

## **CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO APLICADOS AO LICENCIAMENTO DE ACELERADORES DE PARTÍCULAS**

**Evaldo L. C. Costa<sup>1</sup> e Paulo F. F. Melo<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)  
Rua Gal Severiano, nº 90 - Botafogo  
22290-901 Rio de Janeiro - RJ - Brasil  
[evaldo@cnen.gov.br](mailto:evaldo@cnen.gov.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)  
Caixa Postal 68509  
21941-972 Rio de Janeiro – RJ - Brasil  
[frutuoso@nuclear.ufrj.br](mailto:frutuoso@nuclear.ufrj.br)

### **RESUMO**

Tomando como base as normas brasileiras de licenciamento nuclear, conduziu-se uma análise crítica dos parâmetros de classificação dos aceleradores de partículas, estabelecendo dois parâmetros-chave: o porte das instalações e sua energia de operação. A partir da experiência dos centros de pesquisas de diversas partes do mundo, onde há aceleradores de partículas de diversos portes e energias, verificou-se que esses dois parâmetros são obtidos a partir de especificações de projeto, de aspectos operacionais e tecnológicos, além das possíveis aplicações de partículas e radiações produzidas. Primeiramente, são apresentados os modelos preliminares de classificação, tomando como base os parâmetros-chave e auxiliares, individualmente, e depois, é definido o modelo final, a partir exclusivamente dos dois parâmetros-chave. São sugeridas algumas alterações nos critérios de classificação de aceleradores de partículas das normas brasileiras de licenciamento nuclear, bem como é proposta a continuação desse trabalho, considerando-se dois parâmetros adicionais relacionados aos fatores de risco dessas instalações e dos sistemas de segurança associados. Para o novo trabalho, serão tomadas como base algumas ferramentas analíticas de uso comum nas instalações nucleares: a informação de risco, uma de suas variações, o RISC, além de duas técnicas complementares, LOPA e SIL, que tem sua origem no conceito mais abrangente de análise de sistemas. Chama-se a atenção também para o fato da escassez dos dados de confiabilidade (comuns em análise envolvendo fatores de risco e de segurança), devido a diversos fatores, e as alternativas apontadas passam pelo uso de banco de dados genéricos e adoção de algumas instalações-referência que disponibilizam parte de seus dados publicamente.

### **1. INTRODUÇÃO**

A IAEA [1] estabeleceu um modelo de classificação de fontes de radiação e práticas associadas, com base no risco inerente a essas fontes e práticas, para apoiar o licenciamento de instalações não nucleares de seus países membros (e da comunidade nuclear mundial) que fazem uso dessas fontes em diversas aplicações na indústria, pesquisa e medicina; entretanto, não foram considerados neste modelo as fontes não seladas e os geradores de radiação ionizante.

Este trabalho pretende trazer à discussão a proposta de um novo modelo de classificação, voltado para os geradores de radiação ionizante, mais especificamente para os aceleradores de partículas, considerando dois parâmetros em especial: o porte dessas instalações e o patamar de energia em que elas operam, enfatizando-se os aceleradores de grande porte, que normalmente operam em maiores patamares de energia.

Motivado também pelo fato de que as normas brasileiras [2] não estabelecem um padrão de licenciamento adequado para esse porte de instalação, esse trabalho procurará rever a classificação existente, onde os geradores de radiação ionizante (incluindo os aceleradores de partículas), são considerados até o patamar de energia de 50 MeV.

Também será considerada a experiência de autoridades reguladoras nucleares de alguns países, com relação ao licenciamento de instalações nucleares, porém enfatizando as instalações que utilizam aceleradores de partículas em suas aplicações, sobretudo os de maior porte e patamar de energia, como os aplicados nos centros de pesquisa.

## **2. MODELOS DE CLASSIFICAÇÃO**

### **2.1. Considerações Iniciais**

A norma brasileira em questão [2] adota um padrão de classificação de instalações por tipos de fontes de radiação, das práticas associadas e riscos inerentes a essas instalações, divididas em oito grupos distribuídos em quatro partes: fontes radioativas seladas (grupos 1, 2 e 3), fontes radioativas não seladas (grupos 4, 5 e 6), geradores de radiação ionizante (grupo 7) e produção de radioisótopos (grupo 8).

O grupo 7 dessa norma [2], onde estão inseridos os aceleradores de partículas, é por sua vez, subdividido em quatro subgrupos, conforme abaixo:

- Subgrupo 7-A:  $E \leq 100 \text{ keV}$ ;
- Subgrupo 7-B:  $100 \text{ keV} < E \leq 600 \text{ keV}$ ;
- Subgrupo 7-C:  $600 \text{ keV} < E \leq 50 \text{ MeV}$ ;
- Subgrupo 7-D:  $E > 50 \text{ MeV}$ .

Ao iniciarmos a discussão dos modelos de classificação dos aceleradores de partículas, quanto ao seu porte e patamar de energia, iremos verificar as outras possibilidades de classificação, conforme sugerido pela literatura científica, tais como: tipo de partícula acelerada e radiações produzidas [3], tecnologia empregada no processo de aceleração e na trajetória das partículas aceleradas [4, 5, 6], aplicação da partícula acelerada ou das radiações produzidas, principalmente na indústria, medicina e pesquisa [7, 8, 9], entre outras possibilidades.

### **2.2. Classificação com base no Porte da Instalação**

Consultando-se a experiência de alguns países, principalmente quanto aos regulamentos e guias de suas autoridades reguladoras e outras instituições de apoio, a exemplo dos Estados Unidos da América [3, 10] e da Índia [11], bem como a visão da comunidade científica internacional representada pela IAEA [12, 13], verifica-se que essas instalações podem ser subdivididas em pequeno, médio e grande porte, conforme algumas características específicas que essas instalações apresentam.

A diferença entre o porte das instalações que utilizam aceleradores de partículas pode estar relacionada a uma série de fatores, tais como: quantidade de estágios ou módulos de

aceleração; dimensão dos aceleradores de partículas, seja em extensão (caso dos aceleradores lineares) ou em diâmetro (caso dos aceleradores circulares); quantidade de salas ou compartimentos para abrigar os sistemas auxiliares (refrigeração, vácuo, RF, alimentação elétrica, etc.) e eventuais áreas experimentais (linhas, cabanas e estações); existência de combinados ou complexos de aceleradores (envolvendo diferentes tecnologias), para atuar como estágios suplementares: pré-injetores, injetores, *booster*, etc.

Entretanto, se levarmos em conta as normas brasileiras [2], a classificação global deverá considerar também um nível inferior de aceleradores de partículas que não caracterizam de fato uma instalação, devendo ser classificados tão somente como equipamentos, que podem, a exemplo das instalações, serem subdivididos em pequeno, médio e grande porte.

A Tabela 1 apresenta uma classificação preliminar, levando-se em conta tão somente o porte dessas instalações, conforme as características discutidas acima.

**Tabela 1: Classificação preliminar dos aceleradores de partículas, conforme o porte da instalação.**

Porte da Instalação	Características do equipamento/instalação
<b>EPP</b>	Equipamentos de pequeno, médio e grande porte que não caracterizam necessariamente uma instalação
<b>EMP</b>	
<b>EGP</b>	
<b>IPP</b>	Instalação onde normalmente são utilizados EMPs e EGPs e justifica-se a existência de pelo menos uma sala (blindada ou não, dependendo do tipo de equipamento)
<b>IMP</b>	Instalação onde normalmente são utilizados EGPs e justifica-se a necessidade de mais de uma sala para comportar o acelerador de partícula e seus sistemas auxiliares, ou é composto de alguns estágios (de 2 a 3), normalmente conhecidos como <i>tandem</i> , muito comuns nos aceleradores <i>Van de Graaff</i> e <i>Pelletron</i>
<b>IGP</b>	Instalação composta de vários estágios de aceleração, grande dimensão na extensão (aceleradores lineares) ou no diâmetro (aceleradores circulares) ou quando constitui complexos de aceleradores de partículas de diversos tipos e tecnologias, normalmente com a seguinte configuração (ou parte dela): injetor, pré-injetor, <i>booster</i> e acelerador principal (normalmente um ou mais anéis de armazenamento ou acumuladores são utilizados para produzir radiação síncrotron, para colisão de feixes de partículas ou para outras funções e aplicações)

**EPP:** equipamento de pequeno porte; **EMP:** equipamento de médio porte; **EGP:** equipamento de grande porte; **IPP:** instalação de pequeno porte; **IMP:** instalação de médio porte; **IGP:** instalação de grande porte.

