados foi realizada através da comparação de técnicas, com a finalidade de analisar os dados do teor de umidade através dos dois métodos, no período compreendido entre maio e agosto de 2021.

A metodologia a ser aplicada levou em consideração os seguintes parâmetros:

### I. Estudo da tecnologia de análises por micro-

Artigo apresentado como requisito parcial para a conclusão do curso de Pós-Graduação em Sistemas de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL. Ano 2021. Orientador: Prof. Francielen Kuball Silva, Doutora.

<sup>1</sup> Pós-graduando em Sistemas de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica pela Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL. E-mail: ariel.brambilla@engie.com

ondas.

- II. Estudo das normas de amostragem, preparação e análise de carvão mineral.
- III. Definição do procedimento de amostragem.
- IV. Comparação dos resultados obtidos entre técnicas.

#### I -Tecnologias de Análises de Micro-ondas.

Segundo Hall [4] e Diaz [5], a determinação do conteúdo de umidade do carvão por meio de métodos elétricos, se baseia nas diferenças que sofrem as propriedades elétricas do carvão como consequência da umidade presente na amostra: variação da constante dielétricas para os métodos capacitivos e de micro-ondas, e variação da condutância para os casos de métodos resistivos.

Quando uma amostra de carvão atravessa um feixe de micro-onda, uma certa quantidade destas ondas será dispersa, sendo esta dispersão proporcional a quantidade de umidade presente na amostra. Essa dispersão ocorrerá através de três métodos: através da atenuação, que ocorre pela absorção da energia por parte da água da amostra, pelo defase, ocorrido quando as micro-ondas são redirecionadas ao atingirem a água da amostra, e pela reflexão das ondas.

Quando a amostra de carvão, contendo uma determinada umidade, atravessa um fluxo de micro-ondas estabelecido entre um emissor e um receptor, os três fenômenos acima descritos são observados, onde a variação entre a intensidade de ondas emitidas e aquelas recebidas, é proporcional a quantidade de umidade presente na amostra.

O equipamento instalado na usina Jorge Lacerda, determina a umidade da amostra com base nos efeitos de atenuação e de fase, sendo que junto do equipamento, estão instalados aparatos (capsula de Césio 137 e gerador de nêutrons rápidos). Pela presença destes aparatos, relevantes para análise de densidade e composição mineral do carvão respectivamente, os analisadores são enquadrados na normativa 3A, 7A e 7C da Norma CNEN NN-6.02 [11] (Comissão Nacional de Energia Nuclear), sendo necessária aplicação de critério de segurança de rádio proteção.

Segundo Diaz [5], dentre os fatores que influenciam no desempenho da medição on-line, destacam-se: densidade, teor de cinzas, granulometria, temperatura, espessura da camada e rank do carvão. Para densidade, temperatura e espessura da camada, o equipamento instalado reduz a incerteza associada pois possui integrado a sua estrutura, sensores e aparatos capazes de medir, temperatura e densidade, e controlar a espessura da camada (limitador de camada) O rank do carvão, por tratar-se de uma característica de jazida, não apresenta significativa variação no produto abastecido nas usinas, devido ao fato que mais de 80% do carvão recebido ser proveniente da mesma região carbonífera (Criciúma). Para o teor de cinzas e granulometria, o contrato de fornecimento prevê os seguintes limites operacionais: Granulometria fina (<0,6 mm) <15%, Granulometria grossa (>25,4mm) <10%. Para o teor de cinzas, o valor médio é 44%, sendo, que as entregas estão inseridas dentro do intervalo 41< % cinzas <45%. A Tabela 1 apresenta alguns dos parâmetros do carvão abastecido.

Mês	Teor de Cinzas do Carvão %	Granulometria fina (<0,6mm) %	Granulometria Grossa (>25mm) %
Janeiro	43,81	12,82	5,84
Fevereiro	43,78	13,46	5,76
Março	43,92	13,54	5,75
Abril	43,86	12,27	5,75
Mai	43,78	12,37	5,93
Junho	43,95	11,79	5,56
Julho	43,99	12,03	6,42

**Tabela 1: Parâmetros do Carvão**

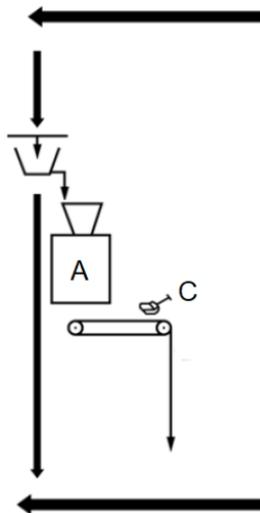
Fonte: Sistema de dados das usinas.

