

**INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**

**CARLOS ALBERTO SILVA PONTES**

**APLICAÇÃO TECNOLÓGICA PARA A RADIAÇÃO CÓSMICA NA  
IDENTIFICAÇÃO DE ASFALTENOS E PARAFINAS**

**Julho 2022**

**CARLOS ALBERTO SILVA PONTES**

CARLOS ALBERTO SILVA PONTES

**APLICAÇÃO TECNOLÓGICA PARA A RADIAÇÃO CÓSMICA NA  
IDENTIFICAÇÃO DE ASFALTENOS E PARAFINAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Tecnologia Nucleares.

Orientador: Prof. César Marques Salgado, D.Sc.

Co-orientador: Marcos Santana Farias, D.Sc.

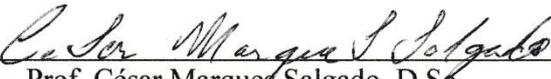
Rio de Janeiro  
2022

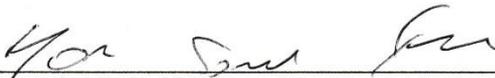
APLICAÇÃO TECNOLÓGICA PARA A RADIAÇÃO CÓSMICA NA  
IDENTIFICAÇÃO DE ASFALTENOS E PARAFINAS

Carlos Alberto Silva Pontes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES

Aprovada por:

  
Prof. César Marques Salgado, D.Sc.

  
Prof. Marcos Santana Farias, D.Sc.

  
Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D.Sc.

  
Prof. Antonio Carlos Fontes dos Santos, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2022

PONT Pontes, Carlos Alberto Silva

Aplicação tecnológica para a radiação cósmica na identificação de asfaltenos e parafinas / Carlos Alberto Silva Pontes. — Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2022.

xiv, 101f. : il. ; 31 cm

Orientadores: César Marques Salgado e Marcos Santana Farias.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Nucleares) — Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2022.

1. Obstruções. 2. Dutos. 3. Muografia. 4. Parafina. 5. Asfalto.

*Viver para outrem.*

*Viver às claras.*

*Viver para o Grande Dia.*

*A. Comte*

## **Agradecimentos**

Meus primeiros agradecimentos são para os Professores D.Sc. César Marques Salgado e D.Sc. Marcos Santana Farias do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) por terem acreditado no trabalho, pela disposição e solicitude na orientação e na disponibilização de dispositivos sem os quais não teria sido possível realizar este trabalho.

Também não poderia deixar de agradecer à Professora D.Sc. Caroline Mattos Barbosa do IEN e ao Professor D.Sc. Gilvan Augusto Alves do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) pela solicitude e presteza quanto ao apoio dado.

Agradecimentos também à minha tia Maria Manuela da Silva Pontes, à minha irmã Vanessa Silva Pontes e a Rafael Garcez dos Santos pelo apoio logístico bem como ao Condomínio do Edifício Morant, localizado na cidade do Rio de Janeiro, na pessoa da Síndica Rute Pitombo, que gentilmente cedeu o espaço para instalação da unidade de ensaios.

Ao grande amigo pessoal Professor M.Sc. Roberto Araujo Gomes, colega de magistério e que esteve sempre incentivando nos momentos difíceis. Igualmente, ao Engenheiro Químico M.Sc. Bruno Milka Souza da PETROBRAS e também, à Técnica de Operação e Química Elaine Cristina Silva de Azevedo, ao Técnico de Instrumentação Rafael de Jesus Filho e ao Técnico Eletrotécnico Cássio Leandro Souza de Oliveira, estes três últimos todos do Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/PETROBRAS), pelas muitas sugestões, orientações e discussões.

E a tantos outros que possa ter me esquecido, meu muito obrigado!

## RESUMO

Dutovias são importantes meios de transporte de matéria-prima e de subprodutos das indústrias química e petroquímica. Eventualmente, o desempenho destas malhas de transporte é afetado por deposições internas totais ou parciais de materiais sólidos como asfaltenos e parafinas. Existem vários procedimentos para prevenir ou mitigar a formação de compostos e deposições indesejados nestes dutos. No entanto, não existe uma única técnica capaz de suprimir por completo a ocorrência dos fenômenos que conduzem à formação destas obstruções que trazem, com certa frequência, impactos econômicos, de segurança e mesmo ambientais.

A proposta deste trabalho é o de avaliar a possibilidade do emprego da radiação cósmica oriunda do espaço e de hardware de baixo custo, com foco no emprego indireto de múons em técnica similar à muografia, no monitoramento contínuo, remoto e preventivo da formação de obstruções oriundas da deposição de parafinas ou asfaltenos em dutos.