### 2.3. Classificação com base no Patamar de Energia

Na verdade, não existe um consenso na literatura especializada do que venha a ser um acelerador de partículas de baixa, média e alta energia, com as classificações variando conforme a situação, como por exemplo, a natureza da partícula acelerada ou a tecnologia dos aceleradores de partículas.

A NCRP [3] e a IAEA [12, 13], muito embora não estabeleçam diretamente uma classificação com base na energia dos aceleradores de partículas, constroem uma linha de raciocínio

semelhante na referência a alguns patamares específicos de energia, conforme a ocorrência dos fenômenos físicos e aspectos de proteção radiológica, entre outras formas de abordagem, com a primeira publicação oferecendo uma visão atualizada dessas questões em relação às duas últimas publicações, no que se refere aos aceleradores de elétrons [12] e de prótons [13].

Discutiremos aqui alguns parâmetros relativos aos aceleradores de partículas, que estabelecem uma relação com sua energia de operação, enfatizando-se os seguintes aspectos: quanto à ocorrência de fenômenos em nível nuclear, quanto à tecnologia empregada na aceleração e na trajetória das partículas e quanto à aplicação das partículas e respectivas radiações produzidas.

### 2.3.1. Aspectos fenomenológicos

Com relação aos fenômenos, cabe destaque à produção de nêutrons e a radiação de *bremstrahlung*, que são produzidos de acordo com a reação entre partícula acelerada e alvo (que pode ser o próprio ar, os componentes do acelerador e demais materiais contidos na circunvizinhança), conforme o intervalo de energia.

Nos aceleradores de elétrons (em todas as energias), *bremstrahlung* é a radiação secundária dominante; para energias acima de 100 MeV, um fenômeno conhecido como cascata eletromagnética passa a ser a maior fonte de preocupação do ponto de vista de proteção radiológica, principalmente quanto à blindagem e, diferentemente dos aceleradores de elétrons, a radiação de *bremstrahlung* não é significativa em aceleradores de prótons (ou mesmo de íons pesados), a não ser para maiores patamares de energia, na ordem de Tera-elétron-volt [3].

Já a produção de nêutrons, para os elétrons, ocorre em torno de 5 MeV nos materiais-alvo de núcleo pesado (as principais exceções são o deutério, com 2,2 MeV e o berílio, com 1,67 MeV), e entre 10 e 20 MeV para os de núcleo leve [4].

Na verdade, ela ocorre basicamente a partir de três processos: ressonância (fotonuclear) gigante - um dos processos fotonucleares mais marcantes na maioria dos materiais e a fonte de nêutrons mais importante para aceleradores de elétrons operando abaixo de 100 MeV - para energias abaixo de 30 MeV (normalmente ocorre entre 15 e 25 MeV); efeito pseudo-dêuteron, para um intervalo entre 30 e 300 MeV; e emissões de fotopíon, a partir de 140 MeV [3, 9].

Para prótons [3], a produção de nêutrons é basicamente descrita em três faixas de energia: à baixa energia, é considerada abaixo de 200 MeV, onde ocorrem as reações mais convencionais do tipo (p,n) em núcleos leves e de peso médio; para média energia, ocorre na faixa de 200 MeV a 1 GeV, de maneira significativa na forma de nêutrons de evaporação, juntamente com as cascatas hadrônicas; e para alta energia, na faixa acima de 1 GeV, com a produção de nêutrons ocorrendo, conjuntamente, com prótons e píons, a partir de energias na ordem de dezenas de Giga-elétron-volt.

Observa-se também [9] que acima de 1 GeV é observado o aparecimento de múons em aceleradores de elétrons; já para prótons, os múons (com limiar em torno de 200 MeV) passam a ser considerados importantes acima de 10 GeV e os neutrinos acima de 100 GeV,

com implicações para a proteção radiológica, principalmente quanto aos aspectos de blindagem.

Em aceleradores de prótons, acima de cerca de 500 MeV, é normal a ocorrência de feixes secundários de várias partículas, tais como píons, káons, múons, elétrons e positrons [3].

A produção de píons, em acelerador de prótons, passa a ser importante em torno de 300 MeV (com um limiar de 140 MeV); acima de 1 GeV, a produção de káons carregados passa a ser considerada importante (limiar em torno de 500 MeV); à medida que a energia de prótons aumenta, acima desses limiares, píons e káons passam a ser produzidos, tanto pelas partículas primárias, quanto pelas partículas secundárias energéticas presentes na cascata hadrônica; múons podem ser produzidos por decaimento de píons e káons, mas também podem ser por interação direta com alvos e outros componentes do acelerador.

Para aceleradores de prótons acima de 100 GeV, onde os efeitos das interações nucleares tornam-se mais significativos, os mecanismos de perda de energia para múons ficam mais complexos.

Cabe também destacar [9] que uma das diferenças entre os chamados aceleradores de prótons de baixa energia e os de alta energia, é que nos últimos predominam as interações que geram produtos de espalação, enquanto que nos primeiros a predominância é ditada pelos nêutrons de ativação; a diferença entre baixa e alta energia, nesse caso, é estabelecida a partir de um limiar de 400 MeV.

A Tabela 2 apresenta uma classificação preliminar dos aceleradores de partículas, considerando-se os fenômenos nucleares, à medida da variação do patamar de energia.

### **2.3.2. Aspectos tecnológicos**

A tecnologia dos aceleradores de partículas, conforme já discutido acima, tanto podem estar relacionadas ao processo de aceleração das partículas, quanto à trajetória das partículas aceleradas.

Quanto ao processo de aceleração [3, 12, 13], o mesmo pode ser dividido em aceleração direta ou indireta.

Na aceleração direta estão inseridos os geradores eletrostáticos de alta voltagem (Van der Graaff, Pelletron, etc.) e os transformadores de alta voltagem (Cockroft-Walton, Dynamitron, etc., também conhecidos como aceleradores em cascata); já a aceleração indireta pode ser dividida em ressonante (que aplicam fontes de RF ou microondas) ou por indução (que aplica o princípio de indução eletromagnética) [5].

Os ciclotrons, sincrociclotrons e microtrons são considerados aceleradores ressonantes; já os bétatrons operam por indução. Aceleradores lineares e síncrotrons, tanto podem ser ressonantes quanto por indução, dependendo da variação tecnológica empregada e da aplicação pretendida.

**Tabela 2: Ocorrência de interações nucleares, conforme a variação de energia das partículas aceleradas.**

Patamar de Energia	Acelerador de elétrons	Acelerador de prótons (e íons)
Todas as energias	Ocorrência de <i>Bremmstrahlung</i>	-
≈ 5 MeV	Produção de nêutrons em materiais-alvo de núcleo pesado	
10 – 20 MeV	Produção de nêutrons em materiais-alvo de núcleo leve	
< 30 MeV	Ressonância fotonuclear gigante	
> 100 MeV	Cascata eletromagnética	
≥ 140 MeV	Emissão de fotopíons	Limiar para produção de píons
< 200 MeV	-	Produção de nêutrons de baixa energia
≈ 200 MeV		Limiar para a produção de múons
30 – 300 MeV	Efeito pseudo-déuteron	-
≈ 300 MeV	-	Produção de píons torna-se mais significativa
< 400 MeV		Predominância dos nêutrons de ativação
≥ 400 MeV		Predominância dos nêutrons de espalação
≥ 500 MeV		Limiar para a produção de káons
200 – 1000 MeV		Produção de nêutrons de energia intermediária
≥ 1 GeV		Limiar para a produção de múons
10 GeV	-	Produção de káons torna-se mais significativa
≥ 100 GeV		Produção de múons torna-se mais significativa
		Limiar para a produção de neutrinos
		Efeitos das interações nucleares tornam-se mais significativas
≥ 1 TeV		Ocorrência de <i>Bremmstrahlung</i>

Aceleradores de partículas acima de 100 MeV são geralmente cíclotrons, síncrotrons ou aceleradores lineares; aceleradores eletrostáticos e suas variantes operam até o limite de 10 MeV e, no caso de apresentar *tandem*, pode chegar próximo de 50 MeV [3].

Os aceleradores lineares mais potentes atualmente podem acelerar elétrons até 800 MeV e prótons até 40 GeV; já os do tipo quadrupolo de radiofrequência ou RFQ podem acelerar íons com energias variando de dezenas de kV até alguns MV [4].

