1 2 9 0

UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Mykola Oleynyk

PERFIS DE EMISSIVIDADE NEUTRÓNICA EM FUSÃO NUCLEAR

ALGORITMOS DE TEMPO-REAL APLICADOS AO ITER;

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado de Engenharia Física ramo de Instrumentação orientada pelo Doutor Nuno Cruz e Coorientador Doutor João Cardoso e apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra

Outubro 2020

Resumo

O trabalho apresentado nesta dissertação discute o desenvolvimento de algoritmos e ferramentas de tempo-real para o cálculo de medidas físicas relevantes para o controlo da taxa de fusão em experiências de fusão. Este trabalho tem por objetivo implementar numa arquitetura digital de processamento o monitor de perfis da emissividade neutrónica para o tokamak ITER.

Os algoritmos discutidos foram projetados para usufruir das características dos detetores de cintilação, conhecidos como cintiladores, através das quais é possível distinguir diferentes tipos de radiação, de acordo com a forma do impulso elétrico. Serão apresentadas as limitações e as implementações dos algoritmos, realçando as soluções e as otimizações que possibilitam a utilização dos algoritmos em tempo-real. O algoritmo usado no código final foi o de Comparação de Carga que melhor satisfazia as necessidades requeridas.

Nesta dissertação são também discutidos o problema do empilhamento de impulsos, da deteção da linha de base, do algoritmo de deteção de impulsos e do limite de taxa de contagens devido à capacidade de processamento digital. São apresentadas possíveis soluções para mitigar o impacto destas dificuldades no resultado final das medidas realizadas. São apresentadas diferentes abordagens dos problemas, como a utilização do paralelismo como alternativa para atingir uma melhor performance.

No final da dissertação são discutidos os resultados obtidos com o trabalho desenvolvido, demonstrando que foi possível atingir 10 milissegundos com a média de 8,6 milissegundos de processamento para 20 mil eventos usando algoritmos sequenciais. Com a utilização da placa gráfica os melhores resultados rondam nos 26 milissegundos pelo que é o algoritmo sequencial que é sugerido para utilização em tempo-real na câmara radial de neutrões.

Abstract

The work presented in this dissertation discusses the development of real-time algorithms and tools for the calculation of relevant physical measures for the control of the fusion rate in fusion experiments. This work aims at implementing in a digital processing architecture the neutron emissivity profile monitor for the ITER tokamak.

The discussed algorithms were designed to take advantage of the characteristics of scintillation detectors, the so-called scintillators, through which it is possible to distinguish different types of radiation, according to the shape of the electrical pulse. The limitations and implementations of the algorithms will be discussed, highlighting the solutions and optimizations that enable the use of the algorithms in real time. The algorithm used in the final code was that of Charge Comparison that best met the requirements.

In this dissertation, the problem of pulse stacking (pile-up), baseline detection, pulse detection algorithm and count rate limit due to limited digital processing capabilities are also discussed. Possible solutions are presented to mitigate the impact of these difficulties on the final result of the measures taken. Different approaches to problems are presented, such as the use of parallel processing as an alternative to achieve better performance.

At the end of the dissertation, the results obtained with the developed work are discussed, demonstrating that it was possible to reach 10 milliseconds with an average of 8.6 milliseconds of processing for 20 thousand events using sequential algorithms. With the use of the graphics card, the best results are around 26 milliseconds, so it is the sequential algorithm that is suggested for use in real time in the radial neutron chamber.

Palavras chave

Câmara radial de neutrões	Neutron radial camera
Discriminação de neutrões e radiação gamas	Discrimination of neutrons and gamma radiation
Empilhamento de impulsos	Pile-up
Algoritmos de tempo real	Real-time algorithms
Processamento de impulsos	Impulse processing
Tokamak	Tokamak

Índice

Resumo I

Abstract II

Palavras chave III

Índice de Figuras VI

Índice de Tabelas VIII

Índice de Algoritmos IX

Índice de Equações X

1. Introdução 1

1.1. Fusão Nuclear 3

1.1.1. Uma nova fonte de energia 3

1.1.2. Princípios Físicos 3

1.1.3. Confinamento 6

1.1.3.1. Confinamento Gravitacional 6

1.1.3.2. Confinamento Inercial 7

1.1.3.3. Confinamento magnético 8

1.1.4. Tokamaks 10

1.1.4.1. Este será o sucessor do Joined European Torus – JET. JET 10

1.1.4.2. ITER 11

1.1.4.3. Diagnósticos de Tokamaks 13

1.2. Diagnóstico de Neutrões 14

1.3. Motivação 15

1.4. Objetivos 15

1.5. Estrutura da dissertação 16

2. Estado de Arte 18

2.1. Empilhamento de impulsos 18

2.1.1. Método de ajuste do impulso 18

2.1.2. Discriminador de impulso diferencial 19

2.1.3. Discriminador de nível inferior 20

2.1.4. Correção estatística 20
2.2. Discriminação de partículas 21
2.2.1. Comparação de carga (CC) 21
2.2.2. Ajuste de curva (CF) 22
2.2.3. Reconhecimento de padrões 23
2.2.4. Comparação dos métodos 23
3. Ferramenta de visualização 26
4. Algoritmos 31
4.1. Abordagem 34
4.2. Threshold 34
4.3. Base e Empilhamento 35
4.4. Discriminação de partículas 37
4.5. Correção estatística dos espetros. 39
4.6. Implementação do algoritmo em tempo real 40
4.7. Performance 45
4.8. Testes preliminares para utilização de GPUs 46
4.8.1. Implementações 46
4.8.2. Resultados 46
4.8.3. Avaliação de resultados 47
5. Conclusão 48
6. Trabalho futuro 50
Referências ..... A

Índice de Figuras

Figura 1-1: Produção de energia Mundial para diferentes tipos de combustíveis (world-energy-outlook) [1] 1
Figura 1-2: Emissões de dióxido de carbono por diferentes fontes de energia (world-energy-outlook) [1] 2
Figura 1-3: Relação entre as energias de ligação nuclear e a massa atômica de alguns elementos (http://www.dlt.ncssm.edu/tiger). 4
Figura 1-4: Secção eficaz em função da energia cinética para reações principais de fusão [2] 5
Figura 1-5: Fusão nas estrelas 7
Figura 1-6: As quatro fases da fusão inercial por compressão direta por lazeres: 1-Absorção de energia. 2-Compressão e transporte de energia. 3-Reação de fusão. 4-Emissão de energia. 8
Figura 1-7: Campos magnéticos e as bobinas num dispositivo do tipo tokamak [4] 9
Figura 1-8: Apresentação esquemática de um dispositivo do tipo Stellarator [2] 9
Figura 1-9: JET tokamak 10
Figura 1-10: Comparação de JET e ITER 11
Figura 1-11: ITER TOKAMAK (1-Magnetes ,2-câmara de vácuo, 3-Cobertor, 4-Deivertor, 5-Cryostat) [4] 12
Figura 1-12: ITER edifício central [4] 13
Figura 1-13: Radial Neutron Camera (Câmara radial de neutrões) [6] 14
Figura 2-1.Pulsos cintiladores e diferença de primeira ordem: (a) cintilador de LSO, (b) cintilador de NaI (IT) [9] 19
Figura 2-2 : Gráficos de pontos da carga (unidades arbitrárias) vs. máximo do pico pelo método de comparação de carga; (a) baixo ganho, (b) alto ganho [10] 22
Figura 2-3: Gráficos de pontos para constante de decaimento vs. máximo do pico para ajuste de curva; (a) baixo ganho, (b) alto ganho [10]. 22
Figura 2-4: Gráficos de pontos para o ângulo (rad) vs. máximo do pico para o método de reconhecimento de padrões; (a) baixo ganho, (b) alto ganho [10] 23
Figura 2-5: FOM vs. máximo do pico para o reconhecimento de padrões, ajuste de curva e comparação de carga [10] 24
Figura 3-1: Ferramenta de Visualização – início 26
Figura 3-2: Ferramenta de Visualização - 20 janelas com empilhamento de 2 impulsos 27
Figura 3-3: Ferramenta de Visualização - Charge plot 28
Figura 3-4: Ferramenta de Visualização – Calibração 29
Figura 3-5: Ferramenta de Visualização – espetros 29

Figura 4-1: Gráfico da Carga em função de energia das partículas com a reta de separação do tipo de partículas. (Os neutrões acima da reta e gamas abaixo) 33
Figura 4-2: Zoom da Figura anterior 34
Figura 4-3: Empilhamento (dados de uma janela como empilhamento e a sua diferenciação) 36
Figura 4-4:Histograma 2D da carga em função de energia 37
Figura 4-5: FOM para diferentes cargas 38
Figura 4-6: Tempos de execução do algoritmo para Streams de 20mil eventos. 45
Figura 4-7: Tempos de execução do algoritmo paralelo usando a GPU para Streams de 20mil eventos 47
Figura 5-1: Carga em função da energia num gráfico de densidades. 48
Figura 5-2: Espetros de neutrões e radiação gama para dados Run #17 obtidos em Frascati Neutron Generator em onze de janeiro de 2018 49

Índice de Tabelas

Tabela 2.2-1: Tempos de processamento de 50000 impulsos para os vários métodos [10] 24

Índice de Algoritmos

Função 4.6-1: Length - Tem como entrada o stream de dados e como saída o comprimento de cada evento 41
Função 4.6-2: PileUp - Deteção de empilhamento e cálculo da Base 43
Função 4.6-3: Energy - Cálculo da energia e discriminação do tipo de partícula 44

Índice de Equações

Equação 2.1-1: Modelação do impulso (duas gaussianas) 18
Equação 2.1-2: Fator C - usado na correção estatística do espetro 20
Equação 4.4-1: Figura de Mérito - usada para escolher a carga da melhor separação [10] 38
Equação 4.5-1: Fator C para correção do espetro dos neutrões 39
Equação 4.5-2: Fator C para correção do espetro da radiação gama 39

1. Introdução

Um dos problemas mais relevantes do nosso tempo tem sido a satisfação do consumo mundial de energia. Pela Figura 1-1 podemos ver que os combustíveis fósseis continuam a ser as principais fontes de energia para a nossa sociedade. A queima destes combustíveis tem contribuído drasticamente para o aquecimento global devido à emissão de gases de efeito de estufa, como o CO_2(Figura 1-2). [1]

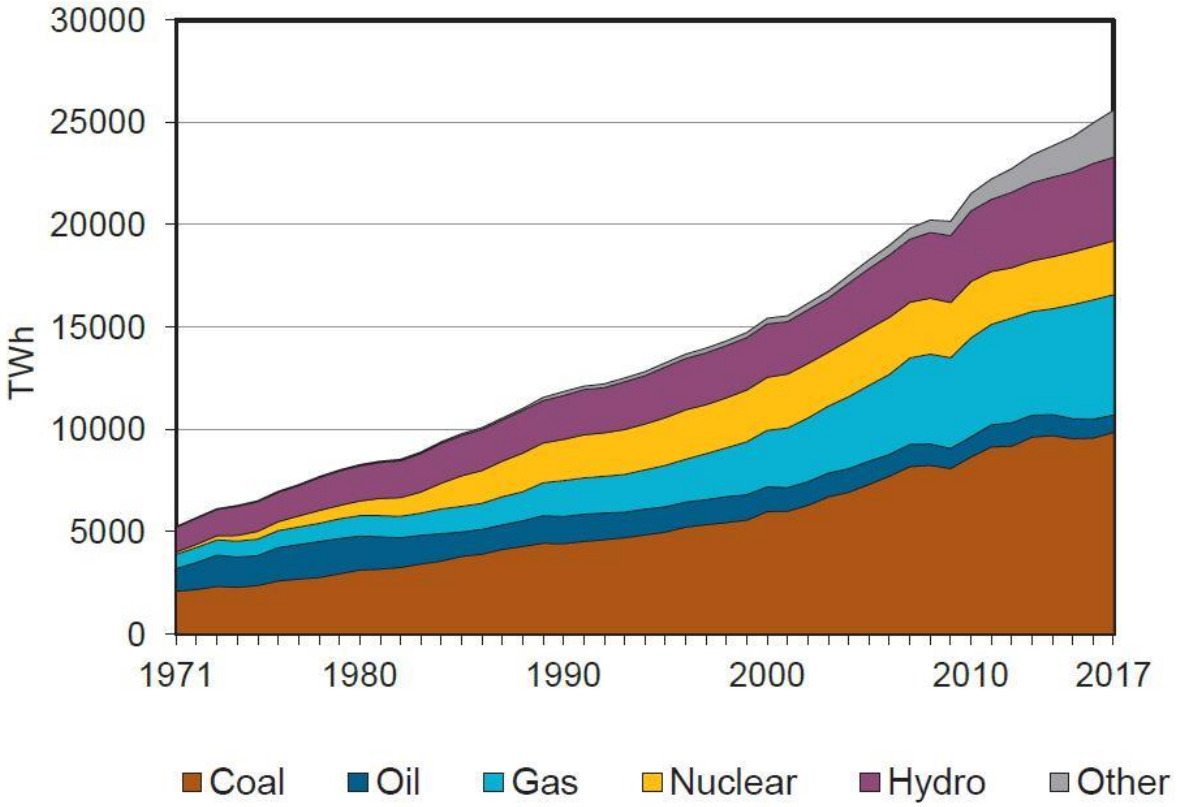


Figura 1-1: Produção de energia Mundial para diferentes tipos de combustíveis (world-energy-outlook) [1]

Para mais, o acesso a estes combustíveis fósseis tem sido cada vez mais complexo o que torna a sua extração menos rentável [2].

A produção hidroelétrica tem um impacto questionável sobre o ecossistema e a construção de barragens está limitada pela geografia da região.

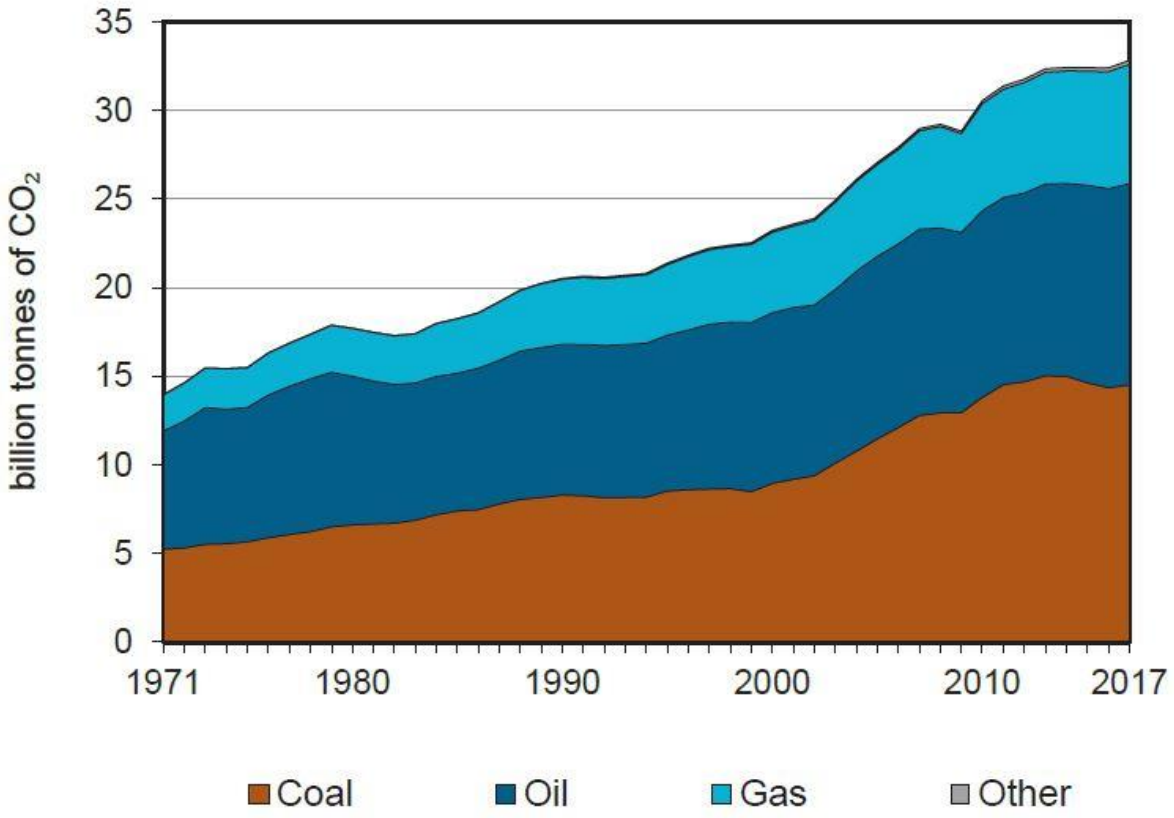


Figura 1-2: Emissões de dióxido de carbono por diferentes fontes de energia (world-energy-outlook) [1]

Em contrapartida, os reatores nucleares existentes podem ser considerados como "fonte de energia verde" pelo menos no que toca à emissão de CO_2. Os reatores de fissão, no entanto, produzem matérias radioativos de longa vida e alta atividade. Este problema torna-se ainda mais relevante quando consideramos os acidentes em Chernobyl e Fukushima, fazendo com que esta fonte perca a sua preferência em relação a outras. As energias renováveis têm sido consideradas como a melhor solução para a procura de energia. Estas fontes de energia têm-se demonstrado muito importantes na sua contribuição para diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, contudo, não têm conseguido satisfazer na totalidade o consumo ao nível mundial. Apesar do grande investimento realizado em diversas tecnologias, estas continuam a apresentar muitas limitações, como dependência das condições atmosféricas e geografia da área, exigindo assim outras infraestruturas que compensam estes problemas como por exemplo: baterias, centrais hidroelétricas reversíveis, ar comprimido, soluções baseadas no hidrogénio, etc.

Com todas as limitações e problemas das fontes de energia atuais existe uma grande procura de novas fontes. A fusão nuclear poderá ser a resposta. Esta é uma fonte prometedora, pois não só é segura e de baixo impacto ambiental, mas também praticamente inesgotável [2].

1.1. Fusão Nuclear

1.1.1. Uma nova fonte de energia

A fusão nuclear tem sido um tópico de pesquisa há várias décadas. Embora ainda não existam soluções baseadas nesta tecnologia, tem havido uma grande evolução nesta área, com importantes avanços tanto na área da física como nas áreas da engenharia e tecnologia. Esta fonte poderá ser a fonte de energia do futuro que todos estamos à procura.

Do ponto de vista da física, a fusão nuclear, como o nome indica, permite fundir núcleos de substâncias leves, formando outros núcleos mais pesados, produzindo energia. Este processo exige um grande esforço para manter o reator em funcionamento pelo que a interrupção do seu funcionamento não será um problema tornando assim esta fonte de energia inerentemente segura.

Esta fonte usa um isótopo de hidrogénio (Deutério) como combustível que pode ser obtido em grandes quantidades da água do mar. Na reação de fusão o Deutério funde com o Trítio, que é obtido dentro do reator da reação dos neutrões com o Lítio contido no cobertor, segundo a equação

$$ {}^{6}_{3}Li + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{3}_{1}H + 4.8\,MeV $$

Desta forma fusão nuclear é uma fonte de energia praticamente inesgotável, devido à abundância de combustível. Não emitindo gases de efeito de estufa, a fusão nuclear também é uma fonte amiga do ambiente. Os únicos resíduos nucleares de consideração são de baixa atividade e curta vida, com os quais, será relativamente fácil de lidar, tendo em conta os avanços tecnológicos na área de materiais para utilização em máquinas de fusão nuclear [2].

1.1.2. Princípios Físicos

A fusão nuclear que pode ser obtida com maior facilidade consiste em fundir átomos mais leves, como os isótopos de Hidrogénio, Deutério (D) e Trítio (T) tendo como produtos Hélio, neutrão e energia. Estes precisam de menos energia para se ligarem do que outros mais pesados. Pela Figura 1-3 podemos concluir que a emissão de energia na fusão será superior que na fissão.