#### II -Amostragem de Carvão.

A amostragem de materiais granulados requer cuidadosa avaliação, sendo que diversas normas, livros e publicações buscam orientar as equipes envolvidas. O laboratório utilizou a NBR 8291 [5], e as práticas recomendadas por Chaves [2] e Speigh [3], para aquelas coletas realizadas sobre correia. Para obtenção do volume representativo de material, o fabricante requer amostragem por um período contínuo mínimo de 7 horas, onde adota-se a prática de dividir esse período em intervalos de 15 minutos. Cada evento de 15 minutos de coleta, deve gerar no mínimo 18kg de carvão, cada incremento é retirado a cada 20 segundos com a utilização de uma pá. Os incrementos são retirados de uma correia transportadora em operação e são acondicionados em sacos plásticos. Buscou-se sincronizar a coleta, através de uso de um cronometro e três colaboradores: um deles ditando o ritmo e intervalo das coletas, um auxiliando no manuseio dos sacos plásticos e o último tomando os incrementos da correia. Não é realizado revezamento das tarefas entre os colaboradores, conforme apontado nas boas práticas das normativas de coleta.

Dentre as diversas regiões possíveis de serem utilizadas para tomada de incrementos de carvão, buscou-se atender aos seguintes critérios: recomendações das normativas de coleta, escolha de uma região que permita a segura manipulação da pá, que respeite a ergonomia da atividade, que seja possível visualizar o fluxo de material transportado e que respeite uma distância de segurança do analisador, visto que este equipamento é enquadrado dentro nas normativas de rádio proteção, não sendo prudente a permanência contínua nos entornos (raio recomendado de 3 metros).

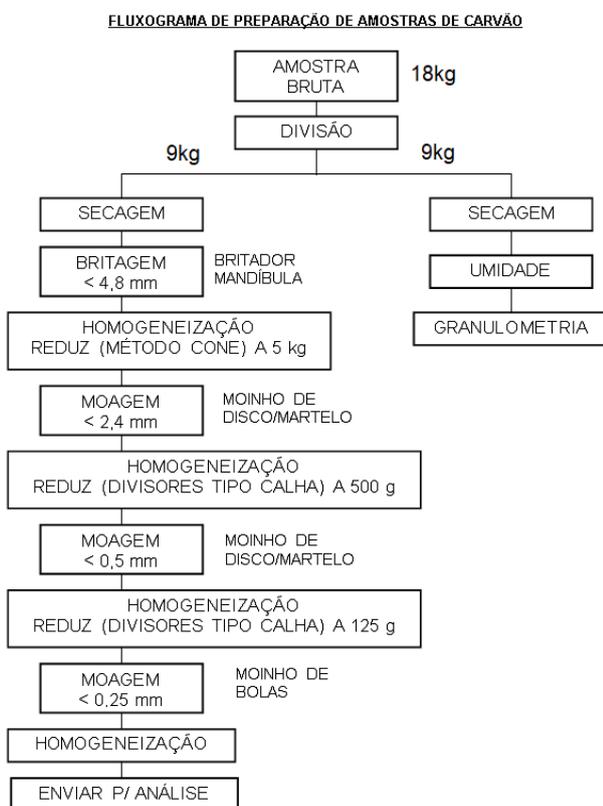
A Figura 1 indica o diagrama com a região física de coleta das amostras adotada no presente estudo, onde a letra A indica a posição do analisador on-line e o a letra C, o ponto de coleta manual.



**Figura 1: Ponto de coleta de material**  
Fonte: adaptação do autor.

### III -Preparação de Amostras.

Para a preparação das amostras coletadas, foram utilizadas as normas ASTM D2013 [10] e NBR 8292 [7]. São geradas 47 amostras de 18kg, onde cada amostra foi homogeneizada e reduzidas manualmente utilizando divisores do tipo rifle, que conforme Speigh [3] e Chaves [2], permite homogeneizar amostras de forma confiável. Para o comparativo dos resultados da umidade de carvão, devemos observar o lado direito da Figura 2, onde temos etapas reduzidas de preparação.