Para efeito de classificação, os aceleradores lineares podem ser divididos em três grupos, conforme a faixa de energia e a tecnologia de aceleração [8]: instalações de baixa energia, abaixo de 100 MeV; de média energia, entre 100 MeV e 1 GeV; e de alta energia, acima de 1 GeV; já outros autores [9] simplesmente estabelecem o limiar de 1 GeV, para diferenciar os aceleradores de prótons de baixa energia e alta energia.

Os aceleradores lineares de baixa energia são do tipo “tubos flutuantes” (DTL) e normalmente aceleram prótons; os de média energia podem empregar tanto os do tipo “cavidades acopladas” (CCL) quanto os do tipo supercondutor (SC), e normalmente aceleram elétrons; e os de alta energia empregam normalmente aceleradores de prótons do tipo SC.

No caso dos cíclotrons, os convencionais (campo fixo) podem chegar a acelerar prótons até um intervalo máximo de energia, variando de 20 a 30 MeV; sincrocíclotrons podem chegar até 1 GeV para prótons, o mesmo limite alcançado pelos cíclotrons isócronos [4].

Entretanto, alguns autores [7] apresentam uma maior variedade de cíclotrons isócronos que podem até ultrapassar esse limite; é bem verdade que os cíclotrons isócronos convencionais (do tipo “setor radial” ou RSC) nem sequer chegavam no patamar de 100 MeV, alcance que foi ampliado pelo avanço tecnológico, com algumas variações do projeto original.

Os cíclotrons de setor em espiral (SSC) podiam alcançar até 500 MeV; os de setores separados (SSRC), enfim, chegavam ao patamar de 1 GeV; os de órbitas separadas (SOC), principalmente quando aliados à tecnologia dos cíclotrons supercondutores, podiam alcançar até dezenas de Giga-elétron-volt.

Mas, uma tecnologia posterior aos cíclotrons isócronos, denominada “campo fixo de gradiente alternado” (FFAG), viria trazer os cíclotrons a um patamar de energias bem mais altas, podendo chegar até dezenas de Tera-elétron-volt.

Micrótrons operam normalmente com energias variando de 5 a 50 MeV; já os bétatrons podem chegar a alcançar energias até 300 MeV [4].

Para efeito de classificação, os micrótrons podem ser divididos em dois grupos, conforme o patamar de energia, a tecnologia empregada na aceleração e a trajetória das partículas [8].

O micrótron circular (ou clássico, também chamado de cíclotron de elétrons) opera na ordem de grandeza de dezenas de MeV; já o micrótron do tipo “*racetrack*” (devido ao formato adquirido pela trajetória das partículas), na faixa de centenas de MeV.

Síncrotrons convencionais (focalização fraca) podem alcançar energias até 100 GeV; já os de gradiente alternado (focalização forte) variam de 100 GeV até 1 TeV [4].

A fronteira de alta energia é considerada a partir do patamar de energia utilizado pelos colisores: hádrons, elétrons-positrons, elétron-próton e múons [8].

Colisores de hádrons normalmente operam na ordem de grandeza de  $10^3$  a  $10^5$  MeV; colisores hádrons-léptons, na faixa de 10 a  $10^2$  GeV para elétrons (léptons), aumentado por um fator multiplicativo de 10 para prótons (hádrons); colisores elétrons-pósitrons, na faixa de 10 a  $10^4$  GeV e colisores de múons, na faixa de  $10^3$  a  $10^4$  GeV [7, 8].

A fronteira de alta luminosidade é considerada a partir do patamar de energia utilizada pelas chamadas fábricas de partículas: mésons, léptons e neutrinos, operando normalmente na ordem de grandeza de  $10^3$  a  $10^4$  MeV [8].

Tecnologias emergentes, tais como as que envolvem campos de ondas combinados de plasma e laser preveem operações na faixa de energia de 10 a  $10^2$  TeV, podendo chegar a ordem de grandeza de  $10^3$  TeV (algumas unidades de Peta-elétron-volt).

As tabelas 3 e 4 apresentam uma classificação preliminar dos aceleradores de partículas relativamente às tecnologias empregadas no processo de aceleração das partículas e na

trajetória das partículas aceleradas, sendo que na Tabela 3 a classificação é feita independente da energia desses aceleradores, enquanto que na Tabela 4 considera-se a variação de energia.

Cabe destacar que foram consideradas as principais tecnologias utilizadas atualmente, incluindo as recentes inovações tecnológicas, na construção das tabelas 3 e 4.

### **2.3.3. Outros aspectos**

Dentre os diversos outros aspectos que podem ser considerados na classificação de aceleradores de partículas, com base no patamar de energia, destacam-se as diversas aplicações das partículas aceleradas e das radiações produzidas, na indústria, medicina e pesquisa.

A maioria dos aceleradores de elétrons comercialmente disponíveis, encontram-se na faixa de 1 a 50 MeV, aplicados nas áreas de radioterapia, processamento industrial e radiografia industrial; já os que operam acima de 100 MeV, são atribuídos às pequenas unidades de pesquisa; grande parte dos aceleradores utilizados em aplicações médicas e industriais operam na faixa de energia abaixo de 30 MeV, onde a radioatividade induzida não é considerada significativa [3].

Para efeito prático, alguns autores, a exemplo da IAEA [14, 15, 16] estabelecem para os aceleradores de partículas (principalmente o de elétrons) um limiar de 10 MeV para considerar a influência dos nêutrons de ativação; para prótons, entretanto, a NCRP [3] considera a ativação por partículas de baixa energia para patamares abaixo de 30 MeV.

Para processamentos industriais utilizando feixes de elétrons, as aplicações possíveis variam quanto ao patamar de energia também quanto ao tipo de tecnologia de aceleração [4].

No caso de processamento de materiais por irradiação, são utilizados feixes de elétrons variando de 200 keV até 3 MeV; já para indução de defeitos em dispositivos semicondutores, são utilizados feixes de elétrons de 5 a 14 MeV [8].

Os aceleradores podem ser do tipo linear de elétrons ou de aceleração direta de alta-voltagem, geralmente do tipo Dynamitron, de 2 a 4 MeV, ou de transformador de núcleo isolado (ICT), com 5 kV por divisor de voltagem; aceleradores lineares de elétrons de onda não-estacionária, na faixa de 5 a 15 MeV.

Nas áreas específicas de radiografia e tomografia, são utilizados aceleradores lineares de elétrons, normalmente do tipo onda estacionária, na faixa de 4 a 16 MeV; já na inspeção de segurança (cargas e assemblados), essa faixa se altera para de 2 a 9 MeV.

Ainda com relação à inspeção de segurança (explosivo e outras ameaças), podem também ser utilizadas fontes de nêutrons, classificadas em três faixas, com relação ao patamar de energia: aceleradores de íons (dêuterons) de baixa energia, na faixa de 50 a 150 kV, do tipo em cascata; aceleradores de íons (prótons e dêuterons) de média energia, na faixa de 500 kV até 2 MV, dos tipos eletrostático e RFQ; e aceleradores de íons (dêuterons) de alta energia, acima de 2 MV, dos tipos eletrostático ou cíclotron; ou aceleradores lineares de elétrons com energias abaixo de 10 MeV [4].