De notar que para iniciar a reação de fissão de urânio é preciso um neutrão e a reação produzirá dois neutrões que por sua vez dará origem a mais reações (reação em cadeia). Este tipo de reação em cadeia facilita o desenvolvimento desta tecnologia, mas ao mesmo tempo é o principal perigo da mesma. Caso esta reação não seja devidamente

controlada podemos deparar-nos com os desastres como o Chernobyl e Fukushima, em que perdemos o controlo da reação em cadeia.

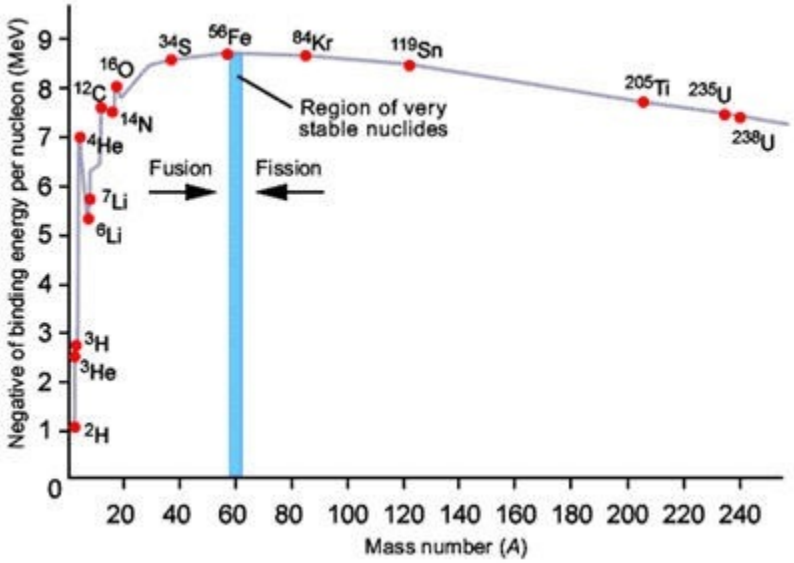


Figura 1-3: Relação entre as energias de ligação nuclear e a massa atômica de alguns elementos (http://www.dlt.ncssm.edu/tiger).

Ao contrário da fissão, na fusão é mais difícil de atingir o ponto de ignição, em que a reação se mantém sustentada. É necessária uma elevada temperatura e pressão de modo que os combustíveis se mantenham em fusão. Condições semelhantes às do Sol, onde um outro processo de fissão ocorre naturalmente.

No caso do Sol a reação de fusão pode dividir-se em três fazes:

$$\left.\begin{array}{r} p + p \rightarrow D + e^{+} + \nu_e \\ D + p \rightarrow \ ^{3}He + \gamma \\ ^{3}He + \ ^{3}He \rightarrow \ ^{4}He + 2p \end{array}\right\} 4p \rightarrow \ ^{4}He + 2e^{+} + 2\nu_e + \gamma$$

Em que p é protão, D deutério, e^{+} positrão, ν_e neutrino, ^{3}He e ^{4}He são isótopos de Hélio e γ é um fotão. A primeira fase, fusão de dois protões, demora muito tempo mesmo nas condições extremas do Sol, pelo que não é viável para a Humanidade. No entanto, podemos saltar de todo esta fase. Existem várias fontes de Hidrogénio e seus isótopos necessários para a segunda fase. Pela Figura 1-4 verificamos que é mais fácil obter a reação de deutério-trítio pelo que é nesta que se concentram as tecnologias de fusão.

$$D + T \rightarrow \ ^{4}He(3.52MeV) + n(14.06MeV)$$

Esta reação tem uma maior probabilidade, que depende da seção eficaz, com energias mais baixas.

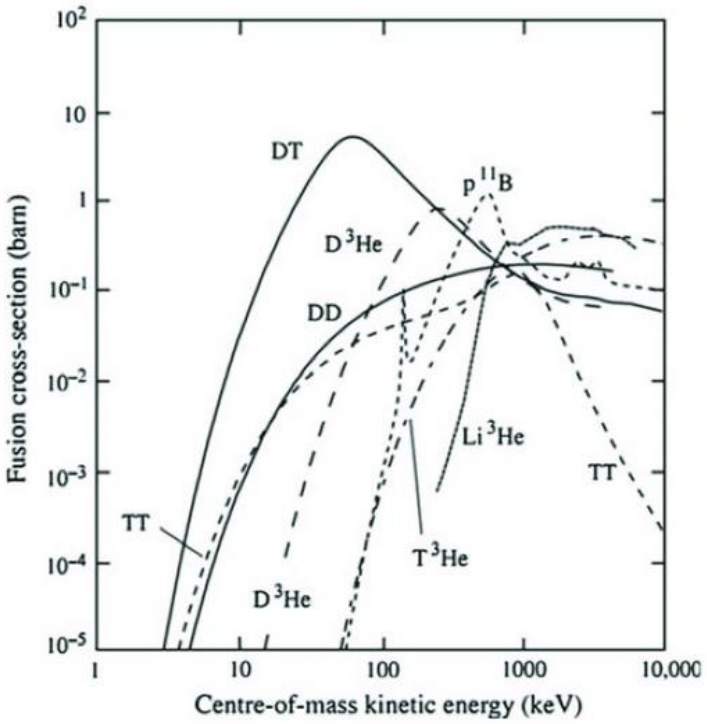


Figura 1-4: Secção eficaz em função da energia cinética para reações principais de fusão [2]

O átomo de deutério e trítio ao se ligarem irão produzir elementos mais leves do que a soma das suas massas. Dessa perda de massa resulta uma equivalente emissão de energia, descrito pela famosa fórmula:

$$E = mc^2$$

Energia que estará em forma de energia cinética dos produtos, que por sua vez aquecem as paredes do tokamak. Este calor é usado para gerar vapor de água que acionará turbinas produzindo eletricidade.

Esta fonte de energia, para além de ter o potencial de produzir grandes quantidades de energia a partir de pequenas quantidades de combustível, é também mais segura. O combustível é injetado no reator à medida que é necessário, assim pode ser facilmente desligado, ao contrário dos reatores de fissão que contém a totalidade do combustível no reator. Para além disso, esta produzirá resíduos de baixa atividade e curta vida que poderão ser reintegráveis nos ecossistemas.

Fusão nuclear requer deutério e trítio que pode ser obtido facilmente em qualquer ponto da Terra. O deutério pode ser obtido da água pesada (D_2O), que constitui 0.015% da água. O trítio tem uma abundância vestigial, mas pode ser produzido a partir da ativação neutrónica do lítio. Processo que poderá ser implementado no próprio reator, que produz

neutrões como produtos de reação. Embora o lítio-6 não seja muito abundante este é o método mais prático de produzir trítio.

$$^{6}Li + n \rightarrow \ ^{4}He + T(4.80MeV)$$

No entanto, os neutrões embora úteis para a produção de trítio, são os de maior preocupação. Os neutrões ativam as paredes do reator produzindo materiais radiativos indesejados, mas com curta meia vida de aproximadamente 100 anos. Esta fonte não produz gases de efeito de estufa e estima-se que a energia produzida terá um preço competitivo com as centrais elétricas [2].

1.1.3. Confinamento

Para atingir a fusão nuclear é preciso ultrapassar vários problemas técnicos. Logo à partida é necessário criar condições de pressão e temperatura para iniciar as reações. Também têm que se criar forma de recolher a energia produzida.

Em condições de laboratório o controlo do plasma é excecionalmente difícil, pois o plasma não pode tocar nas paredes do reservatório porque estas poderão derreter.

Existem três técnicas para lidar como o plasma: Confinamento Gravitacional, Confinamento Inercial e o Confinamento Magnético.

1.1.3.1. Confinamento Gravitacional

O confinamento gravitacional é o que controla a produção de energia nas estrelas. A elevada massa da estrela dá origem a condições de alta pressão no interior da mesma. Quanto maior a pressão e temperatura maior probabilidade de ocorrer a reação de fusão. Assim, embora a estrelas de maior massa tenham mais combustível estas também o consomem mais depressa.

Assim o confinamento gravitacional consiste num controlo do plasma que é naturalmente regulado pela massa da estrela. A energia libertada não deixa que a estrela colapse sobre si. Assim temos uma oposição entre a força gravitacional, que comprime a estrela, e a energia libertada pela fusão, que tenta expandir a estrela [3].

Figura 1-5 mostra as várias camadas numa estrela. Estas camadas aparecem devido a um aumento de pressão que é originado pela gravidade. Quanto mais no interior da estrela maior a pressão e temperatura, o que possibilita a fusão de átomos mais pesados.

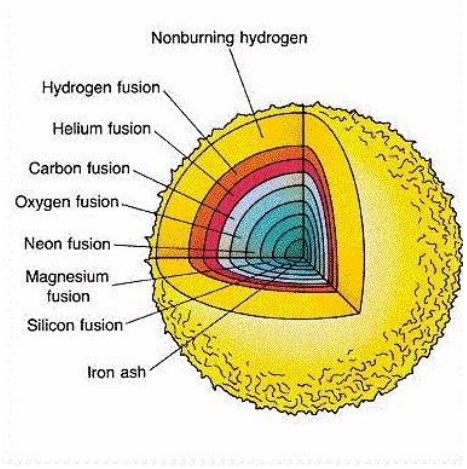


Figura 1-5: Fusão nas estrelas

1.1.3.2. Confinamento Inercial

Esta técnica baseia-se na compressão e aquecimento de uma pequena pastilha de deutério e trítio usando lasers. Esta técnica de fusão inercial devido à compressão direta pelo laser pode ser reduzida a quatro fases:

Absorção de energia – os lasers aquecem a pastilha de combustível até às temperaturas próximas do Sol.

Compressão e transporte de energia – a propagação de energia da casca para o interior da pastilha gera enorme pressão.

Reação de fusão – a fusão começa do interior da pastilha que está sob alta pressão e temperatura.

Emissão de energia – a energia libertada propaga-se para fora da pastilha.

Outra técnica de compressão indireta consiste em irradiar o interior de um cilindro metálico. O cilindro é aquecido até ao estado de plasma que emite raios X. Esta radiação é absorvida pela pastilha que implode, tal como no processo de compressão direta.

A maior instalação de fusão por confinamento inercial encontra-se no National Ignition Facility em Lawrence Livermore National Laboratory. Este consiste em 192 feixes laser. [3]

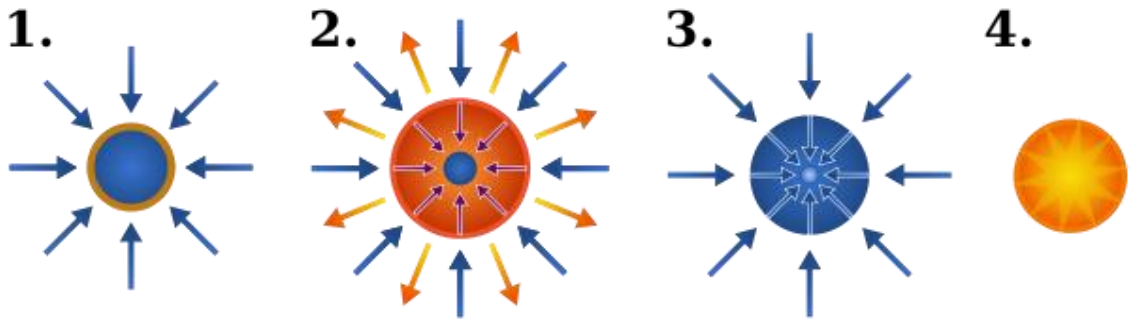


Figura 1-6: As quatro fases da fusão inercial por compressão direta por lazeres: 1-Absorção de energia. 2-Compressão e transporte de energia. 3-Reação de fusão. 4-Emissão de energia.

1.1.3.3. Confinamento magnético

O confinamento magnético é neste momento o mais estudado. Este baseia-se no movimento de partículas carregadas confinadas por um campo magnético (B).

O movimento orbital de uma partícula carregado sob efeito de um campo magnético tem um raio que é dado por:

$$r = \frac{vm}{qB},$$

onde *q* e *m* são a carga e a massa da partícula e *v* é a velocidade da mesma num plano perpendicular ao campo $\vec{B}$. Baseando-se na fórmula foram desenvolvidos vários dispositivos toroidais, tais como Tokamaks, Stellarator entre outros.

No entanto, neste tipo de dispositivos, devido à existência do gradiente de B ($\nabla\vec{B}$) perpendicular ao $\vec{B}$, existe uma força que move as partículas em direções opostas para baixo e para cima, o que gera um campo elétrico. Os campos elétrico e magnético geram uma força que conduz os eletrões e os iões para uma região de baixo campo magnético, para fora da região de confinamento.

Para manter o plasma na região pretendida o tokamak, para além do gerar um campo magnético toroidal também gera um campo poloidal usando duas bobinas toroidais (Figura 1-7) [3].

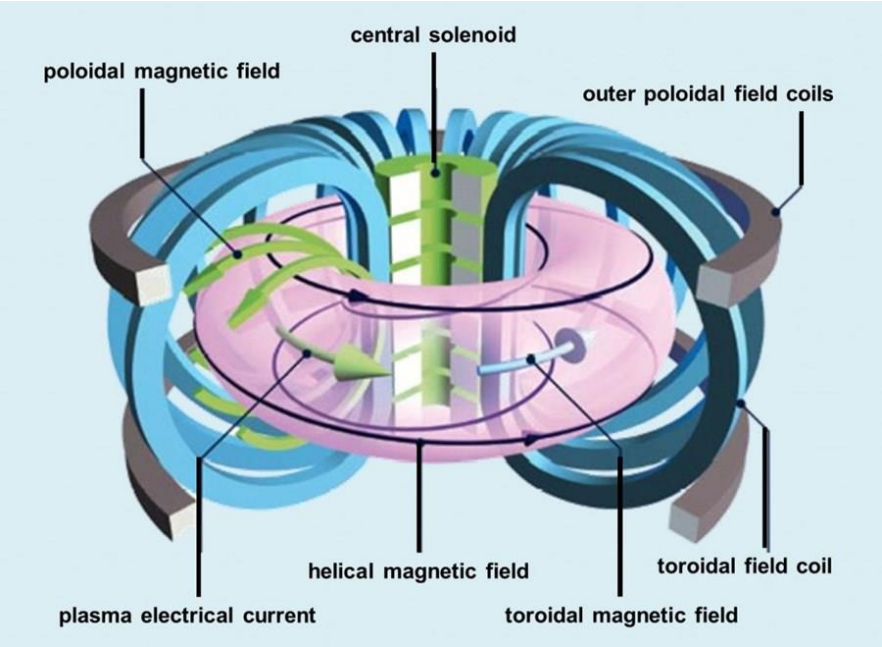


Figura 1-7: Campos magnéticos e as bobinas num dispositivo do tipo tokamak [4]

Numa tentativa de resolver algumas das dificuldades de confinamento presentes num tokamak foi tentado um novo tipo de desenho, chamado stellarator. O stellarator resolve o problema de deriva vertical, torcendo-se sobre si. Assim os campos mais fortes não estariam sempre na mesma região do toro. (Figura 1-8) [2] Apesar de bastante promissor, a complexidade deste tipo de equipamento exige um esforço muito grande na modelização do plasma e na construção das peças durante o seu desenho.

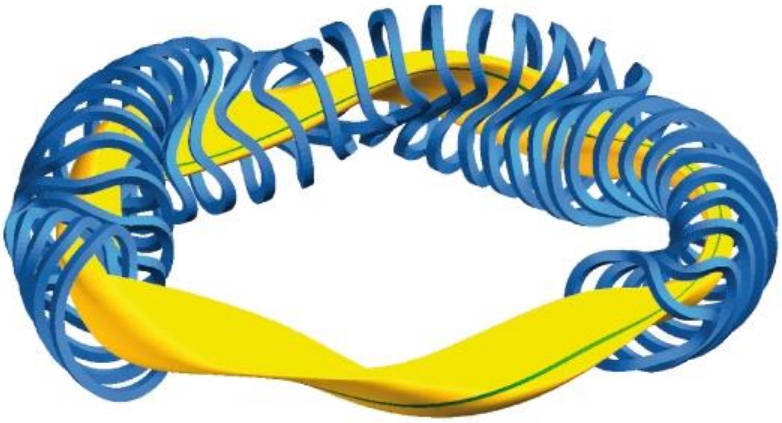


Figura 1-8: Apresentação esquemática de um dispositivo do tipo Stellarator [2]

1.1.4. Tokamaks

Nas últimas décadas tem havido grande evolução de vários tipos de reatores nucleares de fusão, tais como Z-Pinch, Stellarator, Tokamak, sendo este o mais desenvolvido entre outros. No entanto, ainda não foi possível produzir mais energia que a energia gasta para operar o reator. Para tal, no caso do tokamak, estima-se que a eficiência aumentará com o tamanho do reator e por isso está a construir-se o International Thermonuclear Experimental Reactor – ITER.

1.1.4.1. Joined European Torus – JET

O JET é o maior Tokamak em operação, numa colaboração da União Europeia através do consórcio EUROfusion, e situa-se no Culham Center for Fusion Energy no Reino Unido. O Joint European Torus (JET) encontra-se em funcionamento desde 1983 e é considerado o tokamak em atividade com maior relevância para o desenvolvimento do plano europeu de fusão .

Como JET tem aproximadamente 15 metros de diâmetro e 12 metros de altura, bateu o recorde de produção de energia em 1997, com 16 MW durante um período de um segundo e de 4 MW durante 4 segundos. O tokamak JET apresenta uma secção poloidal em forma de D, com um raio maior de R0 = 2,96 m e raio menor de a = 0,96 m. [5]

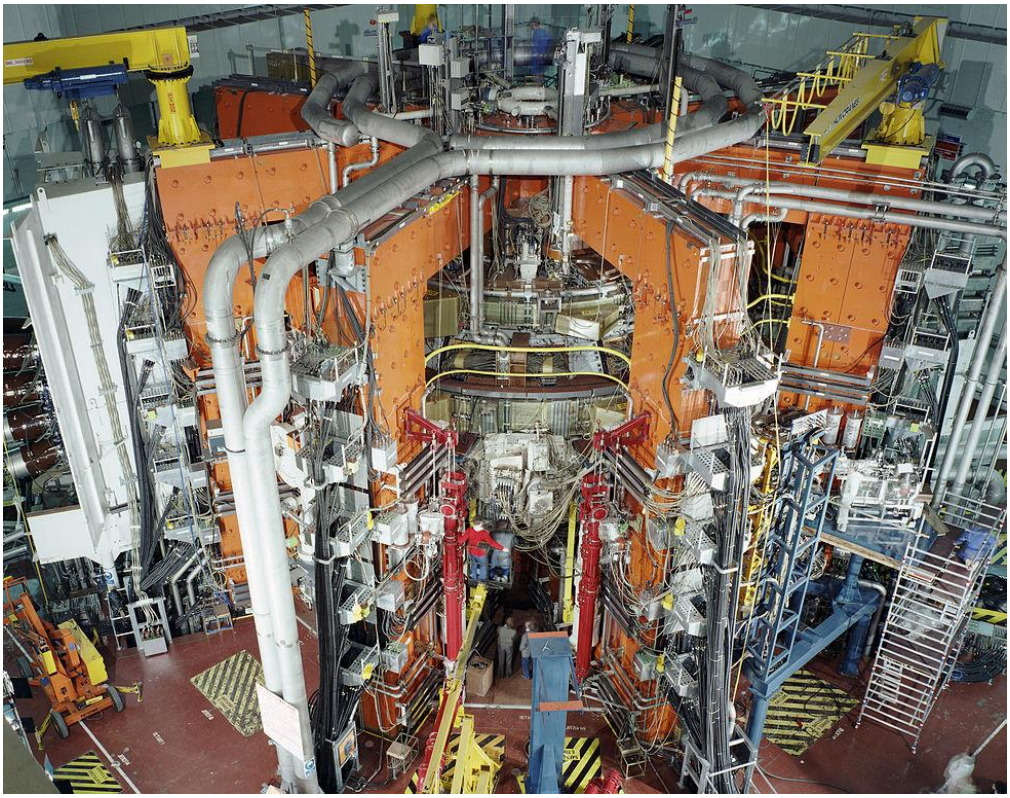


Figura 1-9: JET tokamak

1.1.4.2. ITER

ITER é um reator de fusão nuclear experimental do tipo tokamak que usa mistura de deutério e trítio como combustível. Começou a ser construído em 2013 no Sul da França, com a cooperação internacional envolvendo a União Europeia, India, Japão, China, Rússia, Coreia do Sul e os Estados Unidos da América.