**Figura 2: Sequência de preparação**  
Fonte: adaptação do autor.

O lado esquerdo da Figura 2, corresponde a sequência de

moagem e reduções aplicadas conforme normativa técnica, necessárias para obtenção de amostras de carvão com características físicas (tamanho, umidade e massa) compatíveis com os equipamentos de análise do laboratório.

### IV -Ensaio de Umidade.

Para avaliação do teor de umidade das amostras de carvão, foi utilizada a norma ASTM D3302 [9]. As amostras de carvão bruto são despejadas e distribuídas em bandejas de aço inox de 910x750x50mm previamente pesadas vazias. Sequente à adição da amostra de carvão, nova pesagem é realizada e a amostra é enviada para secagem em estufa. A estufa tem sua temperatura controlada na faixa de 105 °C a 110°C, onde as novas pesagens são realizadas até obtenção de peso constante.

### C -Resultados.

Conforme indicado anteriormente, o analisador on-line gera um valor de umidade para cada minuto de operação. Como a coleta de cada amostra é sincronizada por tempo, com duração de 15 minutos, os dados gerados pelo analisador foram computados conforme sua média nesse intervalo. Como exemplo, para amostra 1, que foi tomada entre 14:30h e 14:45h, a média das 15 umidades geradas pelo analisador on-line, foi de 17,76%.

Para o primeiro evento de coleta, foram geradas 28 comparações de dados, sendo que o fabricante desconsiderou 4 coletas em virtude do analisador on-line não gerar resultados, as 24 amostras são apresentadas na Tabela 2. Esse evento foi realizado junto do comissionamento do equipamento, onde o analisador é configurado seguindo as parametrizações genéricas recomendadas pelo fabricante. Nesse ponto de operação, as configurações pré-determinadas não são completamente aderentes ao rank, ou tipo, de carvão da região do município de Criciúma/SC. Esse comportamento foi previsto por Diaz [5] e pelo fabricante, que solicita a realização de novos eventos de coleta.

Amostra	Umidade Laboratório (%)	Umidade On-line (%)	Diferença
Amostra 1	11,11	17,76	-6,65
Amostra 2	11,31	17,27	-5,96
Amostra 3	11,59	15,14	-3,55
Amostra 4	11,91	17,34	-5,43
Amostra 5	11,93	17,38	-5,45
Amostra 6	11,62	15,52	-3,90
Amostra 7	9,92	14,49	-4,57
Amostra 8	10,09	14,27	-4,18
Amostra 9	9,92	14,25	-4,33
Amostra 10	9,40	14,45	-5,05
Amostra 11	9,98	14,89	-4,91
Amostra 12	9,84	14,03	-4,19
Amostra 13	9,32	14,46	-5,14
Amostra 14	10,43	17,26	-6,83
Amostra 15	10,48	16,83	-6,35
Amostra 16	10,67	16,71	-6,04
Amostra 17	10,78	16,72	-5,94
Amostra 18	15,20	16,29	-1,09
Amostra 19	10,22	16,08	-5,86
Amostra 20	10,22	14,57	-4,35
Amostra 21	11,08	13,86	-2,78

Amostra 22	10,47	14,01	-3,54
Amostra 23	9,59	13,49	-3,90
Amostra 24	10,78	13,39	-2,61
Média	10,74	15,44	-4,69

**Tabela 2: Dados primeiro evento de coleta**

Fonte: adaptação do autor.

Posterior a realização de ajustes, um novo evento de coleta gerou 23 amostras para comparação conforme apresentando na Tabela 3. Neste evento, o laboratório gerou 28 análises de carvão através do ensaio de umidade, no entanto, o analisar on-line não gerou dados de umidade em 5 eventos.

Amostra	Umidade Laboratório (%)	Umidade On-line (%)	Diferença
Amostra 25	12,74	12,49	0,25
Amostra 26	12,83	12,65	0,18
Amostra 27	11,48	12,17	-0,69
Amostra 28	13,95	13,06	0,89
Amostra 29	12,52	11,6	0,92
Amostra 30	10,23	10,4	-0,17
Amostra 31	11,50	12,07	-0,57
Amostra 32	9,83	10,61	-0,78
Amostra 33	10,86	9,85	1,01
Amostra 34	10,00	9,71	0,29
Amostra 35	11,07	9,6	1,47
Amostra 36	9,37	10,89	-1,52
Amostra 37	11,11	11,96	-0,85
Amostra 38	11,15	12,03	-0,88
Amostra 39	10,61	12,19	-1,58
Amostra 40	11,16	12,13	-0,97
Amostra 41	10,04	12,28	-2,24
Amostra 42	10,55	11,22	-0,67
Amostra 43	10,9	10,17	0,73
Amostra 44	8,92	10,4	-1,48
Amostra 45	10,71	10,29	0,42
Amostra 46	9,56	9,97	-0,41
Amostra 47	11,42	10,97	0,45
Média	10,98	11,25	-0,27