**Tabela 3: Tecnologia de aceleradores de partículas, conforme o princípio de aceleração e trajetória das partículas, independente do patamar de energia.**

ACELERADORES DE PARTÍCULAS						
Aceleração Direta (a)		Aceleração Indireta				
Geradores Eletrostáticos de Alta Voltagem	Transformadores de Alta Voltagem	Trajetória Linear		Trajetória Circular ou em Espiral		Complexo ou Combinado de Aceleradores
		Indução	Ressonância (RF, MW)	Indução	Ressonância (RF, MW)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Van de Graaff</li> <li>• Pelletron</li> <li>• Laddertron</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cockroft-Walton</li> <li>• Dynamitron</li> <li>• Tandetron</li> <li>• ICT</li> </ul>	LINAC - elétrons - íons	LINAC (elétrons) <ul style="list-style-type: none"> <li>• CCL</li> <li>• SC</li> <li>• FEL</li> </ul> LINAC (íons, prótons) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wideröe (SL)</li> <li>• Alvarez (DTL)</li> <li>• CCL</li> <li>• RFQ</li> <li>• SC</li> </ul>	Bétatron (elétrons)  Síncrotron (íons)	Cíclotron (íons) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Clássico (freq. fixa)</li> <li>• Isócrono (AVF)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ RSC, SSC, SSRC,</li> <li>SSC, SOC</li> </ul> </li> <li>• FFAG</li> </ul> Síncrocíclotron (íons, prótons)  Síncrotron (íons, prótons, elétrons) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Focalização Fraca</li> <li>• Focalização Forte (AG)</li> </ul> Microtrons (elétrons)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anéis de armazenamento</li> <li>• Anéis acumuladores</li> <li>• Colisores</li> <li>• Síncrotrons híbridos</li> <li>• Microtron de recirculação (<i>Racetrack</i>) - (elétrons)</li> <li>• Anéis FFAG</li> <li>• ERL</li> <li>• FEL</li> <li>• TBA</li> </ul>

(a) Com um único estágio, acelera íons e elétrons; em configuração *tandem*, apenas íons. RF – *radio-frequency* (radiofrequência - RF); MW – *microwave* (microondas); ICT – *insulation-core transformer* (transformador de núcleo isolado); LINAC – *linear accelerator* (acelerador linear); CCL – *coupled-cavity linac* (LINAC de cavidade acoplada); SC – supercondutor; SL – Sloan-Laurence; DTL – *drift-tube linac* (LINAC de tubos flutuantes); RFQ – *radio-frequency quadrupole* (quadrupolo de RF); AVF – *azimuthally-varying-field* (campo de variação azimutal); RSC – *radial-sector cyclotron* (cíclotron de setor radial); SSC – *spiral-sector cyclotron* (cíclotron de setor em espiral); SOC – *separated-orbit cyclotron* (cíclotron de órbitas separadas); FFAG – *fixed field alternating gradient* (campo fixo de gradiente alternado; AG – *alternating-gradient* (gradiente alternado); ERL – *energy recovery linac* (LINAC de recuperação de energia); FEL – *free electron laser* (laser de elétrons livres); TBA – *two beam accelerator* (acelerador de dois feixes).

**Tabela 4: Tecnologia dos aceleradores de partículas, conforme o patamar de energia.**

Patamar de Energia (MeV)	Tecnologia dos aceleradores (ref. Tabela 3)				
0 – 5	Geradores eletrostáticos e aceleradores em cascata (módulo simples) podem chegar até 10 MeV	RFQ variam de dezenas de kV até alguns MV	Aceleradores lineares de baixa energia, tipo DTL, normalmente aceleram prótons até 100 MeV	Cíclotrons clássicos (campo fixo) aceleram prótons até um faixa máximo de 20 a 30 MeV	
5 – 10		Microtrons circulares podem operar na faixa de 5 a 50 MeV			
10 – 50	Geradores eletrostáticos e aceleradores em cascata com módulos adicionais ( <i>tandem</i> ) podem alcançar 50 MeV				
50 – 100	Bétatrons podem operar de 20 até 300 MeV				Microtrons <i>Racetrack</i> podem alcançar centenas de MeV
100 – 500		Aceleradores lineares de energia intermediária, dos tipos CCL e SC, que normalmente aceleram elétrons de 100 MeV até 1 GeV	Cíclotrons isócronos do tipo SSC podem ampliar o alcance dos cíclotrons RSC até 500 MeV		
500 – 1000	-	Síncrotrons convencionais (focalização fraca) podem alcançar até 100 GeV	Aceleradores lineares de alta energia, do tipo SC, que normalmente aceleram prótons acima de 1 GeV, podendo chegar ao patamar de 40 GeV	Sincrocíclotrons e cíclotrons isócronos do tipo SSRC podem ampliar o alcance dos cíclotrons SSC até 1 GeV	
$10^3 - 10^4$	Fábricas de partículas podem operar nessa faixa			Cíclotrons isócronos dos tipos SC e SOC podem ampliar o alcance dos cíclotrons SSRC até dezenas de GeV	Colisores de hádrons operam nessa faixa; colisores hádrons-léptons, apenas para elétrons
$10^4 - 10^5$	Colisores elétrons-pósitrons operam nessa faixa				

Tabela 4: Tecnologia dos aceleradores de partículas, conforme o patamar de energia (continuação).

Patamar de Energia (MeV)	Tecnologia dos aceleradores (ref. Tabela 3)			
$10^5 - 10^6$	Colisores elétrons-pósitrons operam nessa faixa	Síncrotrons de gradiente alternado (focalização forte) ampliam o alcance dos síncrotrons convencionais até o patamar de 1 TeV	Ciclotrons FFAG atuam em patamares de energia bem superiores aos isócronos, podendo chegar a dezenas de TeV	Colisores hádrons-léptons operam nessa faixa para prótons
$10^6 - 10^7$		Colisores de múons operam nessa faixa		
$10^7 - 10^8$	Tecnologias atuais preveem a utilização de campos de ondas combinadas de laser e plasma, nesse patamar	-	-	-
$10^8 - 10^9$		-	-	-

CCL: *coupled-cavity linac* (acelerador linear de cavidade acoplada); DTL: *drift-tube linac* (acelerador linear de tubos flutuantes); FFAG: *fixed-field alternating-gradient* (campo fixo de gradiente alternado); RFQ: *radio-frequency quadrupole* (quadrupolo de radiofrequência); RSC: *radial-sector cyclotron* (ciclotron de setor radial); SC: supercondutor ; SOC: *separated-orbit cyclotron* (ciclotron de órbitas separadas); SSC: *spiral-sector cyclotron* (ciclotron de setor em espiral); SSRC: *separated-sector ring cyclotron* (anel de ciclotron separado por setor).

Aceleradores lineares de elétrons por indução são utilizados em instalações de radiografia ultra-rápidas (*flash X-ray*), com energias maiores que 10 MeV, normalmente no intervalo de 15 a 20 MeV [6].

Já para a área médica, a faixa de energia de 3 a 25 MeV cobre os principais aceleradores de partículas, incluindo os aceleradores lineares da radioterapia e os cíclotrons de pequeno porte (conhecidos popularmente como *baby-cíclotrons*) para a produção de radioisótopos de meia-vida curta emissores de pósitrons, para aplicação da técnica de PET [9].

Devem ainda ser considerados os bétatrons, que podem gerar raios-x para fins de radioterapia, operando com energias variando de 5 a 35 MeV; terapias menos convencionais podem utilizar feixes de prótons ou dêuterons, da ordem de  $10^2$  MeV, porém menores que 200 MeV [8].

Para a classificação de cíclotrons [9], os mesmos podem ser divididos em dois grupos: aqueles para produção de radionuclídeos para uso em PET, na faixa de 10 a 18 MeV e para outras aplicações, entre 40 e 50 MeV, considerados como cíclotrons de energia intermediária.

Já para outros autores [4], os cíclotrons utilizados na produção de radiofármacos, que aceleram prótons, dêuterons e partículas alfa, podem alcançar até um intervalo máximo de energia variando de 20 a 40 MeV, enquanto que os dedicados à produção de radionuclídeos para PET, operam com energias menores que 20 MeV (e são referidos como cíclotrons de baixa energia).

Na terapia com nêutrons, podem ser utilizados cíclotrons acelerando feixes de dêuterons, na faixa de 10 a 15 MeV; se for utilizado um acelerador linear de prótons, pode-se chegar até uma faixa de energia da ordem de dezenas de GeV [8].

Na terapia com prótons, podem ser utilizados sincrocíclotrons, cíclotrons isócronos e síncrotrons de prótons, podendo chegar a uma faixa de energia de 70 a 250 MeV; para terapia com íons pesados, normalmente feixes de carbono, pode-se aumentar esse patamar de energia até cerca de dezenas de GeV; para terapia com píons ainda não se tem informação de instalações operacionais, mas é previsto que para a geração de apenas um pión são necessários milhões de interações de feixes de prótons de 700 MeV.

Outra classificação [9] considera os cíclotrons e síncrotrons utilizados na terapia com hádrons: cíclotrons de prótons na faixa de 60 a 70 MeV, exclusivamente dedicados para tratamentos de tumores de olhos; cíclotrons ou síncrotrons (e em alguns casos, aceleradores lineares) até 250 MeV, para prótons, e na faixa de 350 a 400 MeV/núcleon, para íons, no tratamentos de tumores mais profundos.