O tokamak ITER usa fortes campos magnéticos para confinar o plasma na forma de um toróide, desenvolvido para controlar o plasma em altas temperaturas.

O JET conseguiu atingir um rendimento (Q) de cerca 0.6, por volta de 16MW de uma potência injetada de 25MW, durante um curto período de tempo (1s). Estima-se que o ITER produzirá 500MW com potência injetada de 50MW, obtendo um rendimento de 10, durante períodos longos com cerca de 1000s. No entanto, ITER não terá o sistema de geração de eletricidade incluído, pois ainda não produzirá energia suficiente para ser viável a sua recolha. Considerando todas a perdas, a sua energia térmica será dissipada para a atmosfera. [4]

O objetivo do ITER é demostrar a capacidade científica e tecnológica do sistema tokamak como fonte de energia. Já está a ser desenhado o sucessor deste reator, o DEMO - 2 GW Demonstration Power Plant. Espera-se que demonstre produção em larga escala de energia elétrica de forma contínua, sendo o primeiro reator de fusão nuclear com capacidade de injetar energia elétrica na rede de distribuição.

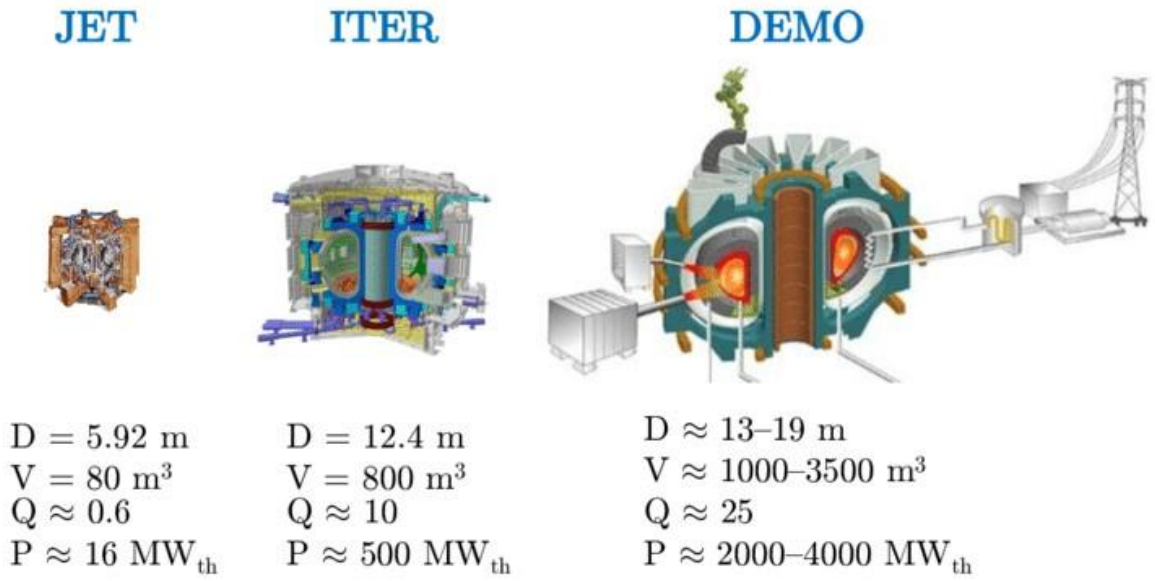


Figura 1-10: Comparação de JET e ITER

O ITER será constituído por:

Magnetes supercondutores que irão manter o plasma confinado;

Câmara de Vácuo – câmara de aço inoxidável que funcionará como a primeira barreira de segurança;

Cobertor – um cobertor de berílio, cobre de alta resistência e aço inoxidável que protegerá a câmara de aço dos neutrões de alta energia produzidos nas reações de fusão;

Diversor – posicionado no fundo da câmara de vácuo, recolherá os gases residuais e as impurezas do plasma, suportando as maiores temperaturas do ITER;

Crióstato – câmara de aço inoxidável que contem a câmara de vácuo e os magnetes, garantirá as condições de vácuo de ultrabaixa temperatura;

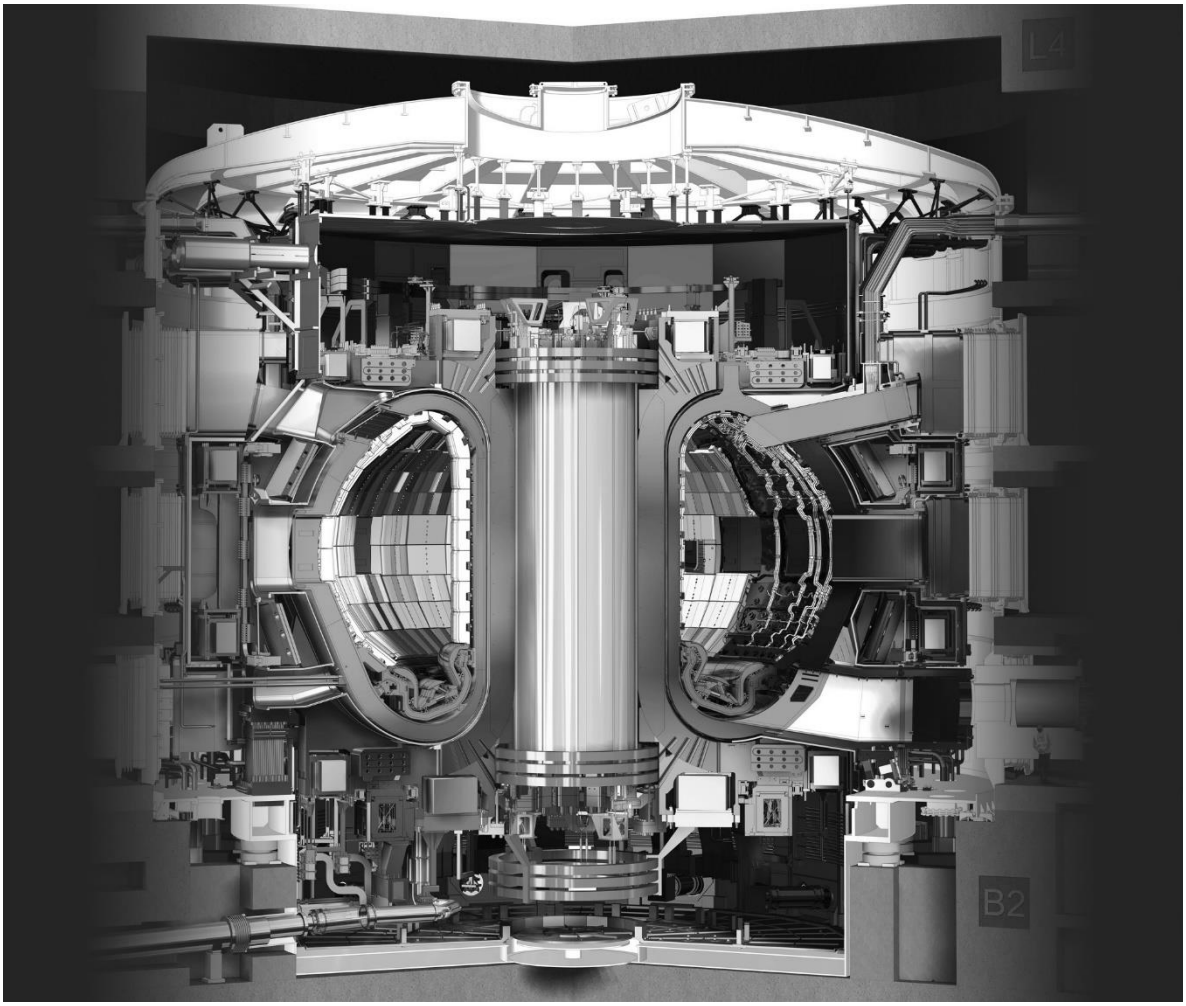


Figura 1-11: ITER TOKAMAK (1-Magnetes ,2-câmara de vácuo, 3-Cobertor, 4-Deivertor, 5-Cryostat) [4]

Estes são os principais componentes de um tokamak, mas existem muitas outras que o rodeiam e são indispensáveis para o seu funcionamento, tais como o sistema de vácuo, a fonte de energia, ciclo do combustível, vários sistemas de arrefecimento (água, nitrogénio e hélio), sistemas de aquecimento do plasma para temperaturas 150 milhões de graus celsius (por injeção de deutério acelerado, ciclotrões de iões e de eletrões), sistema de comunicação e controlo (CODAC) e outros sistemas de suporte.

Nos periféricos temos diversos sistemas de suporte, como por exemplo: sistema de manutenção remota, um complexo de tratamento dos matérias radioativos (HOT CELL) e um sistema de criação de trítio. [4]

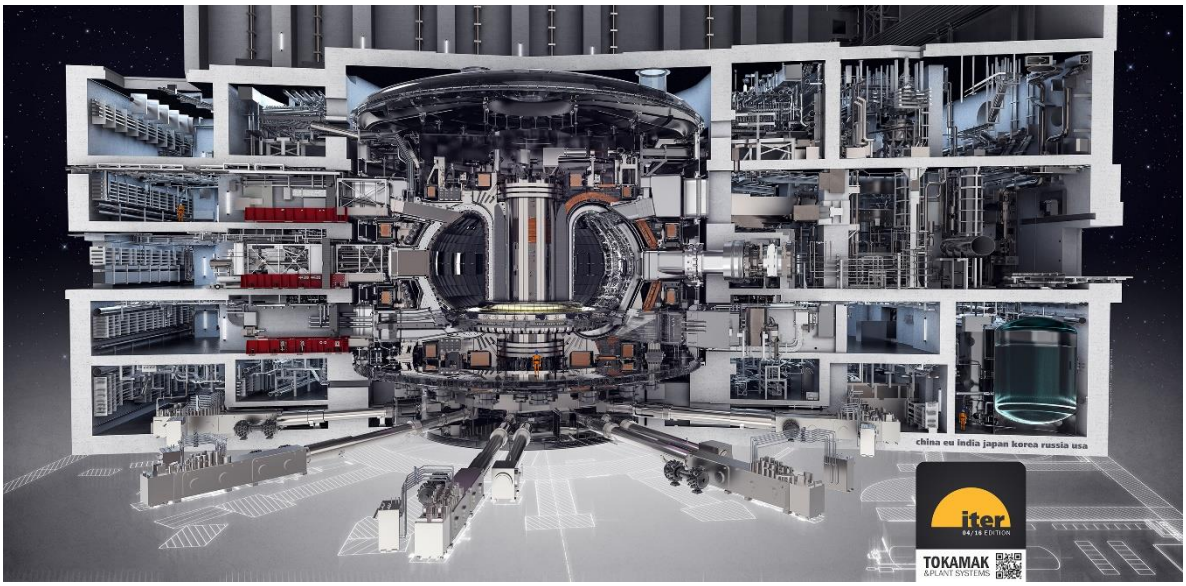


Figura 1-12: ITER edifício central [4]

1.1.4.3. Diagnósticos de Tokamaks

Para perceber, controlar e analisar o que se passa dentro de um tokamak, não podemos deixar de referir o sistema de diagnóstico constituído por uma grade variedade de ferramentas. Alguns exemplos de diagnósticos mais relevantes são:

- Diagnóstico magnético que se baseia na determinação do fluxo que passa por uma bobine é um diagnóstico passivo, que fornece informação acerca da corrente do plasma (Rogowski coil), campo magnético poloidal (B_Θ) e radial (B_r) (pick-up coils), entre outros; [3]. Este diagnóstico é essencial para o controlo da forma e posição do plasma, evitando que este toque as paredes do tokamak, destruindo o seu interior e provocando fim do plasma causado pela perda da sua energia.
- Sistema ótico como interferómetros e sistemas de dispersão de Thomson são usados para medir os perfis de temperatura e densidade do plasma;
- Diagnóstico por micro-ondas sonda o plasma para obter a sua posição;
- Instrumentos espectroscópicos cobrem uma grande gama do espetro eletromagnético desde o visível até aos raios-X fornecendo informação sobre as impurezas, fluxo de entrada, temperatura dos iões, densidade do hélio, rotação do plasma, e da densidade de corrente;

- O diagnóstico de neutrões composto por câmaras, espectrômetros e monitores de fluxo de neutrões, fornece medições da fusão do combustível. [4]

1.2. Diagnóstico de Neutrões

O diagnóstico de neutrões, no qual se insere a minha dissertação, mais especificamente na câmara radial de neutrões (RNC[1]), é um sistema de deteção multicanal situado no porto equatorial 1 (do inglês Equatorial Port Plug 1 -EPP1). Desenhado para medir a emissividade neutrónica, pela medição do fluxo dos neutrões pelas linhas colimadas de visão (do inglês Lines Of Sight - LOS), a partir da qual se pode estimar a temperatura dos iões e do rácio de combustível (D/T). O RNC está dividido em dois subsistemas:

- Ex-port, que tem visão sobre centro do plasma, constituído por dois conjuntos de LOS em planos toroidais diferentes embebidos num enorme bloco de blindagem, localizado no Port Interspace. Estes usam detetores de cintilação, capazes de discriminar neutrões da radiação gama.

- In-port, com a visão das extremidades do plasma, situado dentro do Port Plug. Com detetores de fissão de Urânio 238 e detetores de diamante, com arrefecimento ativo.

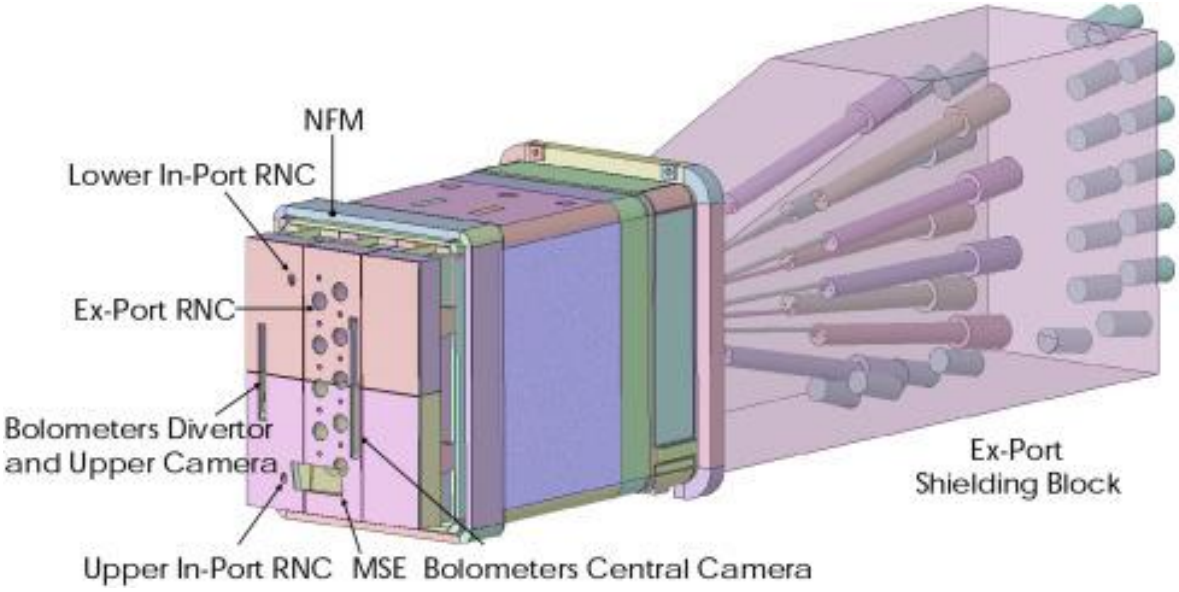


Figura 1-13: Radial Neutron Camera (Câmara radial de neutrões) [6]

[1] Radial Neutron Camera

Os diagnósticos em que esta dissertação se baseia estão relacionados com as medições relativas dos produtos de fusão, que permite determinar a taxa de reação de fusão que é um bom indicador do rendimento do Tokamak. Além disso permite ainda obter informações sobre a temperatura dos iões, confinamento do plasma, entre outros parâmetros importantes para se poder controlar o plasma em tempo real.

1.3. Motivação

Nas máquinas de Tokamak desenhadas para produção de energia via fusão nuclear, o melhor indicador de eficiência, para além da potência elétrica (que o ITER não produzirá), é a taxa de reação de fusão. Esta taxa pode ser obtida a partir da medição dos produtos da reação.

Para tal, foi desenhada a Câmara Radial de Neutrões, com a vantagem de que os neutrões só são produzidos nas reações de interesse ou em outras facilmente distinguíveis, face à câmara gama que terá grande ruído gerado por várias fontes.

O objetivo deste sistema de diagnóstico é a medição da taxa da reação de fusão, no entanto este é capaz de fornecer muito mais informação. Da RNC podemos extrair informações como: rácio dos combustíveis (D/T) e perfil de emissividade neutrónica para controlo em tempo real.

Em continuação ao desenvolvimento realizado na RNC, a tese apresentada consiste no processamento dos dados adquiridos pela FPGA provenientes dos cintiladores. Estes dados são contabilizados num espetro de emissão de neutrões usado para controlo em tempo real.

1.4. Objetivos

Sendo um sistema de controlo em tempo real este diagnóstico tem de ser capaz de lidar com todos os problemas que poderão surgir durante o funcionamento do reator. Para tal, o software de controlo que foi desenvolvido tem que ser capaz de lidar com os seguintes problemas, que são então os objetivos deste.

- Rejeição dos eventos de empilhamento: eventos em que duas ou mais partículas tenham entrado em simultâneo no detetor o que resultaria na sobreposição total ou parcial dos impulsos das partículas. A maioria dos algoritmos não conseguem resolver estes eventos de empilhamento, em particular os algoritmos rápidos que são usados no projeto. Assim resolveu-se detetar estes eventos e excluí-los.

- Discriminação de neutrões e raios gama: a grande vantagem de utilização de detetores de cintilação é a capacidade de distinguir os vários tipos de radiação. Estes detetores apresentam sinais com diferentes caudas para diferentes tipos de radiação. Para o projeto em causa os neutrões são os de maior importância, estes têm que ser separados dos raios gama usando algoritmos rápidos.
- Cálculo das energias das partículas: A amplitude de cada impulso pode ser relacionada com a energia da partícula que lhe deu origem. Esta informação é indispensável para determinar origem da radiação, a reação que a criou. Assim obtemos informação sobre as reações que estão a ocorrer no interior do reator.
- Construção do espetro de energias: com o espetro mais facilmente se pode tirar conclusões acerca das reações da experiência em causa.
- Obter a emissividade neutrónica ao longo das linhas de vista dos detetores.

1.5. Estrutura da dissertação

A dissertação divide-se em cinco capítulos, em que o primeiro trata da abordagem, estrutura, motivação, objetivos e oferece a área de integração do projeto. A câmara Radial de Neutrões tem um papel muito importante de detetar a energia que será produzida pelo tokamak para mostrar a capacidade do ITER, pois este não produzirá energia elétrica devido a motivos financeiros. A produção desta não será suficiente para justificar o investimento.

O segundo capítulo aborda o estado de arte dos algoritmos que poderão ser usados para resolver os problemas colocados para o projeto, tais como o empilhamento de impulsos e descriminação de neutrões e radiação gama usando detetores de cintilação.

O capítulo três descreve a ferramenta de visualização dos impulsos que foi desenvolvida para facilitar a utilização do software ao utilizador. Este capítulo descreve a interface criada com as suas vantagens e limitações.