Com este objetivo, foi empregado o firmware NodeMCU para registro de eventos simultâneos de detecção de radiação por dois tubos Geiger inseridos em blindagem de chumbo e conectados a circuito eletrônico de detecção simultânea do Tipo Schmitt Trigger. Os dados adquiridos foram enviados via Internet e posteriormente analisados estatisticamente. Foram estudados corpos de prova de vidro e de aço galvanizado contendo ar, água, parafina e asfalto.

Os resultados permitiram estabelecer com segurança a distinção da presença de água em relação à parafina e ao asfalto para corpos de prova de vidro. Por outro lado, a distinção entre corpos de prova do mesmo tipo, contendo parafina ou asfalto em comparação ao ar, demanda a execução de testes mais longos para que se possa estabelecer, com clareza, a distinção entre os mesmos, notadamente nas situações de baixa contagem de eventos simultâneos.

**Palavras-chave:** obstruções, dutos, muografia, parafina, asfalto.

## **ABSTRACT**

Pipelines are important means of transporting raw materials and by-products from the chemical and petrochemical industries. Eventually, the performance of these transport networks is affected by total or partial internal deposition of solid materials such as asphaltenes and paraffins. There are several procedures to prevent or mitigate the formation of unwanted compounds and deposition in these ducts. However, there is no single technique capable of completely suppressing the occurrence of the phenomena that lead to the formation of these obstructions that bring, with certain frequency, economic, safety and even environmental impacts.

The purpose of this work is to evaluate the possibility of using cosmic radiation from space and low-cost hardware, focusing on the indirect use of muons in a technique similar to muography, in continuous, remote and preventive monitoring of the formation of obstructions originating from deposition of paraffins or asphaltenes in pipelines.

With this objective, the NodeMCU firmware was used to record simultaneous events of radiation detection by two Geiger tubes inserted in lead shielding and connected to an electronic circuit of simultaneous detection of the Schmitt Trigger Type. The acquired data were sent via the Internet and later statistically analyzed. Glass and galvanized steel specimens containing air, water, paraffin and asphalt were studied.

The results made it possible to safely distinguish the presence of water in relation to paraffin and asphalt for glass specimens. On the other hand, the distinction between specimens of the same type, containing paraffin or asphalt compared to air, demands the execution of longer tests so that the distinction between them can be clearly established, especially in situations of low simultaneous event count.

**Keywords:** obstructions, ducts, muography, paraffin, asphalt.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Extensive Air Showers ou Chuveiros Atmosféricos Extensos [hyperphysics.phy-astr.gsu.edu, 2021].	25
Figura 2.2 - Curvas teóricas de raios cósmicos ao nível do mar para a cidade de Nova Iorque [Ziegler, 1996].	26
Figura 2.3: Coeficiente de atenuação em função da energia de raios gama incidentes para alguns materiais [Zeb <i>et al.</i> , 2010].	28
Figura 2.4: Correlação entre a intensidade do fluxo de múons e o ângulo zenital [Axani <i>et al.</i> , 2018].	28
Figura 2.5: Espectro de energia dos múons ao nível do mar para diferentes ângulos zenitais [Zhong <i>et al.</i> , 2016].	29
Figura 2.6: A linha contínua no gráfico inclui o registro de múons e de outras partículas do chuveiro cósmico ao passo que a linha tracejada indica apenas a detecção única de múons [Stockel, 1969].	31
Figura 2.7: Foto de 1930 em que aparece a montagem de Bruno Rossi [Clark, 2005].	32
Figura 2.8: Montagem de Bruno Rossi com uso de três contadores Geiger-Müller e blindagem de chumbo com indicação da escala [Clark, 2005].	32
Figura 2.9: Curva de Rossi: destaque para a maior contagem registrada da blindagem de chumbo para valores de espessura de 1,2 cm [Clark, 2005].	33
Figura 2.10: Modelo simplificado da cascata eletromagnética onde $t$ representa sucessivos comprimentos de radiação [Dune, 2000].	36
Figura 2.11: Exemplos de sinas de ENTRADA e SAÍDA para Schmitt Trigger [Cockrill, 2011].	38
Figura 2.12: Aspectos de distribuições para assimetrias negativas e positivas [Wikimedia, 2022].	41
Figura 2.13: Aspecto de distribuições com diferentes valores de curtose [Wikimedia, 2022].	42
Figura 2.14: Exemplo de comparação feita pelo Teste K-S: em vermelho, a curva teórica normal e em azul, a curva experimental ou empírica [wikimedia.org, 2022].	49
Figura 2.15: Estrutura de alguns tipos de parafinas [Ducke, 2015].	50
Figura 2.16: Obstrução parcial de duto ocasionada pela deposição de parafinas [Ducke, 2015].	51
Figura 2.17: Modelo bidimensional de uma molécula de asfalteno [Murgich <i>et al.</i> , 1995].	51