Classificação semelhante é feita com relação aos aceleradores de partículas (principalmente cíclotrons e síncrotrons) utilizados em radioterapia com hádrons, referidos como aceleradores de energia intermediária de prótons e íons leves, na faixa de 100 a 400 MeV/núcleon.

Os anéis de armazenamento, que servem como fontes de radiação síncrotron, são divididos em três grupos, de acordo com a faixa de energia de operação: as consideradas de baixa

energia, abaixo de 2 GeV, são utilizadas para UV e raios-x moles; as de média energia, entre 2 e 4 GeV, para raios-x de energia intermediária e raios-x duros; e as de alta energia, entre 6 e 8 GeV, para raios-x duros e de maior energia [8].

Aceleradores lineares (ou simplesmente LINACs) também podem servir como fontes de radiação síncrotron, a partir de duas tecnologias – laser de elétrons livres (FEL) e LINAC de recuperação de energia (ERL), que operam na faixa de energia de  $10^3$  a  $10^4$  MeV.

Fontes de nêutron de espalação consistem em instalações com configurações híbridas geralmente envolvendo aceleradores lineares de prótons e síncrotrons (em alguns casos, também cíclotrons), operando na faixa de energia de  $10^2$  a  $10^3$  GeV.

Motores de prótons são fontes de prótons de alta intensidade, que operam (ou estão previstas de operar) na faixa de  $10^2$  MeV a  $10^3$  GeV, podendo servir para diversos propósitos: como fontes de nêutrons de espalação; para gerar superfeixes de neutrinos e de outras partículas secundárias de alta intensidade (káons, múons, píons, antiprótons, etc.); em experimentos com física de alta energia; utilizados como primeiro estágio de uma fábrica de neutrinos ou de um colisor de múons, nesse caso específico, operando na faixa de  $10^3$  a  $10^5$  MeV [8].

A tabela 5 apresenta uma classificação preliminar, com base nas principais aplicações dos aceleradores de partículas nas áreas industrial, médica e de pesquisa, conforme a variação da energia dos aceleradores, incluindo as últimas novidades de terapias menos convencionais de radioterapia e as aplicações no campo da energia nuclear (fusão, tratamento de rejeitos, partida de reatores nucleares subcríticos, etc.), além da incontável e cada vez mais crescente gama de aplicações em diversos campos da sociedade das instalações denominadas de fontes de luz síncrotron.

#### **2.4. Classificação Final**

A classificação final levará em conta a utilização de todos os parâmetros considerados acima, conforme representados pelas tabelas de 1 a 5, tomando-se como base de comparação a classificação das normas brasileiras de licenciamento nuclear [2].

Com relação aos grupos de licenciamento da norma da CNEN [2], não serão considerados os subgrupos 7-A e 7-B, por representarem, em sua maioria, geradores de radiação ionizante que não caracterizam necessariamente uma instalação, mas apenas um equipamento (de variados portes), salvo alguns casos específicos de instalações de pequeno porte (vide Tabela 1), como os aceleradores de elétrons de categoria I [14, 15, 16], denominados de auto-blindados.

A primeira modificação a ser proposta na norma da CNEN [2] está relacionada ao subgrupo 7-C, pois possui um intervalo muito extenso (de 600 keV até 50 MeV), envolvendo situações de naturezas diversas, que atualmente estão recebendo o mesmo tratamento.

Sugere-se uma quebra desse intervalo, a partir de 10 MeV, que está relacionado a alguns fatores, tais como o limiar prático a partir do qual se considera a produção dos nêutrons de ativação, principalmente nos aceleradores de elétrons (vide Tabela 2) ou ao fato das instalações de pequeno porte, principalmente na indústria e medicina, estarem compreendidas em torno desse patamar de energia (vide Tabelas 4 e 5).

**Tabela 5: Aplicações médicas, industriais e de pesquisa dos aceleradores de partículas, conforme o patamar da energia.**

Patamar de Energia (MeV)	Aplicações dos Aceleradores de Partícula			OBS		
	INDÚSTRIA	MEDICINA	PESQUISA			
0 – 5	-	Maioria dos aceleradores comercialmente disponíveis, aplicados nas áreas de radioterapia, processamento industrial e radiografia industrial, variam de 1 a 50 MeV, grande parte abaixo de 30 MeV.	-	(a)		
5 – 10						
10 – 50						
50 – 100			Terapia com prótons atuam a partir de 70 MeV	Fontes de prótons de alta intensidade, conhecidas como motores de prótons, atuam a partir de 100 MeV	(b)	
100 – 200			Terapias com feixes de prótons e de dêuterons operam normalmente nessa faixa		(c)	
200 – 250			Terapia com prótons podem chegar a 250 MeV		(b)	
250 – 500			Terapias com íons atuam a partir de 400 MeV/núcleon		(c)	
500 – 1000			Terapias com nêutrons podem chegar até 1 GeV			
			Terapias com píons estão previstas de operar a partir de um limiar de 700 MeV, para feixes de prótons (ainda não há instalações operacionais)			
$10^{+3} - 10^{+4}$			Terapias com íons pesados podem alcançar essa faixa, normalmente operando com íons de carbono		Fontes de radiação síncrotron operam normalmente na faixa de 2 a 8 GeV	(d)
$10^{+4} - 10^{+5}$			-		Motores de prótons podem alcançar até 1 TeV	(c)
$10^{+5} - 10^{+6}$					Fontes de nêutrons de espalação operam nessa faixa	(e)
$10^{+6} - 10^{+7}$					-	
$10^{+7} - 10^{+8}$						
$10^{+8} - 10^{+9}$						

- (a) Estão incluídos nesse bloco os ciclotrons utilizados na produção de radionuclídeos para PET, assim como os aceleradores lineares de elétrons e de íons, bem como os de aceleração direta, empregados na inspeção de segurança. (b) Na terapia com prótons podem ser utilizados ciclotrons (especialmente os isócronos), sincrociclotrons, sincrotrons e, em alguns casos, aceleradores lineares. (c) Entre as principais aplicações dos motores de prótons, estão: emissão de partículas secundárias de alta intensidade (káons, múons, píons, etc.), para experimentos com física de alta energia; primeiro estágio em uma fábrica de neutrinos e colisores de múons. (d) Essas instalações podem utilizar anéis de armazenamento (com base em aceleradores síncrotrons) ou outras tecnologias com instalações híbridas envolvendo aceleradores lineares e síncrotrons (tecnologias ERL e FEL). (e) fontes de nêutrons de espalação consistem em instalações com configurações híbridas envolvendo aceleradores de prótons e síncrotrons (e em alguns casos, também os ciclotrons). ERL: *energy recovery linac* (acelerador linear de recuperação de energia); FEL: *free electron laser* (laser de elétrons livres).

Com essa alteração, o atual subgrupo 7-C da norma da CNEN [2] seria substituído por dois novos subgrupos: o primeiro, de 600 keV até 10 MeV; o segundo de 10 a 50 MeV.

A segunda modificação refere-se à inserção de mais subgrupos, a partir de 50 MeV, ou seja, com influência direta sobre o atual subgrupo 7-D da norma da CNEN [2].

O primeiro ponto a ser considerado é se devemos manter o limite máximo em 50 MeV; em seguida, discutir quantos níveis de energia poderão ser incluídos, para considerar as instalações de grande porte (vide Tabela 1), principalmente as instalações que operam em patamares mais altos de energia (vide tabelas 4 e 5).

Deve-se observar que o patamar de 50 MeV adotado pela norma brasileira [2] tem correspondência com normas canadenses [17, 18], que classificam dois tipos de instalação nuclear: classe I, para os aceleradores de partículas com energia a partir de 50 MeV (subclasse IA) e classe II, para os aceleradores de partículas de energia inferior a 50 MeV, sendo que em ambas as classes não é considerada a natureza da partícula acelerada.

Além disso, consultando-se as tabelas preliminares de classificação, verifica-se que o intervalo de 10 a 50 MeV engloba os principais aceleradores da área médica, como os aceleradores lineares e os cíclotrons utilizados para a produção de radionuclídeos de meia-vida curta para PET e de outros radiofármacos (vide Tabela 5), além de que nesse intervalo a emissão de fotonêutrons torna-se mais significativa para os aceleradores de elétrons (vide Tabela 2).