O quarto capítulo apresenta os algoritmos usados, a sua estrutura e a performance. Discutindo vários pormenores dos mesmos aplicados ao projeto em particular. Este especifica a comparação de carga para a descriminação das partículas, fala da importância da escolha do *threshold* e a sua utilização na deteção do empilhamento de impulsos. Devido à simplicidade dos algoritmos, para garantir a performance necessária, estes não são capazes de resolver os impulsos de empilhamento pelo que é discutido o método alternativo usado para tratar este problema, usando correções estatísticas. No final é apresentada a capacidade do algoritmo de lidar com a frequência de amostragem de

2Meventos/s em períodos de 10 ms que é requerido pela máquina. Este capítulo ainda apresenta uma breve discussão do algoritmo em paralelo.

Nos últimos dois capítulos são tiradas as conclusões e são sugeridas melhorias para um trabalho futuro.

2. Estado de Arte

2.1. Deteção do empilhamento de impulsos

Os detetores de radiação, quando trabalham em ambientes de elevado nível de radiação, podem sofrer empilhamento, eventos em que dois ou mais impulsos são sobrepostos. Estes eventos, quando não reconhecidos, resultam na distorção do espectro. Para minimizar a probabilidade destes eventos, os detetores são desenhados de modo a recolherem a carga rapidamente,ed obtendo impulsos o mais estreitos possível. No entanto, nem sempre é possível eliminar ou desprezar os eventos de empilhamento, sendo necessário outros métodos.

Este trabalho discute vários métodos digitais de lidar com os eventos de empilhamento. No estado de arte, a secção 1 apresenta o método do ajuste de um modelo físico que melhor representa o impulso de deteção da radiação. Secção 2 discute o discriminador de impulso diferencial. Secção 3, o discriminador de nível inferior. Por último, na secção 4, é discutido como usar os eventos de empilhamento como correções estatísticas.

2.1.1. Método de ajuste do impulso

A melhor maneira de resolver os eventos de empilhamento é usar um modelo físico que descreve o evento. Assim, podem extrair-se várias características do impulso, tais como: a energia, os tempos de decaimento e o tempo do evento. Este método pode reconstruir os impulsos sobrepostos. Os impulsos podem ser modelados com duas exponencias como apresentado a seguir:

$$V(t) = A\left(e^{-(t-t_0)/\theta_1} - e^{-(t-t_0)/\theta_2}\right) \tag{1}$$

Equação 2.1-1: Modelação do impulso (duas gaussianas)

Onde A é constante de normalização que é proporcional à energia da radiação incidente, θ_1 é a constate de decaimento antes do preamplificador, θ_2 a do preamplificador e t_0 corresponde ao tempo de deteção do impulso. Para eventos de empilhamento, este modelo usa-se tantas vezes quantos os impulsos sobrepostos existentes. Depois de obter um ajuste aceitável pode-se reconstruir cada impulso. Assim, caso os impulsos não estejam totalmente sobrepostos, pode-se obter o espectro real, sem a distorção devido aos eventos de empilhamento. [7]

No entanto, este método exige a totalidade do impulso, não pode ser usado a medida de que os dados são adquiridos. Para além disso, como tem quatro parâmetros de ajuste, este requer elevado esforço computacional. Assim sendo, não é adequado para aplicações em tempo real, embora se possa usar outro método para deteção dos eventos

de empilhamento, este é o único que pode reconstruir os impulsos presentes. Assim, pode-se usar em conjunto com outros, quando estes detetam o empilhamento, caso melhor precisão seja requerida e o hardware o permita. Este método é geralmente usado em processamento após a realização da experiência em que o detetor está incorporado.

Por vezes duas exponencias não conseguem descrever o impulso adequadamente, aí pode-se usar três ou mais. Tem que se encontrar um modelo que melhor descreve o impulso, tentando sempre relacionar com as características físicas do detetor e a radiação incidente. [8]

2.1.2. Discriminador de impulso diferencial

Discriminador de impulso diferencial (DPD) é um método muito rápido e simples de detetar o empilhamento de vários impulsos. Este consiste numa diferenciação simples dos pontos adjacentes. Assim quando há uma subida este mecanismo representará um valor positivo e o impulso é detetado. Tem que se definir um valor mínimo a partir do qual é considerado um impulso, para não ter falsos positivos devido ao ruído.

Este método só precisa do valor atual e o anterior para se poder determinar se houve um novo impulso, isto é, se houve ou não empilhamento. Como este consiste basicamente numa subtração e uma comparação, o mesmo é muito rápido e pode usar-se em aplicações em tempo real com um hardware relativamente básico e barato. Figura 2-1 apresenta dois impulsos e diferenciação dos mesmos. [9]

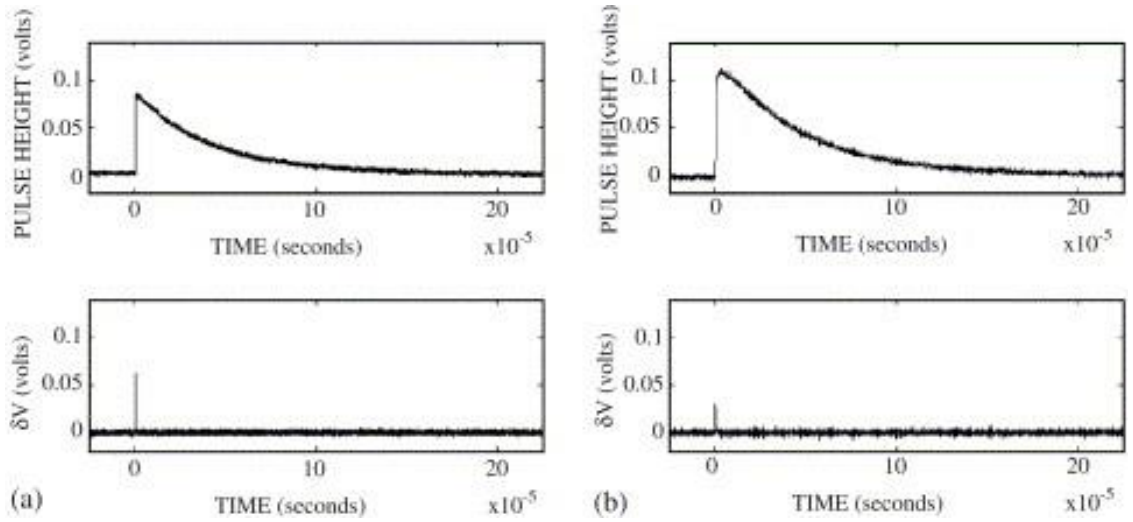


Figura 2-1.Pulsos cintiladores e diferença de primeira ordem: (a) cintilador de LSO, (b) cintilador de NaI (IT) [9]

2.1.3. Discriminador de nível inferior

O método mais simples de implementar é provavelmente o discriminador de nível inferior, onde este simplesmente compara o valor registado como o previsto. No entanto, o valor previsto pode não ser trivial. Alguns detetores apresentam impulsos com decaimentos diferentes para radiações diferentes. Assim, este método pode tornar-se mais complicado ou mesmo impossível. Este também é mais sensível ao ruído e precisa de se conhecer o modelo que descreve o comportamento dos impulsos, já com as variáveis todas bem definidas. Portanto, este só pode ser usado após ser feita uma calibração do modelo e usando o máximo do impulso estima-se o valor seguinte. Quando o valor é algumas vezes maior que o estimado é detetado o empilhamento. [9]

2.1.4. Correção estatística

Os dois métodos anteriores só são capazes de detetar o empilhamento. Pelo que de seguida tem que se usar o método descrito na secção 1 para reconstruir os impulsos, extrair as energias e outros valores que poderão ser úteis. No entanto, existe outra alternativa que consiste em usar o número de vezes que o empilhamento foi detetado como uma correção estatística, sem ter que se reconstruir os impulsos empilhados. Esta maneira consiste em multiplicar cada bin de energia do espetro pelo fator C.

$$C = 1 + \frac{\#\ de\ pulsos\ de\ emparelhamento}{\#\ de\ pulsos\ singulares} \tag{2}$$

Equação 2.1-2: Fator C - usado na correção estatística do espetro

Esta maneira de lidar como os eventos empilhados apresenta uma discrepância em relação ao método da secção 1, mas é muito mais rápido. [7]

Os métodos apresentados para lidar com eventos de empilhamento são suficientes para a maioria dos casos. O método do ajuste de um modelo físico, apresentado na secção 1, é o mais poderoso, mas também é o mais exigente em termos computacionais pelo que não serve para aplicações em tempo real. O discriminador de nível inferior funcionará para alguns casos, enquanto que o discriminador de impulso diferencial consegue detetar o empilhamento quase sempre sem grandes complicações. Em contrapartida, este só irá rejeitar os eventos de empilhamento, pelo que a única maneira de corrigir os dados é usar o fator C dado na Eq.2.

Aparentemente não existe necessidade de desenvolver outros métodos para lidar com os eventos de empilhamento uma vez que este parecem ser suficientes. O problema

pode recair na escolha de hardware certo para executar os algoritmos em tempo real, nas taxas de radiação pretendida.

2.2. Discriminação de partículas

Em experiências físicas com a presença de neutrões e raios gama a sua discriminação poderá ser um problema para alguns detetores. Detetores com cintiladores líquidos fornece impulsos com caudas diferentes para neutrões e gamas, onde os neutrões decaem mais devagar. No entanto esta diferença entre caudas nem sempre é tão óbvia quanto isso. Neste trabalho serão discutidos alguns métodos para fazer essa discriminação entre neutrões e gamas em ambiente digital.

Métodos como comparação de carga (CC), método do ajuste de curva (CF/curve fitting) e reconhecimento de padrões serão apresentados e comparados entre si. Alguns apresentam melhor resultados, mas poderão precisar de um tempo computacional maior pelo que não serão adequados para aplicações em tempo real. Os mesmos são usados para validação dos resultados num pós-tratamento dos dados. Como o método do ajuste de curva, que pode ser exigente ao nível computacional principalmente quando se tenta ajustar mais parâmetros para obter resultados melhores.

2.2.1. Comparação de carga (CC)

O método de comparação de carga consiste em integrar a área da cauda e depois dividir essa pelo máximo do pico ou então por uma integral da subida do impulso. As regiões de integração poderão ser ajustadas para melhorar os resultados perante uma análise prévia do detetor. Para além disso, pode-se também optar simplesmente por integrar a cauda e compará-la diretamente com outra que tenha a mesma energia. Como os neutrões apresentam uma cauda maior, terão um valor maior do que os gamas. O valor a partir do qual é considerado neutrão terá que se obter por calibração, que vai variando para diferentes energias. Para energias pequenas poderá não ser possível discriminar as duas radiações, pois a diferença entre as áreas das caudas das diferentes radiações estará na ordem do ruído. [10] [11]. A Figura 2-2 apresenta os resultados deste método obtidos de [10]

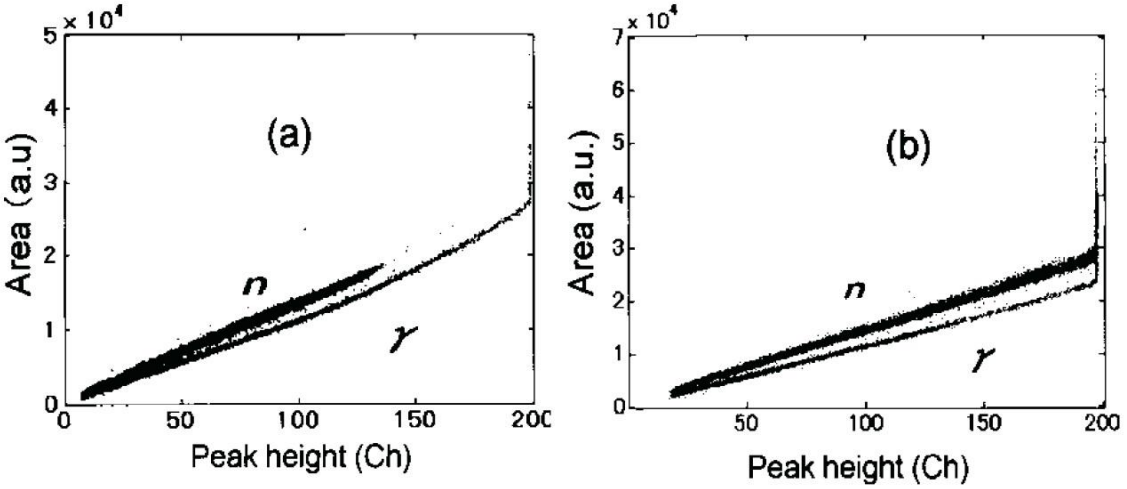


Figura 2-2 : Gráficos de pontos da carga (unidades arbitrárias) vs. máximo do pico pelo método de comparação de carga; (a) baixo ganho, (b) alto ganho [10]

2.2.2. Ajuste de curva (CF)

O método do ajuste de curva é o método mais exato pois este pretende ajustar uma curva ao impulso com vários parâmetros que representam grandezas físicas. Estes parâmetros vão variar para diferentes radiações possibilitando a sua discriminação. Parâmetros tais como a constante de decaimento, posição do centroide e amplitude do impulso como exemplo. Quando temos uma boa separação entre as radiações podemos ajustar simplesmente a cauda do impulso usando uma curva de decaimento exponencial só com um parâmetro. A Figura 2-3 apresenta resultados para este método usando os mesmos dados que no método anterior. [10]

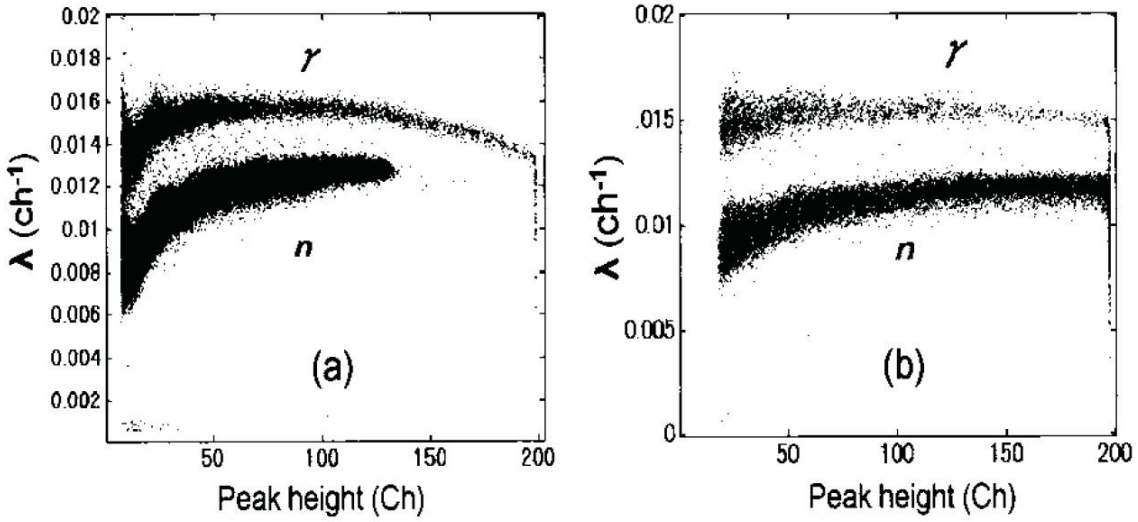


Figura 2-3: Gráficos de pontos para constante de decaimento vs. máximo do pico para ajuste de curva; (a) baixo ganho, (b) alto ganho [10].

Para obter melhores resultados pode-se ajustar uma curva mais complexa com mais parâmetros, tal como uma curva Gaussiana de terceira ordem, pois o primeiro centroide descreverá o máximo e os outros dois a cauda. A posição dos centroides poderá ser suficiente para a discriminação, mas é preciso fazer uma análise de todos os parâmetros para os diferentes detetores e gamas de operações. A largura dos centroides, poderá dar resultados melhores. [12]

2.2.3. Reconhecimento de padrões

Este método consiste em comparar os impulsos a um impulso padrão que poderá ser um impulso de neutrão ou gama. Preferencialmente é escolhido o impulso de um gama pois estes têm uma dispersão menor. Para obter um valor de discriminação é usado o arccosseno do produto escalar do impulso padrão pelo impulso em análise dividido pelas normas destes impulsos. Assim, este valor irá indicar o quão similar é o impulso em análise em relação ao impulso padrão. A figura 3 representa os resultados deste método usando os mesmos dados que nos métodos anteriores, possibilitando uma comparação direta. [10]

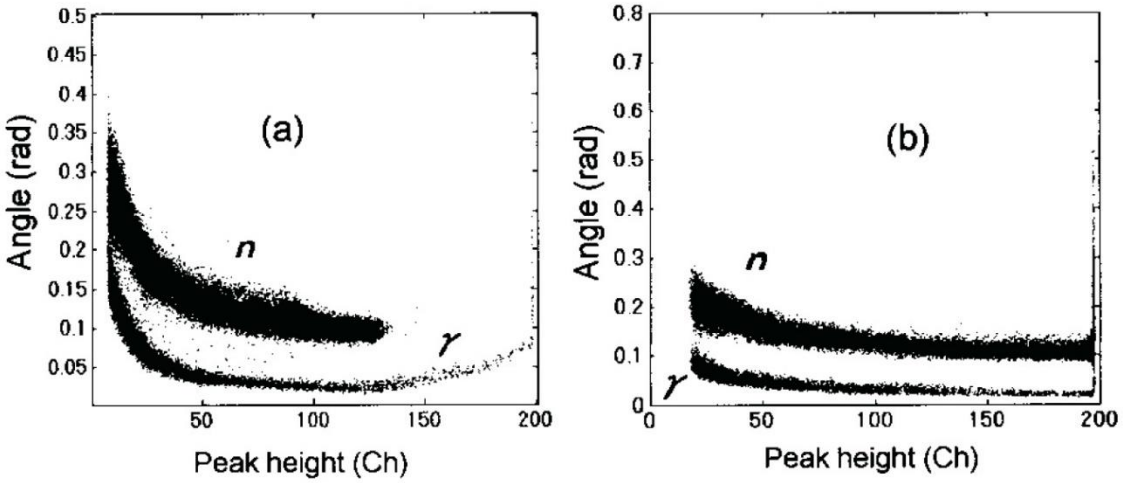


Figura 2-4: Gráficos de pontos para o ângulo (rad) vs. máximo do pico para o método de reconhecimento de padrões; (a) baixo ganho, (b) alto ganho [10]

2.2.4. Comparação dos métodos

Para comparar os métodos usou-se "Figure-of-Merits (FOM)" que comparam o afastamento entre os neutrões e a radiação gama. Quanto maior o FOM maior a separação entre as radiações, ou seja, melhor o método. A Figura 2-5 apresenta a comparação do FOM para os diferentes métodos.

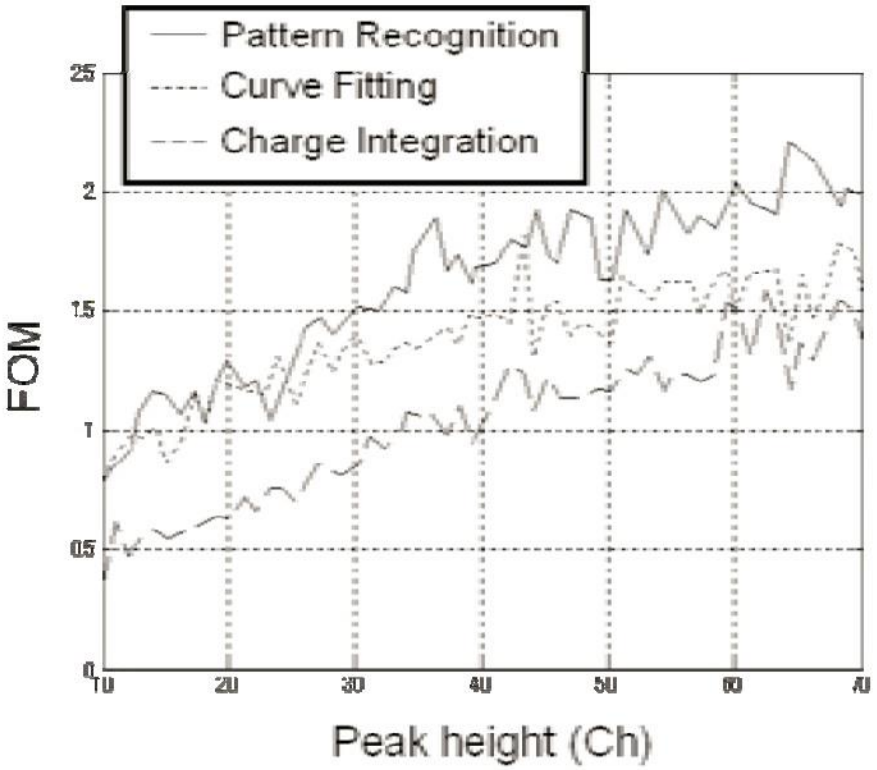


Figura 2-5: FOM vs. máximo do pico para o reconhecimento de padrões, ajuste de curva e comparação de carga [10]

Como se pode observar, o método de reconhecimento de padrões é o melhor, apenas porque o ajuste de uma curva usa uma curva simples de decaimento exponencial.