Figura 2.18: Obstruções parciais por asfaltenos em dutos [tecpetro.com.br, 2021].	52
Figura 3.1: Esquema eletrônico do circuito empregado com a indicação de sinais presentes no circuito integrado 74HC14 [Pontes, 2022].	54
Figura 3.2: Sinais registrados por osciloscópio nas escalas de tempo de 50 $\mu$ s e de tensão de 1 V DC: na imagem à esquerda no pino 1 e na imagem à direita no pino 14 do circuito integrado 74HC14. Sinais similares também registrados respectivamente nos pinos 13 e 12 do mesmo circuito integrado [Pontes, 2022].	55
Figura 3.3: Entradas A (pino 1) e B (pino 2) para porta NOR do CI 74HC02 [embarcaados.com.br].	56
Figura 3.4: Detalhes da fonte de alta-tensão ajustável [www.alexnl.com, 2021].	56
Figura 3.5: Tubo Geiger-Müller modelo LND-713 [www.lndinc.com, 2021].	57
Figura 3.6: Placa NodeMCU [wikimedia.org, 2021].	58
Figura 3.7: Tubos GM na horizontal e instalados em "berço" de silicone no interior dos anéis de chumbo [Pontes, 2022].	59
Figura 3.8: Visão da parte posterior dos anéis de chumbo [Pontes, 2022].	59
Figura 3.9: Preparação de negativo em silicone líquido: à esquerda com frasco e canudos de papel inseridos e, à direita, teste de posicionamento com os tubos Geiger-Müller inseridos [Pontes, 2022].	60
Figura 3.10: Molde em gesso criado para deposição do chumbo derretido com régua graduada posicionada para permitir a percepção das dimensões da peça confeccionada [Pontes, 2022].	61
Figura 3.11: Molde contendo chumbo derretido sobre folha de papel alumínio no molde de gesso [Pontes, 2022].	61
Figura 3.12: Anéis de chumbo confeccionados [Pontes, 2022].	62
Figura 3.13: Medidas aproximadas dos anéis de chumbo: à esquerda vista frontal e à direita vista lateral [Pontes, 2022].	62
Figura 3.14: Montagem final dos anéis soldados com estanho: as fotos mostram, sob diferentes ângulos, o frasco de penicilina inserido no interior da blindagem de chumbo [Pontes, 2022].	62
Figura 3.15: Amostra de asfalto com formação de depósito, no fundo de frasco de amostragem, de asfaltenos após diluição e decantação com N-Hexano [Pontes, 2022].	63
Figura 3.16: Frascos de amostra de penicilina contendo parafina (à esquerda) e asfalto (à direita) [Pontes, 2022].	63

Figura 3.17: Luva de aço galvanizado de 1” contendo amostra de parafina (à direita) e asfalto (à esquerda) no interior [Pontes, 2022]. .....	63
Figura 3.18: Algoritmo de programação do módulo NodeMCU [Pontes, 2022]. .....	64
Figura 3.19: Local de instalação da unidade de testes na cidade do Rio de Janeiro [Pontes, 2022]. .....	65
Figura 3.20: Visão com informações de posição (latitude de -22,920388, longitude de -73,178887, altitude de 39,2 m, azimute de 161° e rumo de S70E) na foto da esquerda e visão da luva de aço galvanizado no interior dos anéis de chumbo na foto à direita [Pontes, 2022]. ....	66
Figura 3.21: Posição final da unidade: anéis de chumbo com eixo alinhado com azimute de 46° e perpendicular ao Nordeste (NE ou N46E) na foto à esquerda e posição final em cima da escada à direita [Pontes, 2022]. .....	66
Figura 4.1: Histograma e Percentual Cumulativo para ensaio em ambiente coberto [Pontes, 2022]. .....	69
Figura 4.2: Resultados para variância e média com base na Tabela 4.2 [Pontes, 2022]. .....	70
Figura 4.3: Resultados para assimetria e curtose com base na Tabela 4.2 [Pontes, 2022]. .....	71
Figura 4.4: Histograma e Percentual Cumulativo em espaço aberto para corpo de prova de vidro com ar [Pontes, 2022]. .....	72
Figura 4.5: Histograma e Percentual Cumulativo em espaço aberto para corpo de prova de vidro com parafina [Pontes, 2022]. .....	72
Figura 4.6: Histograma e Percentual Cumulativo em espaço aberto para corpo de vidro com asfalto [Pontes, 2022]. .....	73
Figura 4.7: Histograma e Percentual Cumulativo em espaço aberto para corpo de prova de vidro com água [Pontes, 2022]. .....	73
Figura 4.8: Curvas Cumulativas F dos ensaios com corpos de prova com vidro (frasco de penicilina) [Pontes, 2022]. .....	74
Figura 4.9: Resultados para variância e média com base na Tabela 4.4 [Pontes, 2022]. .....	76
Figura 4.10: Resultados para assimetria e curtose com base na Tabela 4.4 [Pontes, 2022]. ....	76
Figura 4.11: Histograma e Percentual Cumulativo em espaço aberto para corpo de prova de aço com ar [Pontes, 2022]. .....	77
Figura 4.12: Histograma e Percentual Cumulativo em espaço aberto para corpo de prova de aço com parafina [Pontes, 2022]. .....	78
Figura 4.13: Histograma e Percentual Cumulativo em espaço aberto para corpo de prova de aço com asfalto [Pontes, 2022]. .....	78