**Tabela 3: Dados Segundo evento de coleta.**

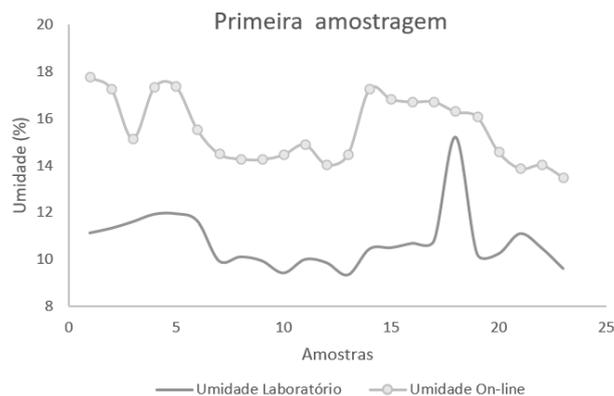
Fonte: adaptação do autor.

#### D -Discussões

As discussões serão baseadas na avaliação gráfica e numérica dos dados coletados.

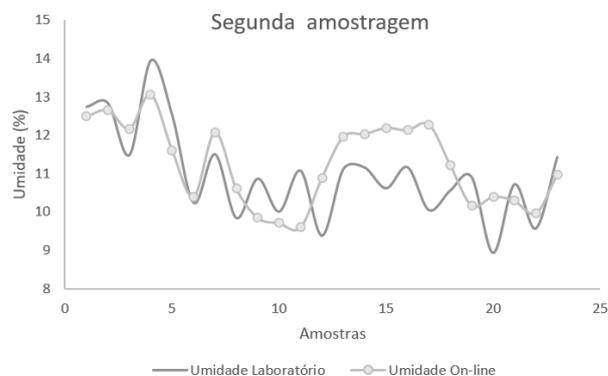
#### Método Gráfico

Através dos dados coletados nos ensaios de umidade, constantes nas Tabelas 2 e 3, foram elaboradas as Figuras 3 e 4 para uma melhor avaliação dos resultados.



**Figura 3: Primeira coleta**

Fonte: adaptação do autor.



**Figura 4: Segunda coleta**

Fonte: adaptação do autor.

Na primeira comparação (Figura 3) é observado o comportamento de acompanhamento entre técnicas e as amostras 4 a 12, com divergência de grandeza significativa.

Após ajustes por parte do fabricante, a Figura 4 indica dados de maior aderência entre técnicas. No entanto, ocorre significativa disparidade entre as amostras 11 a 20, período no qual não é notado o comportamento de acompanhamento entre as medições.

Para o segundo evento de coleta, a apresentação gráfica dos resultados, comparando ponto a ponto, fornece a Figura 5, onde temos elevada dispersão acima da linha central, indicando imprecisão da calibração.



**Figura 5: Diferença entre técnicas**

Fonte: adaptação do autor.

### Método Numérico

A determinação da raiz quadrada média, do termo em inglês RMSD, é uma das avaliações numéricas que permite quantificar a diferença obtida entre duas técnicas de análise, quando uma delas busca prever um parâmetro (amostrador on-line) enquanto a segunda apresenta dados provenientes de observação (estufas). Através desse indicador, pode-se dar magnitude a diferença entre os procedimentos, onde um valor pequeno indica uma forte correlação entre técnicas. Sua determinação é dada pela Equação 1.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (1)$$

Onde:

$x_i$  = umidade do analisador para  $i^{th}$  comparação

$y_i$  = umidade do laboratório para  $i^{th}$  comparação

$n$  = número de comparações

Para os dados da primeira coleta, indicados na Tabela 2, e aplicados na Equação 1, obtemos o seguinte RMSD:

$$RMSD = \sqrt{\frac{572,90}{24}} \quad RMSD = 23,87$$

Considerando os dados da segunda coleta, na Tabela 3, e aplicando na Equação 1, obtemos o seguinte valor para o conjunto de dados:

$$RMSD = \sqrt{\frac{22,41}{23}} \quad RMSD = 0,987$$

Segundo o fabricante do equipamento, para o intervalo compreendido entre de 4,5% e 17,3% de umidade, é possível obter um RMSD de até 1,15.