Para além disso obtiveram-se também os tempos requeridos para análise de 50,000 impulsos, que são apresentados na figura 5 [10]

Método	Tempo (s)
Comparação de carga	128
Ajuste de curva	2086
Reconhecimento de padrões	140

Tabela 2.2-1: Tempos de processamento de 50000 impulsos para os vários métodos [10]

Embora o discriminador por comparação de carga apresente os piores resultados este é o mais rápido, por isso é o preferencial para taxas muito elevadas de radiação. Para taxas menores o reconhecimento de padrões dará melhores resultados.

Este trabalho apresenta três métodos de discriminação de neutrões e radiação gama, dos quais o ajuste de curva não pode ser usado em aplicações em tempo real. Os outros dois também podem, contudo para taxas mais elevadas ter-se-á que usar o discriminador por comparação de carga. Este também é o mais simples de implementar,

embora tenha vários parâmetros para serem otimizados para os diferentes detetores. O reconhecimento de padrões poderá trazer melhores resultados, mas a escolha do impulso padrão poderá não ser muito fácil e é muito importante para obter bons resultados.

Estes métodos terão que ser analisados para os casos específicos do detetor a usar e taxa de radiação à qual este estará exposto. Embora o reconhecimento de padrões apresente melhores resultados e o tempo não é muito maior que o do comparador de carga, este poderá não ser fácil de implementar, pelo que é preferível o discriminador por comparação de carga e se esse não for suficiente terá que se optar por outros métodos.

3. Ferramenta de visualização

Durante o desenvolvimento do algoritmo de calibração foi-se desenvolvendo a ferramenta de visualização dos impulsos. Esta ferramenta permite, usando um ambiente gráfico, a calibração do algoritmo.

A ferramenta foi desenvolvida usando Apps Designer do Matlab. Deste modo foi possível aproveitar as funções desenvolvidas para o processamento dos impulsos.

A ferramenta ao abrir (Open - Figura 3-1) o fluxo de impulsos calcula de imediato o ruído e a base. Temos a possibilidade de escolher como é calculada a base, usando os primeiros pontos do impulso ou constante para todos os impulsos.

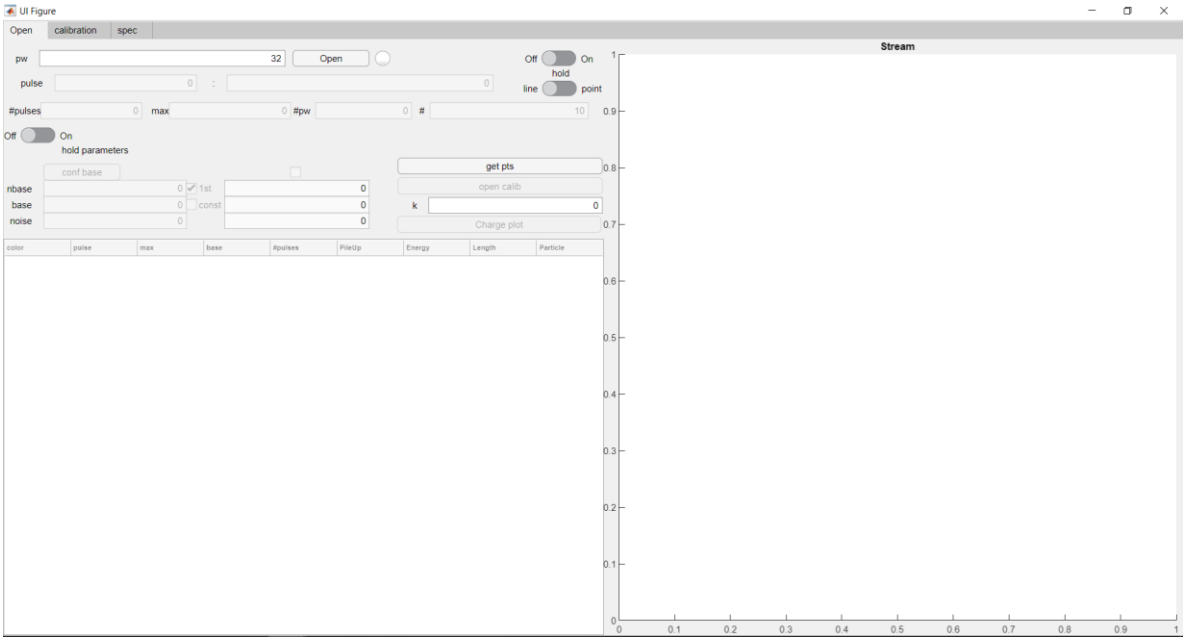


Figura 3-1: Ferramenta de Visualização – início

Depois de aceitarmos o ruído e a base (conf base - Figura 3-1) teremos a possibilidade de visualizar os vários impulsos. Para isso podemos pesquisá-los pelo seu número, pelo número de impulsos presentes na janela pré programada no sistema de aquisição (deteção de empilhamento), pelo tamanho da janela ou pelo máximo do impulso. Para podermos comparar temos os interruptores “hold” que guarda o impulso anterior e apresenta o novo por cima ou podemos escolher o número de impulsos que serão apresentados com certas características em “#”. A Figura 3-2 apresenta o resultado da escolha de 20 janelas em “#” e 2 impulsos em “#pulses” com “#pw” igual a 3 (pw – largura da janela).

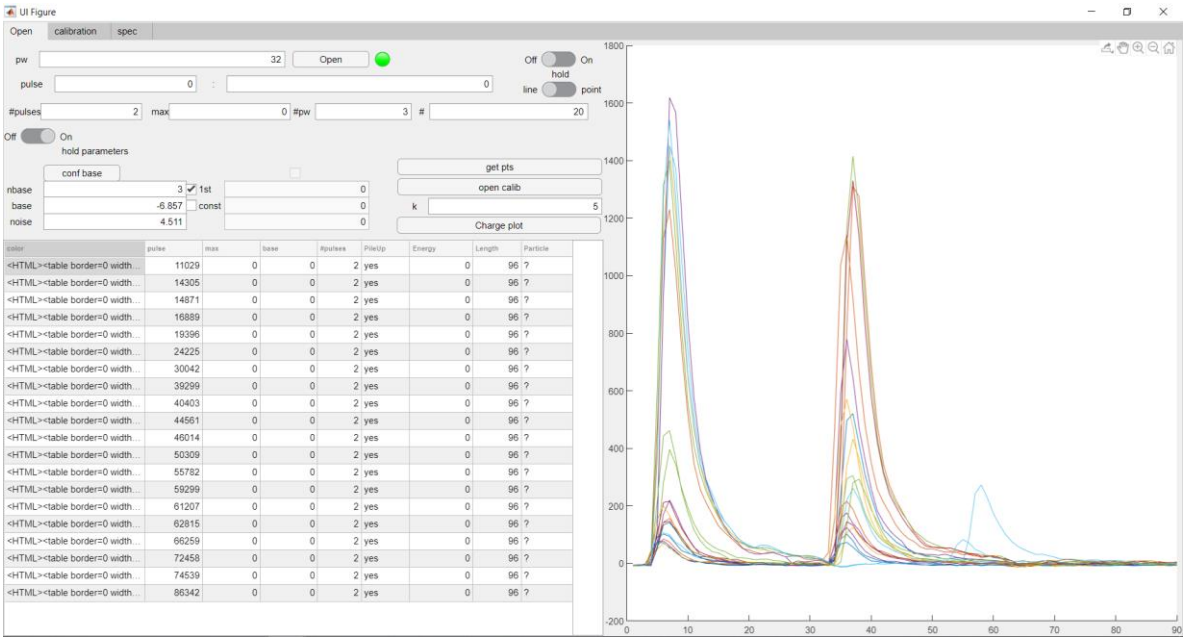


Figura 3-2: Ferramenta de Visualização - 20 janelas com empilhamento de 2 impulsos

Ao carregarmos o ficheiro de calibração (open clib) podemos ainda escolher a opção de "Charge plot" que apresenta o gráfico da carga normalizada em função da energia dos impulsos. Este processo de cálculo foi alterado para a carga normal.

A carga normalizada foi usada para facilitar o cálculo da reta de calibração, que seria uma reta horizontal, no entanto tal não se verificou para baixas energia, necessitando de uma evolução do algoritmo de separação apresentado no próximo capítulo da dissertação. Este processo também cria "ilhas" de carga para os impulsos de janelas estendidas, que se podem visualizar na Figura 3-3 nas energias de 7 10mil. A Figura 3-3 apresenta a ferramenta com o gráfico da carga normalizada.

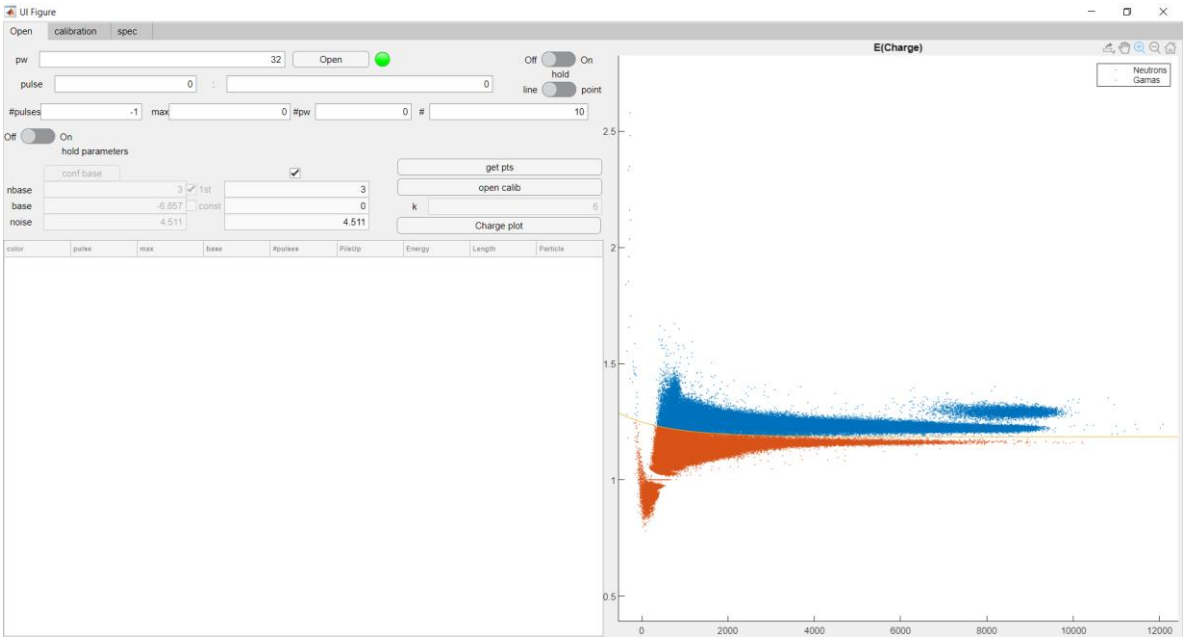


Figura 3-3: Ferramenta de Visualização - Charge plot

No separador da calibração, que só pode ser usado depois do confirmarmos o ruído e a base, podemos obter a reta de calibração.

Para tal temos que escolher o *"k"* que define o número de pontos a serem usados para o cálculo da carga. De seguida, muito cuidadosamente têm que ser escolhidos os limites de energia e a carga para o cálculo dos pontos no vale que separa os neutrões da radiação gama (ver Density - Figura 3-4). Os limites tinham que garantir o número suficiente de gamas e neutrões na secção delimitada para o cálculo da reta de calibração, caso não houvesse, a aplicação dava erro, procedendo-se de novo à colocação dos limites num processo de tentativa e erro. De realçar que este processo foi posteriormente automatizado, de acordo com o capítulo seguinte nesta dissertação.

O gráfico "Charge" (Figura 3-4) apresenta o gráfico da carga em função da energia com os limites de carga e energia apresentados por retas horizontas e verticais respetivamente.

O gráfico "FOM" (Figura de mérito) é usado para comparar os "*k*", embora o melhor seja apresentado automaticamente na janela "best_k". Os picos e vales do gráfico de "FOM" são devido a erro por falta de dados, o limite máximo de energia devia ser menor.

Por último geramos a reta de calibração (calibration curve) e a guardamos (save curve).

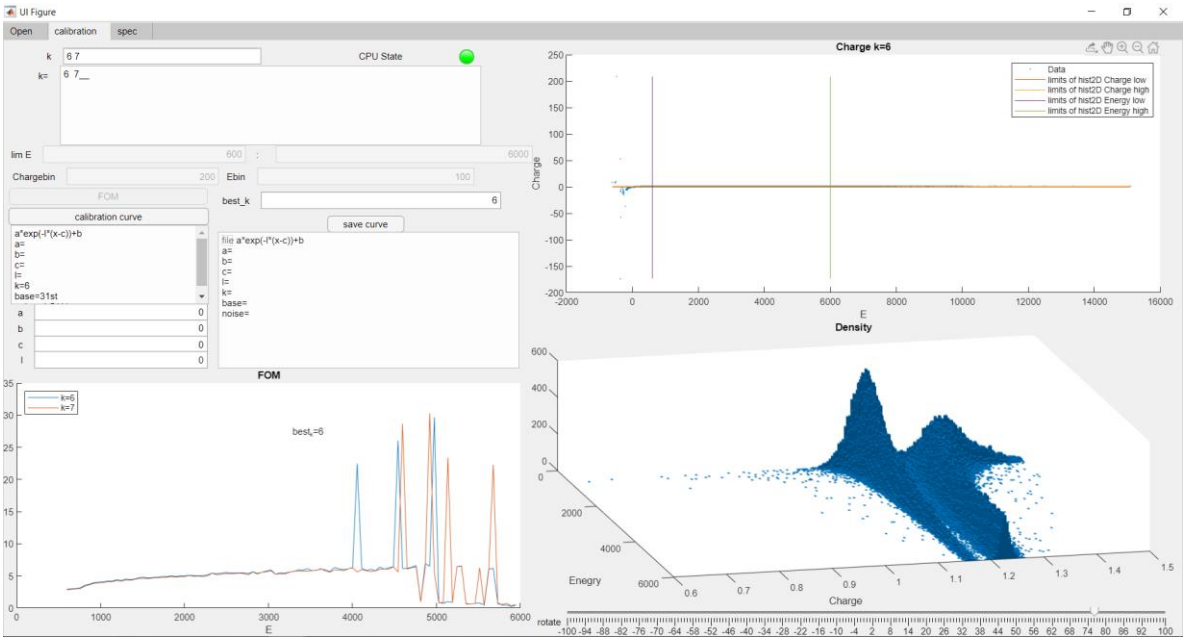


Figura 3-4: Ferramenta de Visualização – Calibração

O separador "spec" apresenta os espetros finais para os neutrões e a radiação gama. Para ativar este separador, primeiramente é necessário guardar ou carregar um ficheiro de calibração.

Aqui podemos também encontrar as percentagens relativas aos neutrões, gamas e dos ambos em relação às janelas de empilhamento (total).

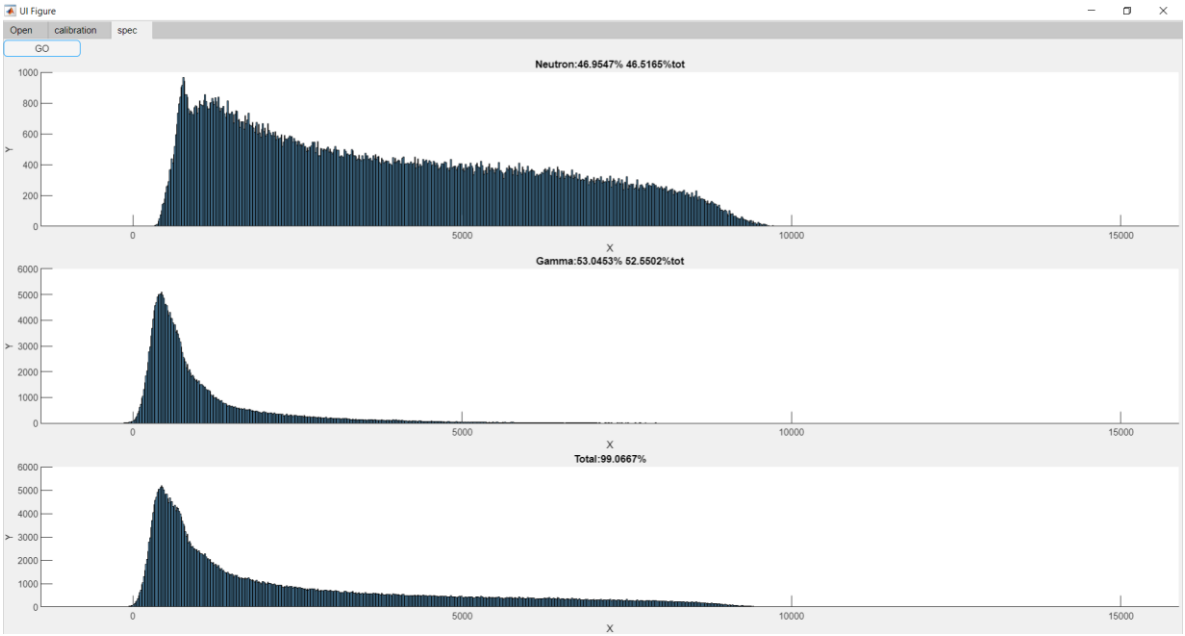


Figura 3-5: Ferramenta de Visualização – espetros

É importante referir que esta aplicação apresenta uma utilidade enorme na visualização rápida de impulsos durante uma nova experiência, na verificação e confirmação dos parâmetros de calibração. Além disso o desenvolvimento desta aplicação serviu a funcionalidade académica de primeira implementação e validação dos algoritmos de processamento que serão apresentados no capítulo seguinte. Estes algoritmos foram posteriormente otimizados e implementados em linguagem C para serem testado em tempo-real.

- Apesar da sua importância no desenvolvimento do trabalho desta dissertação, a utilidade da ferramenta foi ultrapassada e descontinuada. A ferramenta encontra-se funcional, mas apresenta os processos de cálculo antigos como por exemplo o cálculo da base, do ruído e da carga. Os seguintes melhoramentos foram realizados nos algoritmos, mas não foram implementados nesta aplicação: A linha de base passou a ser determinada para cada impulso usando o processo diferencial explicado em 4.3.
- Em vez de usar o ruído passou-se a usar o *threshold* que é o equivalente ao *threshold* da FPGA em unidades diferenciais de energia, ver 4.2.
- A reta de calibração foi alterada com a mudança do modo do cálculo da carga que agora passou a ser calculada como a soma de determinados pontos da cauda dos impulsos sem ser normalizada pela energia, capítulo 4.4.
- O processo de calibração foi automatizado e agora não requer qualquer interferência do lado do utilizador.

4. Algoritmos

A câmara Radial de Neutrões, na performance máxima, produzirá dois megaeventos por segundo por cada detetor. Para controlar o plasma é necessário calcular o perfil da emissão neutrónica a cada dez milissegundos. Portanto, teve que se obter um algoritmo capaz de processar 20 mil eventos a cada 10 milissegundos.