Figura 4.14: Curvas Cumulativas F dos ensaios com corpos de prova com aço galvanizado (luva de aço galvanizado) [Pontes, 2022].	79
Figura 4.15: Curvas F de todos os ensaios realizados em espaço aberto considerando todos os valores (sem segregação de valores acima da média) [Pontes, 2022].	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Estatística do ensaio sem corpo de prova em ambiente coberto.....	69
Tabela 4.2: Estatística dos ensaios com corpos de prova de vidro em espaço aberto. ....	70
Tabela 4.3: Comparação de ensaios com corpos de prova de vidro em espaço aberto para todos os valores. ....	74
Tabela 4.4: Estatística dos ensaios com corpos de prova de aço em espaço aberto para todos os valores.....	75
Tabela 4.5: Comparação de ensaios com corpos de prova de aço galvanizado em espaço aberto para todos os valores. ....	79
Tabela 4.6: Comparação de ensaios com corpos de prova de vidro em espaço aberto para valores maiores que as médias. ....	80
Tabela 4.7: Comparação de ensaios com corpos de prova de aço galvanizado em espaço aberto para valores maiores que as médias.....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CI	Circuito Integrado
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DC	<i>Direct Current</i> , em português Corrente Contínua
EAS	<i>Extensive Air Showers</i> , em português Chuveiros de Ar Extensos
GEANT4	<i>GEometry ANd Tracking</i> , código Monte-Carlo para simulação com múons
GM ou GMT	<i>Geiger-Müller Tubes</i> , em português Tubos Geiger-Müller
HTTP	<i>Hyper-Text Transfer Protocol</i> , em português Protocolo de Transferência de Hipertexto
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> , em português Ambiente de Desenvolvimento Integrado
IEN	Instituto de Engenharia Nuclear
IoT	<i>Internet of Things</i> , em português Internet das coisas
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> , em português diodo emissor de luz
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NodeMCU	do inglês, nó microcontrolador
NOR	em português, nem
Outliers	em português, valores atípicos
PHP	Pré-Processador de Hiper-Texto, <i>Hypertext Preprocessor</i> , em inglês
PPGIEN	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear
SiPM	<i>Silicon PhotoMultiplier</i> , em português fotomultiplicador de silicone
SMD	<i>Surface Mounted Device</i> , em português montagem em superfície
SN74HC02	Circuito Integrado fabricado pela <i>Texas Instruments</i>
SN74HC14	Circuito Integrado fabricado pela <i>Texas Instruments</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i> , em português Porta Serial Universal
VPN	<i>Virtual Private Network</i> , em português Rede Virtual Privada
VPS	<i>Virtual Private Server</i> , em português Servidor Virtual Privado
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i> , em português comunicação sem fio de alta fidelidade

## SUMÁRIO

Capítulo 1 .....	15
INTRODUÇÃO .....	15
1.1. Contextualização .....	15
1.2. Relevância .....	16
1.3. Revisão bibliográfica.....	17
1.4. Objetivo.....	22
Capítulo 2 .....	23
TEORIA.....	23
2.1. Raios Cósmicos e Múons .....	23
2.2. Radiografia por Múons e Muografia.....	25
2.3. Fluxo de Múons na atmosfera terrestre .....	29
2.4. Cascata Eletromagnética e detecção de Múons.....	31
2.5. Análise Estatística .....	39
2.6. Supressão de <i>outliers</i> por Interquartil .....	47
2.7. Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnov .....	48
2.8. Poder estatístico ou amostral.....	49
2.9. Petróleo, parafinas e asfaltenos .....	50
Capítulo 3 .....	53
MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1. Esquema eletrônico do circuito .....	53
3.2. Fontes de alta-tensão, Tubos Geiger-Müller, bateria e NodeMCU.....	56
3.3. Montagem.....	58
3.4. Confecção de moldes, blindagem de chumbo e corpos de prova.....	59
3.5. Programação cliente e servidor para data logger .....	64
3.6. Local e programação dos ensaios.....	65
3.7. Tratamento dos dados.....	67
Capítulo 4 .....	69
RESULTADOS .....	69

4.1. Resultados de ensaio em ambiente coberto.....	69
4.2. Resultados dos ensaios com corpos de prova de vidro em espaço aberto.....	70
4.3. Resultados dos ensaios com corpos de prova de aço em espaço aberto .....	75
4.4. Resultados com segregação de valores acima das médias .....	80
Capítulo 5 .....	83
CONCLUSÃO.....	83
REFERÊNCIAS .....	85
APÊNDICE I.....	91
APÊNDICE II.....	96
APÊNDICE III .....	98