Por outro lado, se avaliarmos o intervalo superior, de 50 a 100 MeV, embora haja outros tipos de aplicação nesse intervalo (vide Tabela 5), envolvendo também outras tecnologias de aceleração (vide Tabela 4), além de maior incidência de instalações de médio porte, se comparado ao intervalo imediatamente inferior (vide Tabela 1), não há alterações significativas nos efeitos das interações nucleares, já que para os aceleradores de elétrons o novo patamar para novos efeitos, a exemplo da cascata eletromagnética, é a partir de 100 MeV; situação semelhante ocorre para prótons e íons (vide Tabela 2), não justificando, portanto, a manutenção do patamar atual de 50 MeV.

Dessa forma, a segunda alteração a ser proposta na norma da CNEN [2] é a substituição do atual subgrupo 7-D por um novo subgrupo, com intervalo de 10 a 100 MeV.

A partir de 100 MeV, alguns fatos devem ser levados em conta:

I. Os limiares para efeitos importantes para os aceleradores de prótons e íons (vide Tabela 2):

- 200 MeV (nêutrons de baixa energia, abaixo desse valor);
- 300 MeV (produção de píons torna-se mais significativas, em torno desse valor);
- 400 MeV (limiar, abaixo do qual predominam os nêutrons de ativação e acima, os nêutrons de espalçamento);
- intervalo de 200 MeV até 1 GeV (nêutrons de energia intermediária);
- 1 GeV (produção de káons torna-se mais significativa, a partir desse valor);
- 10 GeV (produção de múons torna-se mais significativa, a partir desse valor);

- 100 GeV (produção de neutrinos torna-se possível e os outros efeitos nucleares ficam mais significativos; e
  - 1 TeV (emissão de radiação *bremstrahlung* torna-se possível);
- II. Os limiares para efeitos importantes para os aceleradores de elétrons: 140 MeV (emissão de fotopíons, a partir desse valor); 300 MeV (efeito pseudo-déuteron – limite superior) e 1 GeV (produção de múons, a partir desse valor) – vide Tabela 2;
  - III. Bétatron podem operar até 300 MeV e Microtrons *Racetrack* podem chegar a centenas de MeV, assim como os ciclotrons isócronos do tipo SSC, que podem chegar a 500 MeV (vide Tabela 4);
  - IV. Aceleradores lineares de energia intermediária (dos tipos CCL e SC), atuam na faixa de 100 MeV até 1 GeV, para elétrons, limite também alcançado pelos sincrociclotrons e ciclotrons isócronos do tipo SSRC; aceleradores lineares de alta energia (do tipo SC), podem ampliar esse limite para até dezenas de GeV (vide Tabela 4);
  - V. Aplicações médicas em terapias com feixes de prótons e de dêuterons podem alcançar uma faixa de 200 a 250 MeV; terapias com íons (normalmente, de carbono) podem operar a partir de 400 MeV/núcleon, sendo que íons pesados ampliam essa atuação para um intervalo de energia variando de 1 a 10 GeV; nessa mesma faixa de energia, operam as fontes de radiação síncrotron (seja com anéis de armazenamento ou com tecnologias ERL e FEL) – (vide Tabela 5);
  - VI. Variações de ciclotrons isócronos, podem ampliar o valor de 1 GeV, alcançado pelos sincrociclotrons, para dezenas de GeV, através das tecnologias SOL e SC;
  - VII. Síncrotrons de gradiente fixo (ou focalização fraca) ampliam ainda mais esse patamar, até 100 GeV, limite também alcançado pelos colisores de hádrons e hádrons-léptons (para os elétrons) – (vide Tabela 4);
  - VIII. Síncrotrons de gradiente alternado (ou focalização forte) ampliam ainda mais esse alcance, até o patamar de 1 TeV, alcançado pelos colisores hádrons-léptons (para os prótons) – (vide Tabela 4);
  - IX. Fontes de prótons de alta intensidade (motores de prótons), podem operar na faixa de 100 MeV até 1 TeV; fontes de nêutrons de espalação também podem alcançar o patamar de 1 TeV, porém operando a partir de centenas de GeV (vide Tabela 5).
  - X. Colisores de múons operam na faixa de até 10 TeV;
  - XI. Os ciclotrons FFAG podem chegar a alcançar até dezenas de TeV; e
  - XII. Tecnologias mais modernas, empregando campos de ondas combinadas de laser e plasma, podem ultrapassar esse limite, alcançando o patamar de PeV (vide Tabela 4).

Consideradas as principais possibilidades das situações que envolvem a operação dos aceleradores de partículas a partir de 100 MeV, é possível estabelecer o modelo de classificação final, considerando em primeira instância o porte das instalações e o patamar de energia em que operam, e em segundo plano a tecnologia empregada nesses aceleradores e as suas possíveis aplicações na sociedade.

A Tabela 6 apresenta esse modelo, com base nos elementos principais estabelecidos nas Tabelas 1, 2, 4 e 5, considerando ainda as observações acima.



### 3. DISCUSSÃO DO MODELO

Como pode ser constatado na Tabela 6, os objetivos propostos no início deste trabalho foram atendidos quanto à revisão do modelo normativo nuclear brasileiro [2], no que se refere a um modelo de classificação de aceleradores de partículas, para fins de licenciamento dessas instalações, uma vez que ampliou o patamar das energias, possibilitando maior especificação dos tipos de aceleradores, bem como maior amplitude das principais aplicações desse gênero da tecnologia nuclear na sociedade atual.

Nesse sentido, o êxito foi até superado, haja vista que o enfoque era para os aceleradores de maior porte e patamar de energia, comum nos centros de pesquisa, e o modelo acabou atendendo também aos de menor porte e energia, confirmando alguns aspectos da classificação original das normas da CNEN [2] e fazendo alguns pequenos ajustes.

Além de definir os patamares acima de 50 MeV, foram resolvidas as lacunas para os grupos normativos abaixo desse valor, principalmente com a criação dos grupos intermediários E3, I1 e I2, que inseriu novos patamares de energia, a partir do limitante de 10 MeV: o grupo atual 7-C [2] sendo substituído pelos novos grupos E3 (onde 10 MeV é o limite superior do intervalo) e I1 (onde 10 MeV é o limite inferior do intervalo).

Cabe citar ainda outra alteração proposta pelo novo modelo: a substituição do limitante de 50 MeV, que interferia nos grupos originais 7-C e 7-D da norma da CNEN [2], por um novo limitante, a partir de 100 MeV, para melhor se adequar ao padrão de classificação encontrado na experiência internacional.

Essa alteração mantém ainda o atendimento aos mesmos tipos de instalação, quanto as suas aplicações, ou ainda, aos riscos oferecidos pela eventual variação dos efeitos das interações nucleares, com relação ao patamar de energia das partículas aceleradas e respectivas radiações primárias e secundárias, já que no intervalo entre 50 e 100 MeV nenhuma dessas possíveis alterações mostrou-se significativa, com base na revisão bibliográfica apresentada na seção 2 desse trabalho, conforme resumida nas Tabelas 2, 4 e 5.

O estabelecimento dos novos grupos de classificação para energias acima de 100 MeV foram outra grande contribuição desse trabalho, coadunando-se cada vez mais com a tendência da comunidade científica internacional, quanto à definição de baixa, média e alta energia para esse gênero de instalações, fato que foi fortemente auxiliado pelo parâmetro “porte da instalação”, que permitiu maior facilidade na distribuição dos novos grupos, com a criação de dois níveis de grupos de médio porte (baixa e alta energia) e três níveis de grupos de grande porte (baixa, média e alta energia).

Por outro lado, verificou-se que o modelo obtido não é suficiente para estabelecer uma análise comparativa com a classificação feita pela IAEA [1], uma vez que essa última considera cenários específicos de acidentes radiológicos, conforme a variação das atividades das fontes radioativas seladas e o risco oferecido pela própria prática associada a essas fontes (ex.: gamagrafia industrial, irradiador industrial, radioterapia, etc.), conforme comprovado pela estatística de acidentes nessas práticas de maior risco, relatada pela IAEA [19, 20, 21] e outras fontes da literatura científica [22].