Os dados são adquiridos dos detetores e gerados na FPGA em janelas de 32 (largura de impulso) palavras de 16 bits cada. As primeiras quatro palavras (64bits) são a etiqueta de tempo (instante de registo), as últimas duas palavras são a etiqueta de fim do impulso e o número de janelas que este foi estendido caso o impulso não volte à base, num algoritmo automático de deteção de empilhamento implementado na FPGA. A janela é estendida por mais 32 palavras quando a condição não se verifica.

O Conversor analógico para digital (ADC) é de 12 bits a 1,6 MSPS, mas foi implementado na FPGA um algoritmo de 'oversampling' que permite obter 14 bits a 400 MSPS. O processamento, que será feito no computador anfitrião, para onde a FPGA envia os dados (para a RAM, usando um processo denominado DMA – do inglês Direct Memory Access), terá de processar pelo menos o fluxo de dados gerado por um detetor. Caso o algoritmo seja rápido, poderá ser possível processar dados de mais detetores. No entanto, no máximo teremos o fluxo gerado por quatro detetores devido à limitação de velocidade de transferência de dados entre a FPGA e o computador anfitrião, que no limite de 2 Meventos/s pode atingir os 512 MB/s por detetor.

O objetivo do algoritmo é a apresentação dos espetros de neutrões e gamas a cada 10 milissegundos. Para tal, o algoritmo tem de ser capaz de detetar os seguintes parâmetros:

- Fim e tamanho da janela – os dados são apresentados num fluxo de dados que têm que ser separados em eventos (janelas) para tal, procura-se pela palavra de fim de impulso para cada evento.
- Saturação de impulso – os impulsos saturados não podem ser resolvidos, pelo que têm que ser rejeitados e sinalizados, para que o utilizador possa tomar as correções necessárias.
- *Threshold* – um fator importante para se poder distinguir entre o ruído e impulsos de energia baixa. (ver 4.2)
- Se houve empilhamento de vários impulsos na mesma janela – as janelas com empilhamento de impulsos têm o processamento diferente. Quando duas ou

mais partículas entram num detetor em “simultâneo”, este apresentará vários impulsos totalmente ou parcialmente sobrepostos, os algoritmos têm que ser capazes de lidar com estes casos. (ver 4.3 e 4.5)

- Base do impulso – a base do impulso poderá não ser igual para todos os impulsos pelo que têm que ser determinada para cada um. (ver 4.3)
- Energia da partícula – a energia é calculada a partir de área do impulso.
- Se a partícula é um neutrão ou radiação gama – os detetores de cintilação apresentam diferentes impulsos para diferentes tipos de radiação. (ver 4.4)

Com o objetivo de melhorar a performance de processamento de dados em tempo real, para cumprir os requisitos de tempo de processamento, o algoritmo implementado não fará a separação dos impulsos com empilhamento. No entanto, o algoritmo consegue identificar estes impulsos e realizar a sua contagem. Este cálculo será utilizado para realizar uma correção estatística do número de contagens (4.5). O mesmo procedimento estatístico será aplicado aos impulsos em cujo sistema tenha sido detetado erro na base. Os impulsos saturados também não podem ser tratados, pelo que no fim é apresentado o número de impulsos com este erro.

Os algoritmos apresentados para tratar cada problema estão organizados para funcionarem numa rede que posteriormente devem enviar o seu resultado para um sistema central. Este sistema central tem como objetivo recolher todos dados da RNC (das várias LOS) para serem tratados no tempo requerido para que este reconstrua o perfil de emissividade neutrónica.

O algoritmo sequencial desenvolvido em linguagem C conseguiu atingir o limite de tempo requerido com a taxa sugerida, sendo usado apenas um core do processador (CPU).

Não se verificou qualquer vantagem em usar a capacidade de processamento em paralelo que a placa gráfica (GPU) dispõe. A desvantagem face à utilização da CPU está essencialmente na necessidade de transferência de dados da RAM para a RAM da GPU (VRAM). No entanto, o algoritmo paralelo usado poderá ser otimizado. O algoritmo em paralelo é discutido em maior pormenor no capítulo 4.8.

O computador usado foi ACER ASPIRE VX com processador Intel i7-7700HQ 2.80GHz e uma placa gráfica NVIDIA GeForce GTX 1050.

Para além do algoritmo em tempo real desenvolvido em linguagem C, houve a necessidade de se desenvolver outro para a calibração (ver capítulo 3). Como este não

tem qualquer restringimento temporal foi desenvolvido apenas em MATLAB e os parâmetros resultantes são utilizados como entradas nos algoritmos implementados em tempo-real.

O algoritmo de calibração gera um ficheiro que tem a informação do *threshold* do detetor, informação sobre as palavras a integrar para obter a carga, a reta de calibração e a formatação dos espetros a obter.

O algoritmo de discriminação das partículas gama e neutrões usufrui de uma propriedade dos detetores de cintilação, que exibem caudas de tamanhos diferentes para partículas diferentes de mesma energia. A parte da cauda (carga) escolhida é a que melhor otimiza a separação entre radiações.

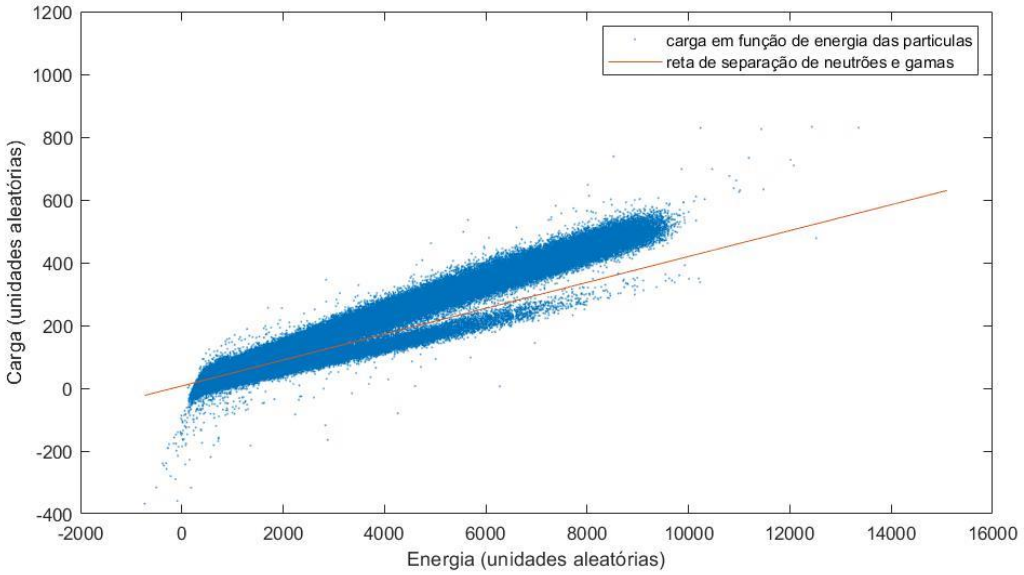


Figura 4-1: Gráfico da Carga em função de energia das partículas com a reta de separação do tipo de partículas. (Os neutrões acima da reta e gamas abaixo)

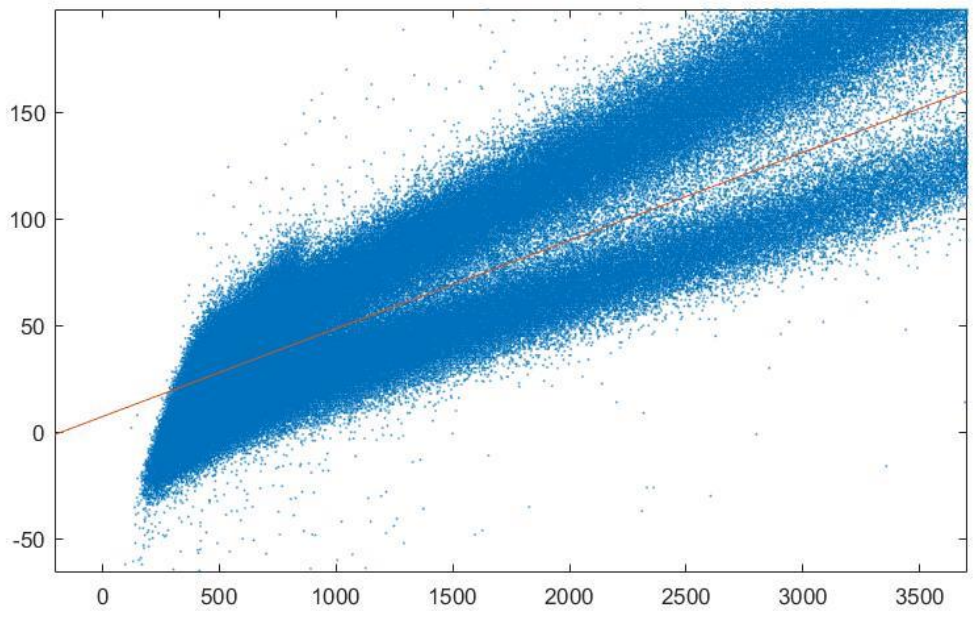


Figura 4-2: Zoom da Figura anterior

O método usado teve boa separação mesmo para energias intermédias, embora não conseguindo discriminar partículas de energias mais baixas. Este método foi discutido em pormenor em 2.2.1.

4.1. Abordagem

Na dissertação usou-se a linguagem C para o software em tempo real para máxima otimização do mesmo. Este tem requerimentos restritos de tempo e lógica, tendo de ser infalível, pois em tempo real este tem de ser capaz de processar os dados em 10ms sem qualquer ajuda humana que será impossível com a temporização requerida.

Durante o desenvolvimento do software foram usados algoritmos bem conhecidos e de melhor performance para garantir resultados em tempo requerido e com boa estabilidade.

Durante a calibração usou-se o Matlab devido à facilidade de tratamento de dados. Calibração não tem qualquer restringimento e necessita de confirmação do lado do utilizador.

4.2. Threshold

Um dos fatores mais importantes na deteção de empilhamento e para o cálculo da base é o ruído obtido durante a calibração. No entanto, concluiu-se que este não

pode ser usado diretamente na deteção de empilhamento (Discriminador de impulso diferencial), pois o ruído é, à partida, inferior que o *threshold* da FPGA.

Com o ruído iremos detetar o empilhamento de impulsos de energia que estão abaixo do *threshold* (energias muito baixas), no entanto este algoritmo não permite separar impulsos de empilhamento. Consequentemente não podemos saber se os impulsos são de energia muito baixa fora da nossa banda de deteção.

Os impulsos de empilhamento serão contados para que no fim sejam usados como correção estatística. Ou seja, estaremos a adicionar à nossa banda de deteção impulsos de baixa energia que não lhe pertencem. Em alternativa resolveu-se usar o *threshold* da FPGA que não detetará estes impulsos de energia muito baixa.

O *threshold* da FPGA é um nível de energia enquanto que o valor a usar no algoritmo é um valor diferenciação. Para transformarmos um noutro usou-se um algoritmo de deteção de *threshold*. Este algoritmo consiste em correr o discriminador de impulsos diferencial com o *threshold* cada vez maior, até que este apresente uma janela sem impulsos (janela com impulso de energia muito baixa, no limite inferior da banda). Neste valor de *threshold* foi atingido o *threshold* da FPGA.

Com este *threshold* não são detetados impulsos de energia muito baixa fora da banda de energia pretendida, a energia destes impulsos será então somada à energia do impulso com o qual houve empilhamento. O que introduz um erro na energia do impulso, sendo este desprezável devido a ser facilmente reconhecível no espectro. Haverá um alargamento dos picos de energia para as energias mais altas, reduzindo a resolução do espetro. Usando o valor obtido para o *threshold* em vez do ruído, evitar-se-á o erro de contagens de impulsos de empilhamento fora da banda de energias pretendida.

4.3. Base e Empilhamento

O empilhamento acontece quando há sobreposição de dois ou mais impulsos na mesma janela. Tal acontece devido a duas partículas entrarem no detetor em simultâneo ou em tempos muito próximos, tais que, a FPGA não tem tempo de acabar de registar o impulso da primeira partícula quando entra a próxima. Caso as partículas entrem em simultâneo, estas terão uma sobreposição “perfeita” de modo a que os máximos de cada partícula estará na mesma posição, inibindo a deteção de empilhamento. Deteção do evento de empilhamento só é possível no caso em que os máximos dos impulsos estejam separados de pelo menos duas palavras, apresentando um máximo, seguido de uma descida e o próximo máximo.

O algoritmo usado consiste em diferenciação de primeira ordem do impulso, pois os impulsos apresentam uma subida rápida, permitindo a deteção de cada impulso. Assim, definindo um valor para o valor mínimo a partir do qual é considerado uma subida e não flutuação devido ao ruído eletrónico, é possível reconhecer o empilhamento.

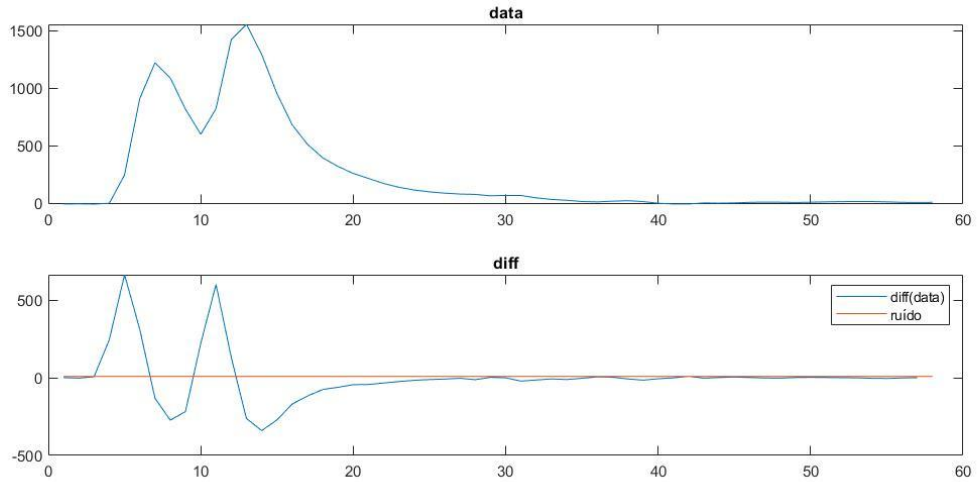


Figura 4-3: Empilhamento (dados de uma janela como empilhamento e a sua diferenciação)

Ao contarmos o número de picos obtemos o número de impulsos, ou seja, verificamos se houve empilhamento ou não. O número de impulsos nas janelas com empilhamento é guardado para correção estatística posterior dos espectros finais.

Como referido anteriormente, em vez do ruído usou-se o *threshold* diferencial, que não deteta impulsos de energias muito baixas. A base pode ser facilmente obtida a partir dos dados de diferenciação de primeira ordem do impulso, obtido no algoritmo de deteção de empilhamento. A base será a média dos primeiros pontos, pontos do início até ao começo de subida do impulso, posição obtida da diferenciação. Caso a posição de subida do impulso seja logo a primeira, não se pode verificar com certeza de que o primeiro ponto já não é um ponto de subida do impulso. Assim, o algoritmo conta o número de janelas em que houve erro de base, para posteriormente corrigir os resultados. O mesmo método é usado para o número de impulsos de empilhamento.

A base só é calculada para janelas sem empilhamento.

As janelas com empilhamento de impulsos são ignoradas no processamento posterior, tal como as janelas com erro na base e janelas com saturação.

As janelas com saturação são contadas, mas não são usadas para qualquer correção dos resultados, pois não é possível determinar o número de impulsos que a janela

contém. Para haver saturação, considerando que os detetores estão preparados para a gama de energias do reator, tem de haver empilhamento de impulsos.

4.4. Discriminação de partículas

Os detetores de cintilação, quando atingidos por uma radiação ou partícula ionizante, dão origem a uma nuvem de eletrões proporcional à energia transferida na colisão da radiação e do material cintilador. Esta nuvem cria uma carga entre o ânodo e o cátodo, entre os quais se encontra o material cintilador, que posteriormente é recolhida.

No caso da radiação gama, a energia é depositada de uma só vez na sua totalidade, dando origem a uma subida rápida no sinal do detetor e uma descida também rápida, pois a descida depende do tempo de recolha de carga.

Para neutrões, a deposição de energia é feita por partes, pois a transferência de energia é feita por colisões sucessivas. Estas colisões são muito rápidas e são geradas várias nuvens de eletrões. Pelo que, embora a subida seja na mesma rápida, a recolha da carga (descida/cauda) é, no entanto mais demorada devido às várias nuvens de eletrões estarem espalhadas pelo material cintilador. Esta propriedade dos detetores é explorada para discriminar o tipo de radiação.

Para obter a reta de separação dos neutrões e da radiação gama representou-se a carga em função de energia de cada partícula num histograma 2D.

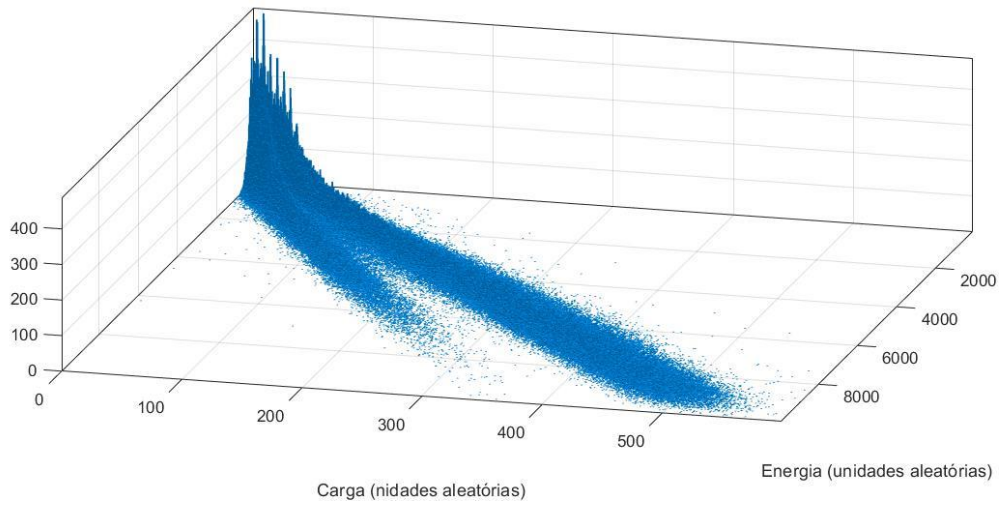


Figura 4-4:Histograma 2D da carga em função de energia

A energia corresponde à integração do total e a carga é só de parte da cauda do impulso, ambos corrigidos com a base.

Para determinar a reta de separação entre as duas distribuições ajusta-se duas normais para cada bin de energia calculando o mínimo ou o ponto médio do vale. Posteriormente faz-se um ajuste linear entre os pontos que são obtidos para cada bin.

Nem sempre é possível obter o ponto de separação, nesse caso o bin de energia é ignorado.

Para determinar a carga que dá melhor separação entre as radiações repete-se o procedimento anterior, sem ajuste, comparando a largura de cada distribuição e a separação entre eles, usando a seguinte fórmula:

$$FOM = \frac{\left|Ch_n - Ch_\gamma\right|}{FWHM_n + FWHM_\gamma}$$

Equação 4.4-1: Figura de Mérito - usada para escolher a carga da melhor separação [10]

Fórmula chamada de "Figura de Mérito" (FOM-"Figure of Merit") em que Ch representa a posição do máximo da distribuição de neutrões(n), gamas(γ) e FWHM é a largura a meia altura.