## Capítulo 1

# INTRODUÇÃO

### 1.1. Contextualização

O senso comum pode nos levar a acreditar que as maiores dificuldades da exploração do petróleo se concentram, sobretudo, nas etapas de extração, quer seja nas modalidades *onshore* (no mar) ou *offshore* (em terra), ou ainda, nas etapas de refino ou de processamento nas indústrias petroquímicas. Fato é que na etapa de transporte dos produtos extraídos ou produzidos, por vezes levada a cabo a longas distâncias, as dificuldades encontradas podem ser igualmente desafiadoras [Oil Region Alliance, 2009].

Diferentes formas de transporte e transferência de petróleo bruto e de seus subprodutos foram criadas desde o século XIX, cada qual com suas vantagens e desvantagens. O transporte utilizando vagões puxados a cavalo carregando barris de madeira contendo petróleo, barqueiros ou ferrovias foram praticamente abandonados sobretudo por força das desvantagens que incluíam, entre outras, a morte de animais e acidentes envolvendo botes, notadamente nos Estados Unidos. Por outro lado, o transporte por dutos ou navios petroleiros, por exemplo, foi aprimorado [Oil Region Alliance, 2009].

Uma grande quantidade de petróleo no mundo é hoje transportada por meio de navios petroleiros de elevado custo de construção e que são utilizados por grandes corporações de exploração e refino de petróleo transnacionais. Contudo, é através de dutos, que percorrem grandes distâncias, que é transportada a maior quantidade de petróleo e produtos refinados no mundo [Oil Region Alliance, 2009].

Os primeiros dutos de transporte de óleo que surgiram nos Estados Unidos eram, obviamente, de curta distância e tinham como objetivo principal e imediato a redução dos custos de transporte para os produtores de petróleo. Foi também nos Estados Unidos que foram construídos vários dutos de transporte de longa distância do também chamado óleo cru. Mesmo recentemente outros oleodutos estão em fase de projeto e discussão e contando, ao menos até o ano de 2009, com o apoio da administração americana para a construção [Oil Region Alliance, 2009].

Contudo, esse apoio da atual administração americana não tem sido visto com bons olhos por parcela da população americana: o transporte por dutos reúne, indubitavelmente, uma série de vantagens em termos de custos segundo os produtores de petróleo e derivados de

qualquer lugar do mundo, inclusive do Brasil. Mas a expansão do emprego do transporte de petróleo e derivados por esse meio trouxe consigo problemas de ordem técnica inerentes que, sem a devida abordagem por meio de monitoramento e manutenção preventiva combinados, podem causar, além de prejuízos econômicos para produtores, danos graves ao meio ambiente e à vida de populações por conta de vazamentos ou obstruções [Guillén *et al.*, 2012].

Mais especificamente, nas regiões de exploração do pré-sal brasileiro, ocorre a obstrução das tubulações empregadas na exploração do petróleo, notadamente por depósitos de parafina [Furtado, 2013]. Além das obstruções atingirem os dutos, elas acabam afetando também válvulas e outros equipamentos nos alinhamentos de processos industriais, ocasionando perda de produtividade [Filho *et al.*, 2016].

No ramo de aplicação de técnicas nucleares, com a finalidade de monitoramento e prevenção de obstruções em dutos, se destacam o emprego de radiotraçadores [Cantuaria, 2016] e de fontes de radiação externas [Marinho *et al.*, 2011]. Por outro lado, o emprego de radiação natural proveniente do espaço na forma de raios cósmicos e mais especificamente de múons, vem pouco a pouco conquistando lugar na geologia, na arqueologia e também na indústria [Kaiser, 2019].

Experimentos para a detecção de objetos compostos por materiais de elevado número atômico com base no espalhamento múltiplo de raios cósmicos, tem conseguido sucesso na localização e imagens de boa resolução dos mesmos [Priedhorsky *et al.*, 2003]. Com o emprego de Código de Monte Carlo específico, o GEANT4, foi possível computar a perda de energia dos múons através de ionização, Bremsstrahlung, a produção direta de pares ( $e^+/e^-$ ) e a simulação de processos discretos de produção de raios gama [Agostinelli *et al.*, 2003].

## 1.2. Relevância

Para se analisar o escoamento de determinada substância de interesse, tal como o petróleo e seus derivados, por exemplo, o uso de observação visual direta na maior parte das vezes é impossível. De modo a permitir o escoamento destes compostos químicos, em sua grande parte tóxicos e inflamáveis, muitos dos dutos que transportam petróleo e derivados operam em condições de pressão e temperatura tais que os riscos ambiental e social a serem considerados em caso de vazamento ou de mal funcionamento de sistemas que se baseiem no emprego de técnicas invasivas de avaliação não podem ser desprezados.