**Tabela 6: Classificação dos aceleradores de partículas, conforme o porte da instalação e o patamar de energia de operação.**

Porte da Instalação	Grupos normativos (CNEN, 2011)	Variação de energia (MeV)	Novo modelo de classificação (proposta)	Variação de energia (MeV)	Denominação do grupo de aceleradores de partículas no novo modelo de classificação
<b>EPP</b>	7-A	$E \leq 0,1$	E1	$E \leq 0,1$	Equipamentos de pequeno porte
	7-B	$0,1 < E \leq 0,6$	E2	$0,1 < E \leq 0,6$	Equipamentos de pequeno e médio porte
<b>EMP</b>	7-B		E3		Equipamentos de médio porte
<b>EGP</b>	7-C	$0,6 < E \leq 50$	I1	$0,6 < E \leq 10$	Equipamentos de grande porte
<b>IPP</b>			I2		Instalações de pequeno porte
<b>IMP</b>			I3	$10 < E \leq 100$	Instalações de médio porte de baixa energia
			I4	$100 < E \leq 1000$	Instalações de médio porte de alta energia
<b>IGP</b>	7-D	$E > 50$	I5	$10^{+3} < E \leq 10^{+4}$	Instalações de grande porte de baixa energia
			I6	$10^{+4} < E \leq 10^{+5}$	Instalações de grande porte de média energia
				$E > 10^{+5}$	Instalações de grande porte de alta energia

**EPP:** equipamento de pequeno porte; **EMP:** equipamento de médio porte; **EGP:** equipamento de grande porte; **IPP:** instalação de pequeno porte; **IMP:** instalação de médio porte; **IGP:** instalação de grande porte; **E1:** equipamentos nível 1; **E2:** equipamentos nível 2; **E3:** equipamentos nível 3; **I1:** instalações nível 1; **I2:** instalações nível 2; **I3:** instalações nível 3; **I4:** instalações nível 4; **I5:** instalações nível 5; **I6:** instalações nível 6.

#### **4. CONCLUSÃO**

O novo modelo de classificação de aceleradores de partículas proposto por este trabalho irá apoiar em futuras revisões das normas brasileiras de licenciamento nuclear [2], além de servir de base para outros trabalhos dentro do enfoque aqui proposto, no sentido de aperfeiçoamento do modelo.

Uma das possibilidades é a adoção de dois parâmetros adicionais neste modelo de classificação: os riscos dessas instalações (para trabalhadores, população como um todo e meio-ambiente) e os sistemas de segurança de combate a esses riscos, com o objetivo de eliminá-los ou, pelo menos, reduzir sua intensidade (na consequência dos possíveis danos e na frequência da ocorrência desses eventos); entretanto, será fruto de outro trabalho, dando continuidade à proposta aqui discutida.

Para esse novo trabalho, serão utilizadas algumas ferramentas analíticas muito comuns nas análises de risco e de segurança de instalações nucleares: a informação de risco (IR), a classificação com base em níveis de significância de segurança e informação de risco (RISC); além de duas outras, bem conhecidas na indústria química (onde tiveram origem), que são a análise de camadas de proteção (LOPA) e os níveis de integridade de segurança (SIL).

A informação de risco é importante, pois utiliza, em conjunto, as análises determinísticas e probabilísticas de segurança (que normalmente trilhavam caminhos em separado), para trazer o que cada tipo de análise tem de melhor, bem como compensar suas deficiências individuais.

Embora exista uma dificuldade natural de se adaptar a realidade da indústria nuclear (sobretudo os reatores de potência), às instalações menos complexas e de menor grau de risco (como as que possuem aceleradores de partículas), tem havido uma disseminação rápida do conceito de informação de risco, abrindo possibilidades para aplicação em outras áreas.

Nesse sentido, pelo menos três trabalhos da IAEA [23, 24, 25] podem ser citados, um deles voltado diretamente para aplicação de IR [24], enquanto os dois restantes tratam do tema de maneira indireta, através de análises probabilísticas de segurança (APS), um dos braços da informação de risco.

Cabe destacar que essas três publicações, embora não estabeleçam uma relação direta com a aplicação do modelo de análise aos aceleradores de partículas, consideram esse tipo de instalação no seu escopo.

A outra ferramenta, RISC, como o próprio nome implica, representa uma das muitas variações existentes com relação às possíveis aplicações da informação de risco, desempenhando um papel extremamente importante no desenvolvimento do novo trabalho, pois lida com critérios de classificação que levam em conta fatores de risco e de segurança, o que será bem útil no aperfeiçoamento do modelo que foi proposto neste trabalho.

A indústria nuclear aplica o conceito de RISC [26] para estabelecer o grau de comprometimento das estruturas, sistemas e demais componentes com a segurança da instalação; entretanto, os cenários e métricas de riscos utilizados como parâmetros de análise, não são de fácil adaptação a instalações como os aceleradores de partículas.

Outro documento da IAEA [27] deve ser destacado aqui, pois apresenta um conceito que pode simplificar bastante o trabalho da adaptação do modelo de instalações nucleares trazido não só pelo RISC, como também pela IR, e até mesmo pela APS, que por vezes, apresentam um roteiro muito rígido para se cumprir integralmente: a graduação de critérios (*graded-approach*), que estabelece uma relação de proporcionalidade entre o rigor na aplicação de critérios (como os de análise de riscos, por exemplo) e o grau de complexidade e risco da instalação sob análise.

Esse conceito viabiliza a adaptação de modelos mais complexos com maior grau de liberdade, permitindo que os roteiros não sejam necessariamente cumpridos em sua íntegra, tanto na profundidade quanto na completeza da abordagem do tema, à medida que a complexidade e, principalmene, o grau de risco da instalação sob análise, não exigir essa rigidez na adoção dos critérios.

Além disso, esse document da IAEA possui uma visão bem ampla e ilustrativa da aplicação dos conceitos de análise de risco e de segurança, voltada para instalações não nucleares (por exemplo, aceleradores de partículas), que antes somente eram encontradas em edições destinadas ao público de reatores nucleares e outras instalações nucleares do ciclo do combustível.

Surgem então as outras duas técnicas, LOPA e SIL, que podem auxiliar no encaminhamento de soluções alternativas para os problemas apontados acima, já que essas ferramentas simplificam a análise, por serem técnicas referidas como semi-quantitativas, criando assim uma ponte entre dois tipos de análise de naturezas tão diferentes: aquelas realizadas para instalações menos complexas e de menor risco (análise qualitativa) e as que são efetuadas para instalações do porte de reatores nucleares (análise quantitativa).

As técnicas de LOPA e SIL fazem parte de um contexto muito mais amplo, conhecido como segurança de sistemas, conceito que revolucionou, já a partir do final do século passado, o histórico da evolução dos conceitos de segurança nas indústrias de risco, e que foi disseminado a partir da criação de normas, com ênfase para as normas IEC [28, 29, 30].

O conceito de LOPA, por sua vez, teve origem na indústria química, a partir do trabalho desenvolvido pela CCPS/AIChE [31], que permitiu uma rápida expansão dessa nova concepção de análise de risco e de segurança, até que chegou a indústria nuclear.

A ampla utilização da LOPA às instalações nucleares não é nenhuma surpresa, já que apresenta um modelo que carrega muita semelhança com outro conceito bastante empregado na indústria nuclear: a defesa em profundidade (DID), com destaque para um trabalho da IAEA [32] na disseminação do tema.

A relação da ferramenta LOPA com a informação de risco, embora não seja direta, estabelece um ótimo ponto de contato, através da semelhança de sua modelagem com a DID, por sua vez, parâmetro vital na análise determinística de segurança (ADS), o outro braço de IR.

Não é muito diferente no caso da ferramenta SIL, já que a hierarquização estabelecida pelos níveis de integridade de segurança das estruturas, sistemas e demais componentes (SSC) da instalação, apresenta certa semelhança com a modelagem de RISC, que por sua vez,

estabelece uma classificação dos SSC da instalação, com relação à sua importância para a segurança.

Outro ponto favorável é que as ferramentas de LOPA e SIL, por terem a mesma origem, a partir do nascimento do conceito de sistemas de segurança, se completam, facilitando sua utilização em conjunto.

A maior dificuldade reside na tipologia dos dados tratados por essas ferramentas (IR, RISC, LOPA, SIL), todas relacionadas à confiabilidade de SSC da instalação, tais como: taxa de falhas, frequência de eventos perigosos ou impactantes, etc., pois esses dados normalmente são tratados como informação sigilosa pela organização dessas instalações, aumentando-se o rigor no controle de informação, à medida que se aumenta o risco dessas instalações.

Grande parte desse controle rígido está refletida no temor a eventuais sabotagens (em alguns casos, envolvendo até ataques terroristas), o que vem aumentando a dificuldade na disponibilidade de dados de confiabilidade, sobretudo quando relacionados às SSC de segurança de instalações de risco, também tem reflexo nos aceleradores de partículas, pois os centros de pesquisa tem adotado a mesma postura com relação à confidencialidade desses dados, inviabilizando o seu acesso à comunidade científica em geral, a não ser aos usuários específicos dessas organizações.