Considerando os dados de RMSD, a segunda coleta de dados apresentou resultado aceitável pelo fabricante. No

entanto, um valor pequeno de RMSD não é suficiente para validar o processo de calibração executado, o que ficou evidenciado pelos resultados expostos na Figura 4. Posterior a amostra 8, ocorre divergência significativa entre os resultados, onde o analisador indica a ocorrência de umidades na faixa 12% ao longo de uma série de medições, enquanto o laboratório indica valores variando entre 10 e 11,5%.

Considerando os dados da Tabela 3 e Figura 4, é verificada melhora do desempenho do equipamento. A Figura 5, que apresenta comparação ponto a ponto, possui dispersão elevada ao longo da reta de inclinação de 45°. Um analisador com calibração adequada, deve apresentar pontos em ambos os lados e próximos da reta, comportamento não observado nesse caso.

A combinação das técnicas gráficas e numéricas para avaliação do desempenho do analisador é evidente nesse caso, pois apesar do RMSD aceitável, indicando que a dispersão dos pontos em relação a reta de 45° da Figura 5 é aceitável, o comportamento de acompanhamento entre técnicas, observado na Figura 4, demonstra uma calibração pobre para alguns intervalos amostrados.

A Tabela 2 e Figura 3, correspondentes ao primeiro evento de coleta, indicam que a parametrização inicial do analisador não é adequada para o carvão da nossa região, tornando necessária aplicação de ajustes para obtenção de uma calibração pertinente.

Através da observação da média da segunda coleta, foi obtida uma diferença de 0,27% a maior para os resultados do analisador on-line. Este resultado era esperado em virtude da perda de umidade do carvão durante o processamento manual realizado com as amostras processadas nas estufas: coleta, transporte, quartamento, pesagem.

### III. CONCLUSÕES

A utilização de técnicas de medição on-line permite decisões estantaneas em virtude da quantidade e velocidade de informações geradas, já que o método tradicional demanda tempo de processamento, até a obtenção de uma informação representativa. Mesmo diante desse cenário, cuidados devem ser tomados, análises gráficas e numéricas realizadas para obtenção de uma parametrização adequada às características do combustível local.

Deve-se buscar a continuidade dos testes de comparação, visando obter calibração que atenda o critério RMSD e comportamento de acompanhamento entre técnicas.

### IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

#### Livros:

- [1] F. J. Rauen, Roteiro de iniciação científica: os primeiros passos da pesquisa científica desde a concepção até a produção e a apresentação, Ed 1, Unisul, 2015.
- [2] A. P. Chaves, Manuseio de sólidos granulados, 2nd ed., vol. 5, São Paulo, 2012 p 281, p293.
- [3] J. G. Speight, Handbook of coal analyses, vol I, New Jersey: Wiley, 2005, p 22.
- [4] D.A. Hall, J.C. Sproson, W.A. Gray, "The rapid determination of moisture in coal using microwave, Part 2, Plant Trial", Journal of Institute of Fuel, 1972.

#### Dissertações e Teses:

- [5] J. M. S. Díaz, "Corrección y mejora del análisis de humedad del carbón térmico por medios no destructivos en tiempo real," Tese de Doutorado, Dept. de Energía. Spa., Univ. de Oviedo, 2002, p47, p61,

*Normas:*

- [6] *ABNT Amostragem de carvão mineral bruto e/ou beneficiado, NBR 8291, Dez, 1983.*
- [7] *ABNT Preparação de amostras de carvão mineral para análises e ensaios, NBR 8292, Dez, 1983.*
- [8] *ABNT Carvão mineral determinação de umidade, NBR 8293, Dez, 1983.*
- [9] *ASTM Standard test method for total moisture in coal, ASTM D3302/D3302M, Jan, 2015.*
- [10] *ASTM Standard practice for preparing coal samples for analysis, ASTM D2013/D2013 M, Jan, 2012.*
- [11] *CNEN Licenciamento de instalação radiativa, CNEN nn 6.02, Mai, 2021.*