O monitoramento contínuo de obstruções em regiões remotas requer, por outro lado, deslocamento de pessoal e equipamentos por vezes custosos e de logística complexa. Esse fato torna relevante o desenvolvimento de tecnologias não invasivas e alternativas que possibilitem o monitoramento do estado dos dutos de distribuição, subterrâneos ou não, que se localizem em regiões de adensamento populacional, remotas ou de difícil acesso, sobretudo onde não seja viável ou de fácil implementação o emprego de outras técnicas nucleares. Naturalmente, o negligenciamento do monitoramento dessas obstruções, quando não levarem a ocorrência de acidentes, irão predispor ao surgimento de problemas de escoamento de produtos que podem comprometer o rendimento do processo e à maior demanda por manutenções corretivas. Assim, de uma forma ou de outra, invariavelmente ocasionando aumento de custos.

Por sua vez, o emprego de radiotraçadores ou de fontes seladas no monitoramento de dutos, em geral, requer: disponibilidade de obtenção, respeito ao limite de tempo de uso (meia-vida), respeito a aspectos legais e normativos de empresas, controles de segurança rigorosos no transporte e manuseio, atenção a aspectos ambientais quanto ao descarte e de proteção radiológica por conta dos riscos dos mesmos [Duarte, 1973].

### 1.3. Revisão bibliográfica

Chupp *et al.* (1968) realizaram experimentos utilizando balões atmosféricos a grandes altitudes onde estudaram a produção de raios gama produzidos em parafina por raios cósmicos incidentes. Para uma mesma altitude, através dos resultados apresentados por detectores de NaI em balões atmosféricos, ora alojados e ora não no interior de blocos de parafina foi possível observar uma pequena diferença de contagens na faixa de espectro entre 2,2 MeV até 4,0 MeV para as duas situações devido às interações prótons cósmicos e nêutrons.

Stockell (1969) realizou estudo sobre a distribuição angular e a densidade de vertical de múons detectados em locais profundos com o emprego de tubos Geiger superpostos e fotomultiplicadores conectados a um circuito eletrônico de coincidência e alimentados por meio de uma bateria. O registro dos dados foi feito em fitas magnéticas, tendo sido tomado o cuidado de que o aparato tivesse uma resolução de 100 ns para evitar eventos espúrios. Além disso, a saída da seção do aparato denominada de circuito de coincidência rápida, foi configurada para uma duração de pulso de 500 ns antes do sinal ser conduzido à uma outra seção composta de

um circuito de coincidência lenta. O autor eliminou a radiação gama de fundo por meio de polarização do circuito de coincidência.

Ribeiro *et al.* (1997) relatam que hidrocarbonetos pesados apresentam a tendência de precipitarem óleos crus cerosos ao fluírem através de tubulações. Afirmam que a parafina precipitada nas paredes internas destas tubulações tende a estreitar a passagem do produto e por vezes reduzem de forma drástica a vazão do produto. Para eles se trata de um problema sério em dutos *offshore* e que ocorre quando o produto, entrando na tubulação com temperaturas entre 60 °C e 70 °C, sofre resfriamento ao entrar em contato com as paredes internas das tubulações que, em contato com a água do mar, podem atingir temperaturas por volta de 4 °C. Apontam o fenômeno da difusão molecular como processo dominante na formação dessas obstruções.

Chen *et al.* (1997) dividiu os métodos de investigação e interpretação de obstruções causados por parafina em métodos diretos (como o *pigging*) e o emprego de carretéis e indiretos (como o método de transferência de calor ou de queda de pressão). O método de emprego de carretéis (que consiste na retirada do trecho de linha) e o método de *pigging* demandam longo tempo de execução e exigem drenagem das linhas.

Dunne (1999) replicou com sucesso experimento similar ao do Físico Breno Rossi, utilizando três contadores Geiger-Muller acoplados a um circuito de detecção simultânea, demonstrando a formação da cascata eletromagnética resultante da interação dos raios cósmicos ao atravessar placas de chumbo.

Mishev *et al.* (2001) realizaram um estudo experimental para construção de um telescópio baseado no Efeito *Cherenkov* para detecção de múons com detecção por coincidência. O aparato fazia uso de tanque com água para a geração do efeito e detecção posterior por fotomultiplicadoras posicionadas nas laterais e ao fundo de uma contenção.

A National Energy Board (2002), órgão responsável pelo controle e fiscalização do setor energético do Canadá, publicou relatório sobre um caso real de acidente envolvendo a formação de hidrato de metano ocorrido em 2002. Neste acidente, uma obstrução de hidrato de metano se despreendeu a grande velocidade causando ruptura de tubulação, felizmente sem vítimas ou danos severos ao meio ambiente ou às pessoas, mas que causou prejuízo financeiro da ordem de US\$ 109.000 em valores atuais.