Usando FOM podemos determinar, quantitativamente, a melhor separação entre a radiação gama e os neutrões para cada bin de energias, sendo melhor quanto maior o valor de FOM

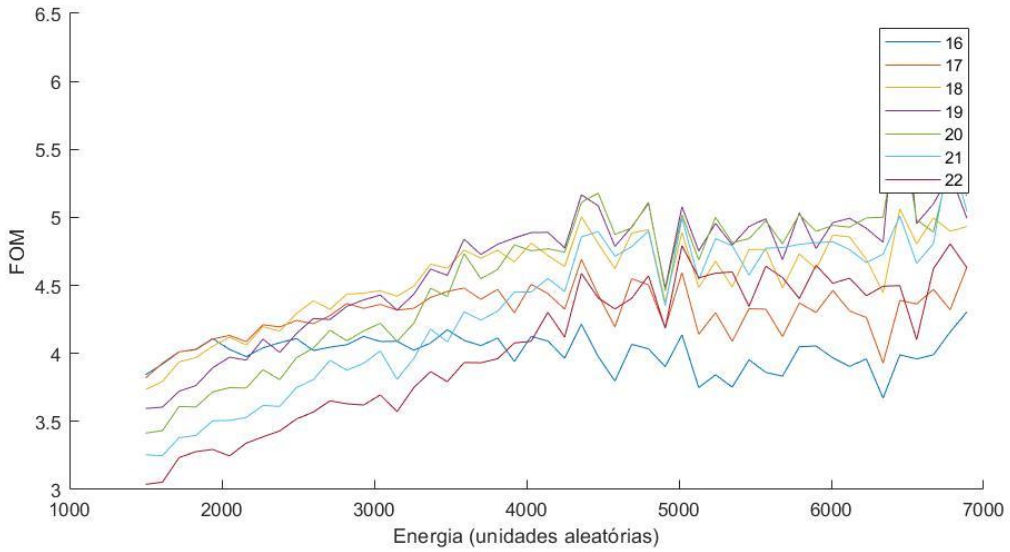


Figura 4-5: FOM para diferentes cargas

Pela figura podemos concluir que o melhor "k" para o cálculo da cauda é o 19. O "k" que apresenta o início do cálculo da carga e como esta é calculada até ao fim da primeira janela, o "k" define completamente a Carga.

Foi determinado que a carga tem de ser calculada usando os mesmos pontos para todos os impulsos de modo a poder compará-los diretamente. Não se pode considerar uma percentagem da cauda, uma vez que isso resultaria num diferente número de palavras, o que resultaria em diferentes tipos de cargas. Neste caso tinhamos "ilhas" de diferentes tipos de carga. Daqui também resulta que, mesmo quando a janela é estendida, só se pode usar os pontos da primeira janela para o cálculo da carga. Verificou-se que o melhor resultado é considerar a carga até ao fim da primeira janela, pelo menos para as energias estudadas.

Como se pode verificar pelo gráfico de FOM, o melhor valor varia para diferentes gamas de energia, pois para energias menores a cauda do impulso acaba mais cedo. Em suma, o melhor resultado é para uma carga que abrange mais valores da cauda, isso é, 16 e 17. Para energias maiores temos que os melhores resultados são para o 19 e 20. Neste caso as caudas já se estendem praticamente até ao fim da janela. Podemos escolher um valor intermédio para abranger toda a gama de energias, no entanto, com a experiências em causa (fusão de D-T e T-T), deveríamos eventualmente escolher um valor que define uma melhor carga para as energias pretendidas. Qualquer que seja a escolha durante a calibração do detetor, a diferença para valores apresentados não é grande, tal como pode ser verificar pelo gráfico.

No algoritmo em tempo real, é calculado o valor de carga predefinida e comparada como o valor da reta de separação da energia da partícula para determinar o tipo de partícula (neutrão ou gamma).

4.5. Correção estatística dos espetros.

Nos algoritmos usados não é possível reconstruir os impulsos de empilhamento, pelo que tem de se usar um método para lidar com estes casos. Este método consiste em contar o número de impulsos de empilhamento e no fim corrigir os espetros de energias dos neutrões e da radiação gama. Para tal multiplica-se cada bin de energia dos espetros pelo fator C.

$$C_n = 1 + \frac{\#\ pulsos\ de\ empilhamento * rácio\ de\ neutrões\ e\ gama}{\#\ pulsos\ simples\ de\ neutrões}$$

Equação 4.5-1: Fator C para correção do espetro dos neutrões

$$C_\gamma = 1 + \frac{\#\ pulsos\ de\ empilhamento * rácio\ de\ gamas\ e\ neutrões}{\#\ pulsos\ simples\ de\ gamas}$$

Equação 4.5-2: Fator C para correção do espetro da radiação gama

Os impulsos de empilhamento nas fórmulas acima são os impulsos de empilhamento mais os impulsos de erro na base, tendo um processamento equivalente.

4.6. Implementação do algoritmo em tempo real

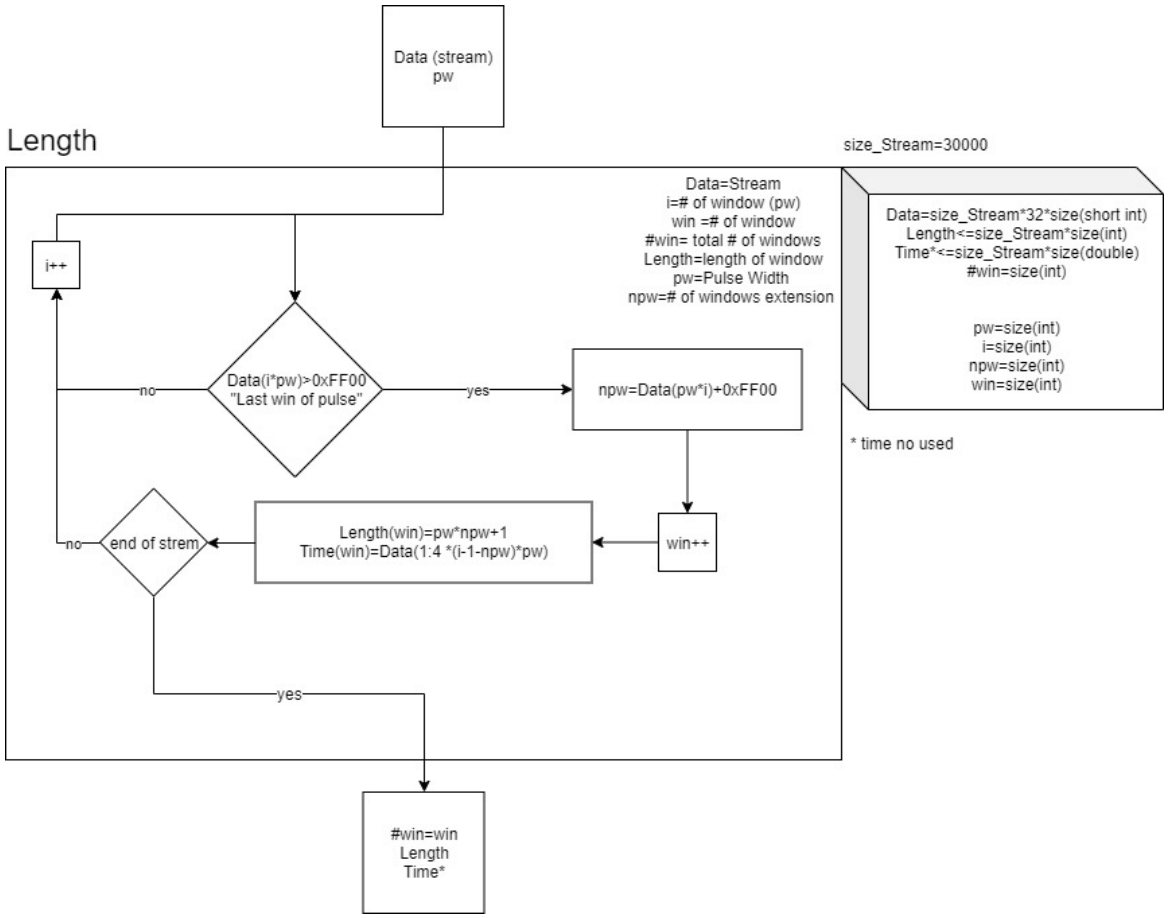
O algoritmo desenvolvido está desenhado de forma sequencial para funcionar num *core* do processador principal. A sua paralelização em termos das várias cores do processador principal é facilmente implementada, mas devido ao número limitado de *cores* disponíveis decidiu-se que a paralelização seria implementada de forma natural, de acordo com o número de canais. Assim sendo, a cada canal de aquisição é atribuído um *core* do processador, paralelizando desta forma o processamento. Uma outra forma mais complexa de implementação de algoritmos paralelos é utilizando as *Graphics Processing Unit* (GPU) disponíveis nas placas gráficas mais recentes. O algoritmo paralelo com a utilização da GPU foi analisado, mas os tempos obtidos foram piores que o algoritmo sequencial. Assim sendo, não é apresentado neste trabalho, apesar de ser uma forma potencial de otimização no trabalho futuro, principalmente no que se refere ao processamento do empilhamento de impulsos em tempo real.

Existe ainda outra alternativa, caso não seja possível atingir os tempos pretendidos. Poder-se-á dividir a *stream* de dados de um canal em duas ou mais partes, e usar vários núcleos para processar partes da *stream* em paralelo, usando o algoritmo sequencial. No fim soma-se os resultados, transformando assim o algoritmo sequencial num algoritmo paralelo capaz de usufruir dos vários núcleos da CPU.

O algoritmo desenvolvido pode-se dividir em três partes, divisão da *stream* de dados em janelas, deteção de empilhamento e cálculo de energia.

A primeira função chamada de *Length* consiste em ler a *stream* com uma formatação específica. Assim, a saída desta função é o número de janelas e o tamanho de cada janela.

A *stream* de dados é constituída por janelas de 32 palavras de 16 bits, em que as primeiras 4 são o tempo e as últimas duas a bandeira de finalização e o número de extensões de janelas. O algoritmo percorre a *stream* de 32 em 32 palavras procurando a bandeira de finalização, quando encontrada gera o *Length* (tamanho da janela).



Função 4.6-1: Length - Tem como entrada o stream de dados e como saída o comprimento de cada evento

A memória alocada para o algoritmo está indicada do lado direito. Para não ter que se alterar a memória em uso durante a execução do algoritmo, diminuindo a performance do algoritmo de tempo real, considerou-se um tamanho constante da *stream* de dados, de 30000 eventos. Considerando que a taxa máxima exigida é de 2Mega eventos por segundo ou seja 20000 por cada 10ms tempo de ciclo do algoritmo, logo 30000 será mais do que suficiente. A memória alocada para a *Stream* (Data), embora indicada no algoritmo, será gerida pelo algoritmo externo que gere o funcionamento da FPGA, pois enquanto uma *stream* está a ser processada pelo algoritmo desenvolvido a próxima *stream* já está a ser carregada para um outro espaço da mesma memória (RAM). Devido a esta elevada utilização de memória embora possível usar este algoritmo em paralelo, processando assim várias *streams* de várias FPGAs, a RAM limitará o número de *streams* a serem processados. O fator limitador do número máximo de *streams* a serem processados em paralelo terá de ser testado no hardware final.

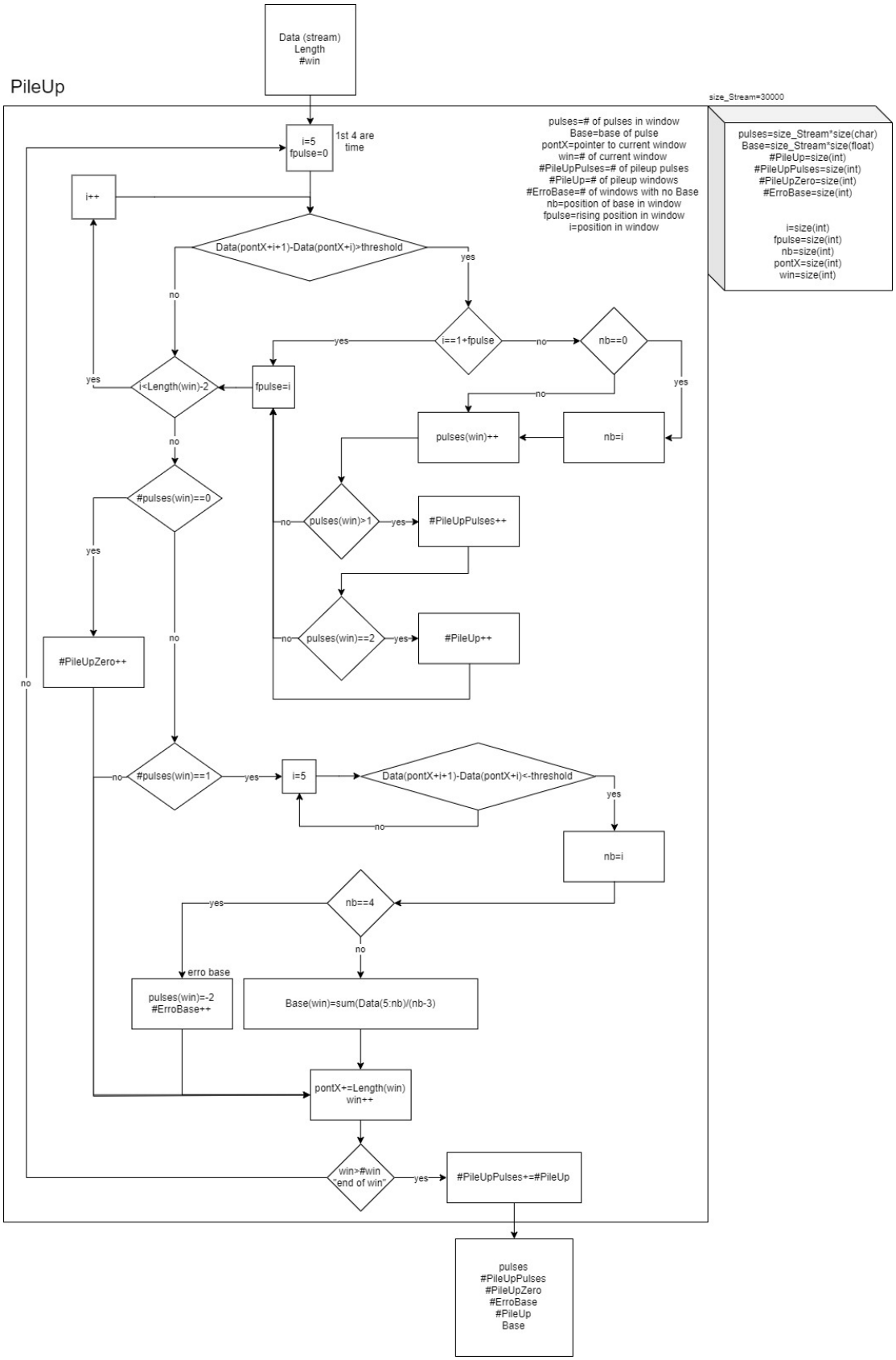
A segunda função analisa cada evento, usado a diferenciação de primeiro grau e comparando-a ao *threshold*, de forma a determinar se houve empilhamento de vários impulsos. O *threshold* é obtido durante a calibração *offline*. Os eventos com empilhamento

não são processados no resto do algoritmo, só será apontado o número de impulsos de empilhamento para posterior correção estatística do espetro final.

Este algoritmo ainda calcula a base dos eventos sem empilhamento. Obtido através da média das primeiras palavras até ao início da subida do impulso. Caso a subida seja logo a primeira palavra, a base não é calculada e o impulso não é processado no resto do algoritmo tal como os eventos de empilhamento. O evento é apontado como evento com erro de base (ErroBase).

Caso no evento não seja detetada nenhum impulso, tal aconteceu nos dados de teste, estes são contados como PileUpZero e este valor é apresentado no final do algoritmo. O mesmo acontece com eventos com saturação.

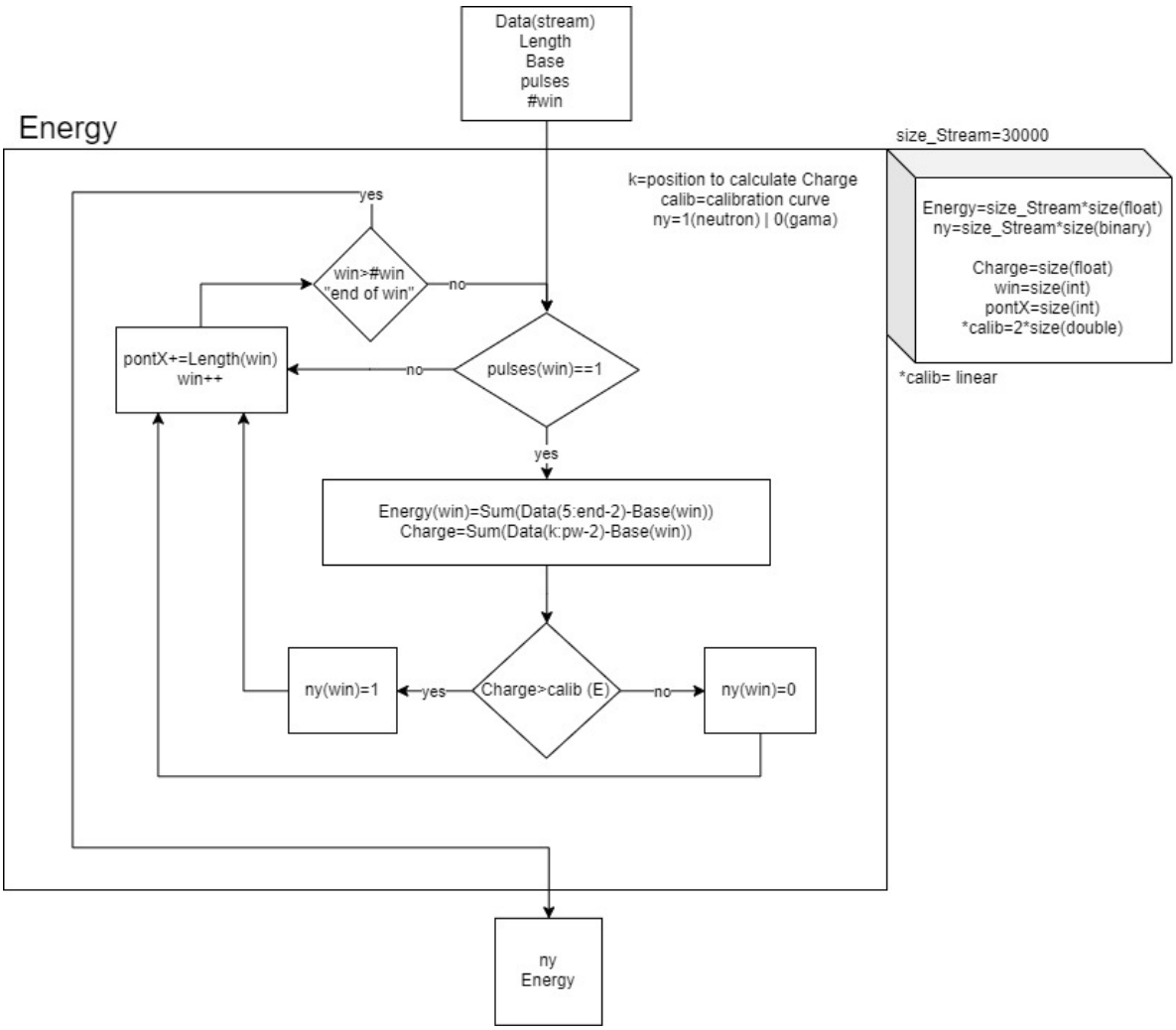
Assim temos como saída desta função: Base, ErroBase, pulses (indicador do número de impulsos no evento), PileUpPulses, PileUp, PileUpZero e Saturação.



Função 4.6-2: PileUp - Deteção de empilhamento e cálculo da Base

A última parte consiste no cálculo da energia do evento, detetando se é um neutrão ou radiação gama e construção do espetro. A energia é a integral de todo o impulso, matematicamente equivalente à soma de todas as palavras do evento usando como base a *Base* obtida na função anterior.

Para distinguir se é um neutrão ou radiação gama, é usada a reta de separação obtida no processo de calibração. Esta usufrui da carga (Charge) que é maior para neutrões e tem uma variação aproximadamente linear com a energia da partícula. A carga é a soma da parte da cauda do impulso, parte que dá melhor discriminação das partículas e que é obtida durante a calibração.