A alternativa é a utilização de dados genéricos, disponíveis em diversos bancos de dados, conforme os publicados pela IAEA, NRC, entre outros, que permite uma aproximação do valor real, sobretudo quando é feito o tratamento de dados adequado.

Além disso, existem instalações que tornam parte desses dados disponíveis para consulta pública, o que permite eleger algumas instalações-referência para apoiar as análises de risco e de segurança, como alguns centros de pesquisa do DOE e de universidades norte-americanas, também na Europa, e em menor grau nos demais continentes.

Nesse sentido, a realidade das instalações brasileiras, bem como seu histórico de licenciamento nuclear, não oferece grande contribuição, a não ser que seja realizado um estudo de caso com algumas dessas instalações, que são em número pequeno, com destaque para a de maior porte, o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, uma fonte de luz síncrotron de segunda geração (2G), com ambições futuras de se transformar em terceira geração (3G); entretanto, seria um trabalho de longo prazo, fugindo ao objetivo aqui proposto.

Cabe citar uma publicação da ICRP [33], que traz outro contexto de análise de riscos, com fatos exemplos ilustrativos de cenários de acidentes, onde é feita uma abordagem de APS, com a utilização de árvores de falha e de eventos, sendo que parte desses exemplos envolvem aceleradores de partículas, que pode de alguma maneira auxiliar nesses estudos.

Por fim, deve ser observado que o conhecimento das características das interações nucleares em laboratório estão restritas aos limites em energia de 100 GeV para elétrons e de 1 TeV para prótons [2], o que implica em dizer que muitas das inferências feitas aqui, para aceleradores de partículas atuando acima desse limite, ainda não puderam ser confirmadas em observações experimentais, mas apenas nas estimativas de cálculo e de modelagem computacional, que a tecnologia atual oferece.

Ou seja, futuramente, esses patamares de energia podem sofrer algumas modificações, tanto em função dos avanços tecnológicos dos próprios aceleradores de partículas (utilização de materiais supercondutores nas estruturas de aceleração e focalização), quanto em novas aplicações sociais das partículas aceleradas e radiações geradas, principalmente nas inovações de terapias médicas pouco convencionais, aplicações na área de energia nuclear (fusão, tratamento de rejeitos, partida de reatores subcríticos, etc.), a partir das fontes de prótons de alta intensidade, os chamados motores de prótons e dos nêutrons de espalação, além de maior possibilidade de exploração da matéria, com a física de altas energias.

Sem contar a diversidade crescente das aplicações em variados campos da ciência e da indústria, com as cada vez mais potentes (em energia e luminosidade) fontes de radiação síncrotron, principalmente na 3ª e 4ª geração (4G) dessas instalações, com o advento dos chamados dispositivos de inserção (3G), que otimiza a focalização dos feixes de partículas, e das tecnologias de ERL e FEL (4G), que aumentam esse potencial.

Por fim, cabe considerar que todos esses avanços poderão trazer novas implicações quanto aos riscos oferecidos, impactando em novas filosofias de segurança e consequentemente na necessidade de revisar os modelos de licenciamento atualmente válidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Categorization of Radioactive Sources*, Safety Standards Series No. RS-G-1.9 (IAEA Safety Guide Series), IAEA, Vienna (2005).
2. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), *Licenciamento de Instalações Radiativas*, Resolução 112, CNEN, Rio de Janeiro (2011).
3. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), *Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities*, NCRP Report No. 144, NCRP, Bethesda (2005).
4. R. Hellborg, *Electrostatic Accelerators: Fundamentals and Applications*, Particle Acceleration and Detection Series, Springer Berlin Heidelberg, New York (2005).
5. S. Jr. Humphries, *Principles of Charged Particle Acceleration*, John Wiley and Sons, Albuquerque (1999).
6. K. Takayama, R. J. Briggs, *Induction Accelerators*, Particle Acceleration and Detection Series, Springer Berlin Heidelberg, New York (2011).
7. A. W. Chao, W. Chou, *Reviews of Accelerators Science and Technology*, v. 1, World Scientific, London (2008).
8. A. W. Chao, H. O. Moser, Z. Zhao, “Accelerators Physics, Technology and Applications”, *International Accelerator School*, Overseas Chinese Physics Association (OCPA), Singapore, 2002, World Scientific, London (2004).
9. G. R. Stevenson, V. Vylet, “Accelerator Radiation Protection”, *Radiation Protection Dosimetry*. v. 96, n. 4 (Special Issue), NTP, Norwich (2001).
10. U.S. Department of Energy (DOE), *Accelerator Facility Safety Implementation Guide for DOE O 420.2B, Safety of Accelerator Facilities*, DOE G 420.2-1, DOE, Washington (2005).
11. Atomic Energy Regulatory Board (AERB), *Safety Guidelines on Accelerators*, Guideline No. AERB/SG/IS-5, AERB, Mumbai (2005).

12. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators*, Technical Report Series No. 188, IAEA, G. R. Swanson (ed.), Vienna (1979).
13. International Atomic Energy Agency. Vienna (IAEA), *Radiological Safety Aspects of the Operation of Proton Accelerators*, Technical Report Series No. 283, IAEA, R. H. Thomas, G. R. Stevenson (eds.), Vienna (1988).
14. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities*, Safety Series No. 107 (IAEA Safety Guide Series), IAEA, Vienna (1992).
15. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Safety of Radiation Generators and Sealed Radioactive Sources*, Safety Standards No. RS-G-1.10 (IAEA Safety Guide Series), IAEA, Vienna (2006).
16. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation Facilities*, IAEA Safety Standards No. SSG-8 (IAEA Specific Safety Guides), IAEA, Vienna (2010).
17. Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), *Class I Nuclear Facilities Regulations*, Nuclear Safety and Control Act, CNSC, Ottawa (2000).
18. Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), *Class II Nuclear Facilities and Prescribed Equipment Regulations*, Nuclear Safety and Control Act, CNSC, Ottawa (2000).
19. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Lessons Learned from Accidents in Industrial Irradiation Facilities*, IAEA, Vienna (1996).
20. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Lessons Learned from Accidents in Industrial Radiography*, Safety Series No. 7 (IAEA Safety Report Series), IAEA, Vienna (1998).
21. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Lessons Learned from Accidental Exposures in Radiotherapy*, Safety Series No. 17 (IAEA Safety Report Series), IAEA, Vienna (2000).
22. P. Ortiz, M. Oresegun, J. Wheatley, "Lessons from Major Radiation Accidents", *Tenth International Radiation Protection Association*, IRPA 10, May 2010, Hiroshima (2010).
23. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Procedures for conducting probabilistic safety assessment for non-nuclear reactor facilities*. TECDOC-1267, IAEA, Vienna (2002).
24. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Risk informed regulation of nuclear facilities: Overview of the current status*, TECDOC-1436, IAEA, Vienna (2005).
25. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Case studies in the application of probabilistic safety assessment techniques to radiation sources: Final report of a coordinated research project 2001-2003*, TECDOC-1494, IAEA, Vienna (2006).
26. Nuclear Energy Institute (NEI), *10 CFR 50.69 SSC Categorization Guideline*, NEI, Washington, DC (2005).
27. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Safety Assessment for Facilities and Activities*, Safety Standards Series No. GSR Part 4 (General Safety Requirement Series), IAEA, Vienna (2009).
28. International Electrotechnical Commission (IEC), *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*, Publication 61508 (Parts 1, 3, 4 and 5), IEC, Geneva (1998).
29. International Electrotechnical Commission (IEC), *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*, Publication 61508 (Parts 2, 6 and 7), IEC, Geneva (2000).

30. International Electrotechnical Commission (IEC), *Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector*, Publication 61511 (Parts 1, 2 and 3), IEC, Geneva (2003).
31. Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers (CCPS/AIChE), *Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment*, CCPS/AIChE, New York (2001).
32. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Defense in Depth in Nuclear Safety*, INSAG-10 (INSAG Series), International Nuclear Safety Advisory Group (INSAG), IAEA, Vienna (1996).
33. International Commission of Radiation Protection (ICRP), *Protection from Potential Exposures: Application to Selected Radiation Sources*, Publication 76, ICRP, Elsevier Science, New York (1997).