Nóbrega *et al.* (2003) comentaram que o emprego de “*pigs*” na inspeção das tubulações e por consequência, das obstruções, torna-se antieconômico haja visto que demanda ser repetido sempre que mudam as características da substância transportada.

Gazineu (2005) comentou que tanto o petróleo extraído como a água de formação vêm acompanhados de radionuclídeos naturais tais como o  $^{226}\text{Ra}$  e o  $^{228}\text{Ra}$  que podem se concentrar em dutos ou equipamentos. Em estudos realizados pela pesquisadora, no estado de Sergipe, foram encontrados  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  e  $^{210}\text{Pb}$ . Gazineu constatou nas amostras de incrustações a presença principalmente de sulfato de bário e sulfato de estrôncio.

Leiroz *et al.* (2005) assinalaram que os bloqueios por parafinas em linhas de extração e transporte de petróleo acabam por exigir maior esforço mecânico e dispêndio de energia por bombas, decrescem o fluxo de produto e obstruem totalmente linhas levando à queda de produção e perda do capital investido.

Bordalo *et al.* (2007) afirmaram que empresas como a Petrobras se deparam constantemente com problemas decorrentes da formação e deposição de parafinas em suas linhas de transporte e extração de petróleo. Assinalaram que a ação corretiva por meio de limpeza com *pigs*, por exemplo, acaba por ser uma operação interventiva que, além dos altos custos envolvidos, acarreta em perda de receita pela parada das linhas de produção. A melhor ação passaria, então, por uma abordagem preventiva, por meio de aditivos, ou ainda de ajustes nas condições de processo, envolvendo ajustes e controles que visem à manutenção da temperatura e da solubilidade em patamares apropriados de forma a inibir ou mitigar a formação de precipitados parafínicos.

Fauth *et al.* (2007) utilizaram com sucesso um sistema de telescópio de múons composto por dois detectores sobrepostos acoplados em um circuito de coincidência com o objetivo de demonstrar, experimentalmente e didaticamente, a dilatação do tempo e contração do espaço dos múons da radiação cósmica.

Marinho *et al.* (2008) realizaram estudos sobre monitoramento e quantificação de incrustações com emprego de métodos radiográficos. Relatam os pesquisadores que o emprego de radiação gama ao invés de raios X se mostrou mais adequado. De acordo com os pesquisadores, o emprego de raios X requer condições de acesso e de bloqueio da unidade que o tornam inapropriado. A radiação gama, atrelada à termografia passiva da tubulação, com o intuito de se localizar e caracterizar as obstruções mostrou-se adequada e revelou que o processo termográfico, com emprego de câmeras fotográficas comuns, requer avanços, mostrando frequentemente resultados imprecisos no que cabe à determinação do estágio de avanço das obstruções.

Buller (2009) observaram que as obstruções que se formam nos dutos de petróleo podem ser de natureza física ou química. Exemplos de obstrução de natureza física são os fragmentos

de rocha ou mesmo areia que são carregados no processo de extração do petróleo. As obstruções de natureza química contemplam: a formação de asfaltenos, parafina e hidratos de carbono. A indústria possui condições e técnicas que possibilitam eliminar, controlar ou inibir a formação destas obstruções.

Gomes (2009) comentou que a presença de parafinas, dentre estas as ceras macrocristalinas formadas por cadeias normais de átomos de carbono entre em número de 18 e 30, é notável nos petróleos do Recôncavo Baiano e no originário do Rio Grande do Norte, o que acarreta uma série de problemas no processamento e também no transporte. Destaca ainda a pesquisadora, três abordagens para a remoção e controle de obstruções: as preditivas, as preventivas e as corretivas.

Segundo Marinho *et al* (2011), quando os valores de pressão e temperatura se mostram alterados em tubulações obstruídas, estas já se encontram em avançado estado de obstrução e de queda de rendimento no que se refere à condução de petróleo.

Conti (2013) levantou que os gastos envolvendo a remoção de bloqueios em linhas de transporte de petróleo podem beirar um milhão de dólares para cada dois quilômetros de linhas inoperantes por conta de obstruções. As parafinas, que compõem alguns destes bloqueios, são compostos inertes de cadeias lineares, ramificadas ou cíclicas que podem estabelecer ligações entre si. Conforme assinala Conti, o petróleo é composto quimicamente por parafinas normais, parafinas ramificadas, parafinas cíclicas, aromáticos, resinas e asfaltenos e, no aspecto de composição, por hidrogênio, carbono, enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais.