Função 4.6-3: Energy - Cálculo da energia e discriminação do tipo de partícula

O algoritmo de calibração fornece o *threshold*, posição da carga e a reta de separação. Este foi automatizado, no entanto só gera valores adequados caso os dados

usados para a calibração sejam suficientes no espetro todo e para as duas partículas. Avaliação final pelo utilizador é necessária para garantir o funcionamento correto do algoritmo em tempo real.

4.7. Performance

Usando um CPU Intel i7-7700HQ 2.80GHz com sistema operativo CentOS 7 obteve-se os tempos requeridos pelo projeto. O relógio do processador manteve-se nos 3.8GHz durante a execução do algoritmo.

O método de paralelização para o processamento de 4 canais foi testado em simultâneo, não mostrando qualquer diminuição em performance de cada processo individualmente. Os testes foram feitos com 1000 *streams* de 20mil eventos cada, simulando assim as *streams* de 10 ms na carga máxima do trabalho.

Para esta carga de trabalho o número de empilhamentos, eventualmente será maior do que a simulada, mas nestes casos a execução seria mais rápida pois só metade do algoritmo será executado. (Discriminação de partículas não trata dos eventos de empilhamento).

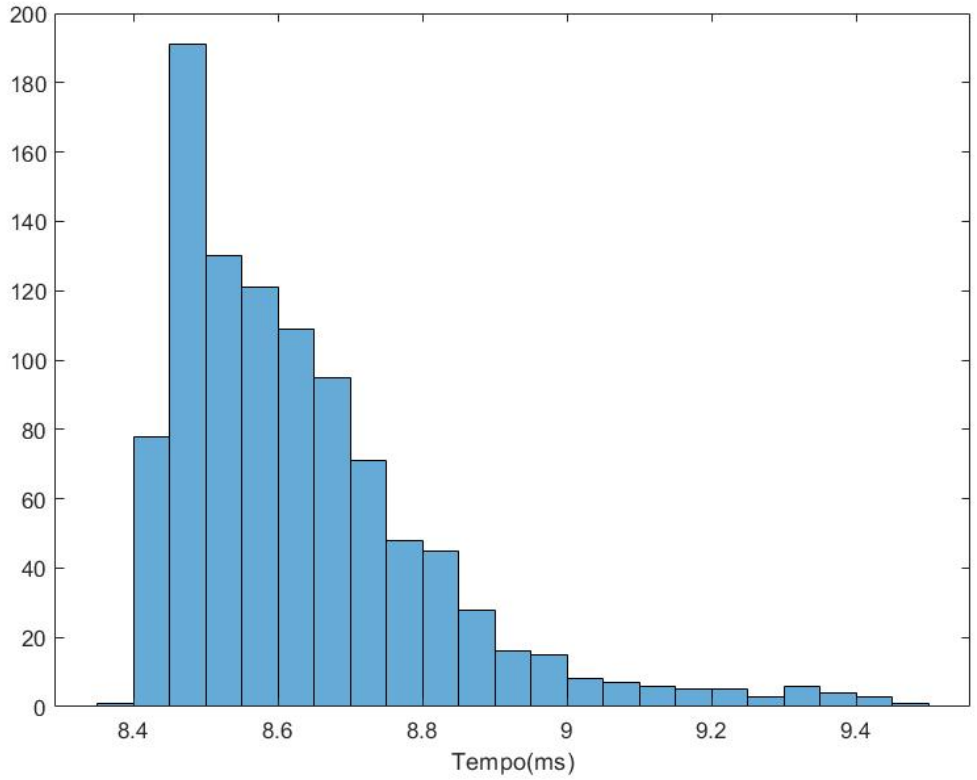


Figura 4-6: Tempos de execução do algoritmo para Streams de 20mil eventos.

Na figura 4-6 podemos ver a distribuição dos tempos de processamento para calcular o histograma de 20 kimpulsos. No histograma podemos verificar que a performance atinge os requisitos pretendidos de processar todos os eventos em menos de 10 ms.

As flutuações no tempo devem-se à instabilidade da frequência do processador e ao facto de não terem sido utilizadas quaisquer extensões de tempo real na instalação standard do Linux.

4.8. Testes preliminares para utilização de GPUs

Foi considerado a utilização da placa gráfica como unidade de processamento para o tratamento dos dados. A GPU apresenta várias unidades de processamento (*GPUs*) pelo que poderia ter vantagem sobre o processador.

4.8.1. Implementações

Foram desenvolvidos vários algoritmos, desde o primeiro algoritmo sequencial que corria em cada unidade de processamento com os dados divididos entre estes. Esta abordagem não teve grande sucesso, pois embora a placa gráfica tenha um grande número de unidades de processamento (640 no caso da GTX 1050 que foi usada) estes são mais lentos (1.354GHZ).

Outro problema com a utilização da GPU é a transferência dos dados da RAM para VRAM. Com a consideração deste problema foram desenvolvidos os próximos algoritmos.

Nas últimas versões são utilizados blocos de 32 *threads* em que cada bloco tratava uma janela, no caso das janelas de 32 palavras. Usando memória partilhada foi possível implementar algoritmos em que diferentes *threads* comunicassem e trabalhassem sobre a mesma função em simultâneo, melhorando a performance.

O algoritmo é praticamente todo executado pelas GPUs à exceção do algoritmo que divide os dados em janelas (*getLength*). Neste caso os algoritmos alternativos que usassem GPUs diminuíam a performance pelo que este permaneceu praticamente inalterado.

4.8.2. Resultados

Os testes foram executados no sistema operativo Windows 10 com uma placa gráfica Nvidia GTX 1050.

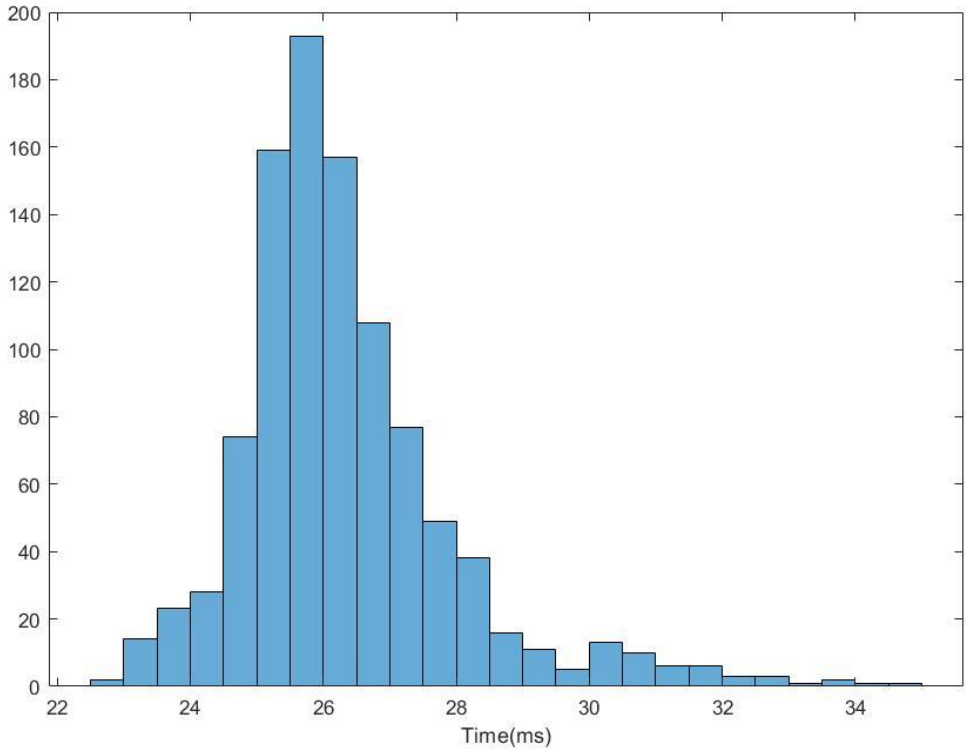


Figura 4-7: Tempos de execução do algoritmo paralelo usando a GPU para Streams de 20mil eventos

Os resultados apresentados são para a versão mais otimizada do algoritmo paralelo. Os dados usados para os testes são os mesmos que para o algoritmo sequencial, que são 1000 pacotes de 20 mil eventos que corresponde ao fluxo máximo estimado, em ciclos de 10 milissegundos.

4.8.3. Avaliação de resultados

O algoritmo paralelo não conseguiu atingir os tempos pretendidos (<10ms). Por esta razão este não é apresentado em detalhe neste trabalho. Os tempos obtidos andam à volta dos 26 ms com picos até aos 35 ms, para um fluxo máximo estimado. Num trabalho futuro o algoritmo paralelo precisa de uma revisão. Este tem o potencial de não só atingir a performance pretendida, mas superá-la. Para atingir melhores tempos pode-se simplesmente aumentar o número de cores de processamento na GPU, que é facilmente atingível em comparação como o aumento da velocidade de processamento da CPU. Escolhendo uma gráfica mais adequada para este tipo de trabalho pode-se atingir um grande melhoramento dos tempos.

5. Conclusão

No trabalho desenvolvido foram implementados vários algoritmos de processamento dos dados digitais da câmara radial de neutrões, dos quais foram escolhidos os mais adequados para o ITER de modo a atingir as restrições de um sistema em tempo real. Sistema no qual qualquer erro poderá resultar num grande risco parar o utilizador e num prejuízo enorme de uma máquina tão complexa como ITER. Deste modo foram desenvolvidos vários algoritmos que não só atingem os requerimentos temporais, mas também são redundantes, garantindo assim não só a execução da tarefa pretendida, mas também a sua repetição consistente.

O tratamento dos impulsos que apresentam vários tipos de radiação foi executado usando algoritmos sequencias e paralelos, dando mais ênfase aos sequencias que obtiveram melhores tempos.

Foi obtido uma separação de 48% de neutrões e 49% de radiação gama, em que o resto são eventos de empilhamento, para dados sintéticos com proporção de 50/50 para as radiações. Estes resultados devem-se a uma imprecisão do algoritmo para as energias baixas. Pela figura abaixo pode se observar a sobreposição da carga para energias baixas.

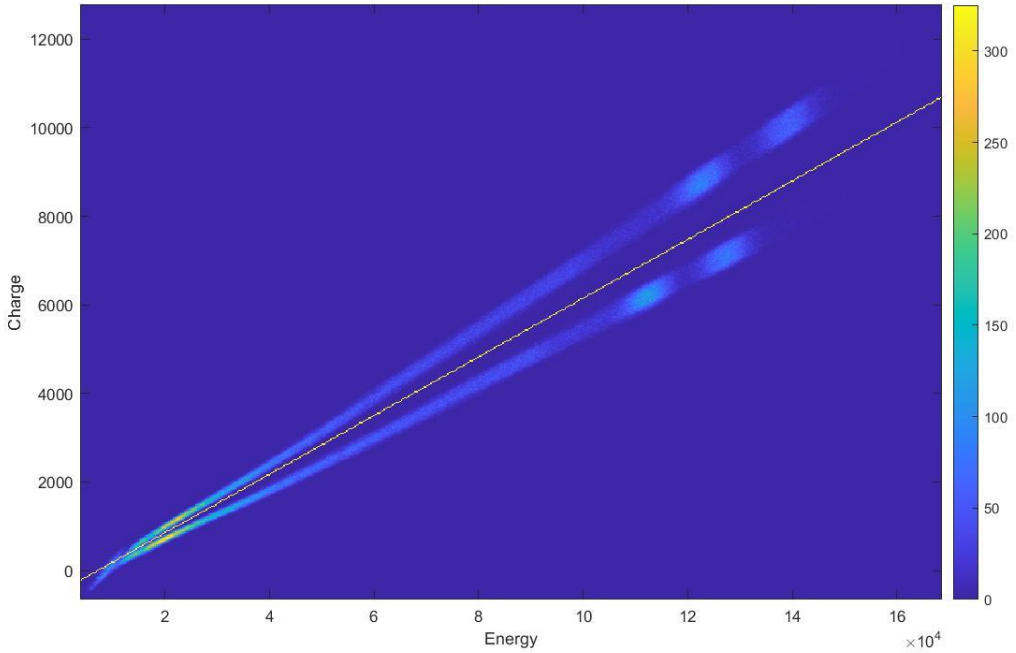


Figura 5-1: Carga em função da energia num gráfico de densidades.

Os algoritmos desenvolvidos geram um espetro para cada radiação de cada detetor da câmara radial de neutrões, sendo este capaz de não só de distinguir entre os neutrões e

radiação gama, mas também capaz de excluir as anormalidades tais como os impulsos saturados ou empilhados.

Figura 5-2 apresenta os espetros para os dados run #17 obtidos pelo Frascati Neutron GEnerator (FNG) no dia onze de janeiro de 2018. Os resultados equivalentes ao algoritmo offline desenvolvido pelos pesquisadores que obtiveram os dados. Com resultados de 60% para neutrões e 40% para radiação gama.

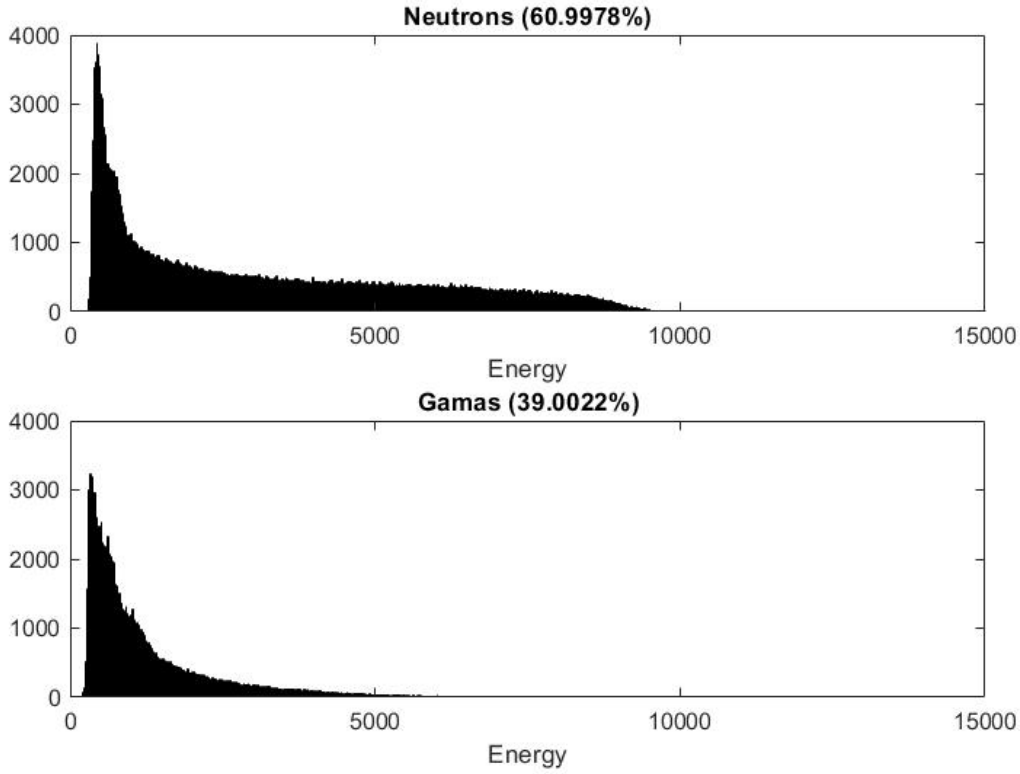


Figura 5-2: Espetros de neutrões e radiação gama para dados Run #17 obtidos em Frascati Neutron Generator em onze de janeiro de 2018

6. Trabalho futuro

À medida que se foi desenvolvendo este trabalho foram surgindo várias alternativas e melhorias possíveis. Entre as quais a mais prometedora é o tratamento do fluxo de dados usando algoritmos paralelos. Esta opção foi analisada durante o trabalho apresentado sendo uma alternativa interessante. Contudo, devido às limitações do hardware e complexidade do algoritmo esta alternativa não conseguiu atingir os tempos requeridos, ficando assim de parte e não é apresentada em pormenor no trabalho. No entanto, esta poderá ser a melhor alternativa para os algoritmos desenvolvidos, tendo um grande potencial.

Uma melhoria do algoritmo descrito será o desenvolvimento de um algoritmo capaz de separar os impulsos empilhados. O algoritmo apresentado contorna o problema excluindo estes casos e usa-os como correção estatística na construção do espetro, influenciando assim a resolução e aumentando o erro na discriminação dos neutrões da radiação gama. A escolha deste algoritmo do tratamento das janelas de empilhamento foi guiada pela performance exigida. Seria interessante estudar os algoritmos de separação de dois ou mais impulsos empilhados na perspetiva de melhoramento dos resultados, embora haja uma necessidade de um hardware com características superiores.

Num trabalho futuro terá que se passar por uma integração completa do algoritmo aqui desenvolvido com o algoritmo que gera a emissividade neutrónica ao longo das linhas de vista dos detetores. Para tal tem que se obter dados reais ou sintéticos de todos os detetores de modo a calcular a emissividade neutrónica sobre os perfis modelo e gerados por outros sistemas de diagnóstico. Os dados sintéticos podem ser obtidos usando geradores de impulsos ou simulando-os usando modelos como o de duas exponenciais.

Referências

[1] "International Energy Agency," [Online]. Available: https://www.iea.org/. [Acedido em June 2020].

[2] D. F. A. M. Baião, "Development of a SXR multichannel electron temperature diagnostic for high-density plasmas in TJ-II," *Tese do INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA,* 2013.

[3] N. S. C. B. d. Cruz, "Digital Control System for Vertical Stability of the TCV Plasma," *Tese do INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, UNIVERSIDADE DE LISBOA,* 2014.

[4] "International Thermonuclear Experimental Reactor," [Online]. Available: https://www.iter.org/. [Acedido em 2020].

[5] A. M. G. Fernandes, "Real-time tools and algorithms for JET Gamma-ray and hard X-ray profile monitor," *Tese do INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, UNIVERSIDADE DE LISBOA,* 2014.

[6] F. Moro, D. Marocco, B. Esposito, D. Flammini, S. Podda, R. Villari e S. Conroy, "Nuclear analysis of the ITER radial neutron camera architecturaloptions," *Elsevier,* 2017.

[7] B. Francesco, B. Esposito, D. Marocco, M. Riva, Y. Kaschuck e B. Georges, "A method for digital processing of pile-up events in organic scintillators," *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment,* vol. 595, nº 2, pp. 512-519, 2008.

[8] S. Marrone, D. Cano-Ott, N. Colonna, C. Domingo, F. Gramegna, E. Gonzalez, F. Gunsing, M. Heil, F. Käppeler, P. Mastinu, P. M. Milazzo, T. Papaevangelou, P. Pavlopoulos, R. Plag, R. Reifarth, G. Tagliente, J. L. Tain e K. Wisshak, "Pulse shape analysis of liquid scintillators for neutron studies," *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment,* vol. 490, nº 1, pp. 299-307, 2002.

[9] W. Guo, R. P. Gardner e C. W. Mayo, "A study of the real-time deconvolution of digitized waveforms with pulse pile up for digital radiation spectroscopy," *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment,* vol. 544, nº 3, pp. 668-678, 2005.

[10] D. Takaku, T. Oishi e M. Baba, “Development of Neutron-Gamma Discrimination Technique using Pattern-Recognition Method with Digital Signal Processing,” p. 4, FEBRUARY 2011.

[11] S. Jamili, E. Bayat, H. Afarideh, F. Abbasi Davani e N. Ghal-Eh, “Digital neutron-gamma discrimination in a wide energy range using pulse reconstruction method,” *Radiation Physics and Chemistry,* pp. 13-16, 9 December 2014.

[12] C. Xiaohui, L. Rong, L. Xinxin e Z. Tonghua, “Analysis of three digital n/γ discrimination algorithms for liquid scintillation neutron spectrometry,” *Radiation Measurements,* vol. 49, pp. 13-18, 2013.