Oliveira *et al.* (2014) realizaram um estudo sobre um sistema de transmissão de raios gama na detecção de obstruções em oleodutos com o emprego de uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$  e detectores cintiladores de NaI(Tl). Os autores destacam que as obstruções, além dos equipamentos já citados, podem atingir trocadores de calor, tanques entre outros. Ressaltam ainda não ser interessante perturbar ou interromper processos para a realização de avaliações intrusivas que necessitem de tempo longo ou interrupção do processo e que, o emprego de raios X na análise e localização das obstruções requer isolamento de área, com restrição de acesso aos operadores e outras pessoas de apoio, o que torna este procedimento complexo. Além disso, esse método, dependendo do diâmetro e da localização das tubulações a serem estudadas, pode se tornar tecnicamente de difícil execução, por demandar maior área de segurança para ser levado a cabo.

Nishiyama *et al.* (2016) concluíram que a maior parte do ruído que pode levar a superestimar o fluxo de múons em uma muografia é originado por prótons, elétrons e múons de

baixa energia (limiares abaixo de 1 GeV) quando do emprego de detectores que não discriminam partículas.

Vanini *et al.* (2018) conseguiram bons resultados em simulações utilizando a ferramenta de simulação GEANT4 com emprego de múons na detecção de materiais de sucata e de blocos de chumbo. Além disso, também obtiveram sucesso nas simulações envolvendo a avaliação do interior de alto-fornos confirmando, então, a validade da aplicação da muografia na avaliação de equipamentos industriais de grande porte.

Chaiwongkhot *et al.* (2018) desenvolveram um detector portátil baseado em muografia para o estudo da degradação de estruturas de concreto. O design do detector portátil desenvolvido teve em conta critérios de portabilidade, compactação, demanda de energia elétrica, aquisição de dados online e custo de produção.

Axani *et al.* (2018) desenvolveram pelo MIT um sistema de detecção de múons em tempo real baseado em Python e Arduino de custo em torno de 100 dólares americanos. O projeto, apesar do baixo custo, é originalmente concebido para montagem do circuito em superfície ou SMD e requer o emprego de cintilador plástico com fotomultiplicador de silicone (SiPM).

Martins *et al.* (2019) em seu trabalho sobre a avaliação da eficiência de solventes orgânicos na precipitação de asfaltenos, tiveram melhores resultados no emprego do N-Hexano no lugar do N-Heptano, este último indicado para uso no ensaio D-4124 da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) para avaliação do teor de asfaltenos em amostras de petróleo.

Altameemi *et al.* (2019) conduziram um experimento onde avaliaram a contagem de múons que foram capazes de atravessar diferentes materiais com diferentes espessuras. No arranjo experimental, foram empregados dois tubos Geiger superpostos conectados a um circuito de detecção por coincidência com registro e exibição em tempo real dos dados. Seus resultados confirmaram o comportamento em que se encontra as maiores contagens para espessuras entre 1 cm e 2 cm para este metal. Gráficos de comportamento similar, com outros valores, foram obtidos também para o cobre e para o zinco.

Varga *et al.* (2019) desenvolveram um sistema voltado para o registro de múons que emprega redes Wi-Fi e VPN para a transmissão dos dados coletados e registro em sistemas dedicados remotamente em uma arquitetura do tipo cliente-servidor. O sistema de aquisição de dados era controlado por um microcomputador Raspberry-Pi 3 com sistema operacional Linux.

Alyasiri (2019), em seus experimentos utilizando materiais de diferentes números atômicos, mostrou que estes ao serem atravessados por múons produzem ângulos de espalhamento que se aproximam de uma distribuição gaussiana e que o tempo de exposição ou medição necessita ser tanto maior quanto maior for o objeto a ser estudado por meio dos múons.

Arbol *et al.* (2019) apresentaram em seu trabalho uma nova aplicação para a radiografia por múons na avaliação não-invasiva e não-destrutiva de equipamentos industriais. No trabalho, uma simulação realizada com emprego de simulação computacional considerando exposição de 2 h a uma fonte de múons mostrou bons resultados na análise e estimativa da espessura de uma tubulação de aço.

#### 1.4. Objetivo

O objetivo do presente trabalho é avaliar o emprego da detecção de eventos simultâneos da radiação derivada da cascata eletromagnética proveniente da interação dos múons com uma blindagem de chumbo, em torno de dois tubos Geiger, para se diferenciar asfalto ou parafinas, em corpos de prova de vidro e aço. Para alcançar tal objetivo, foram empregadas ferramentas estatísticas, recursos de hardware e software específicos.

Como objetivos secundários temos: construção do circuito de detecção simultânea de múons, confecção da blindagem de chumbo, confecção dos corpos de prova e elaboração de código de programação para registro e envio de dados via Internet.

## Capítulo 2

### TEORIA

#### 2.1. Raios Cósmicos e Múons

Define-se radiação como emissão de energia que ocorra sob a forma de ondas ou partículas em um meio e que, dependendo de seu comprimento de onda, pode ser capaz de produzir o fenômeno da ionização que é a base da detecção de parte dos equipamentos construídos para este fim. Dentre os vários tipos de radiação conhecidas e relacionados dentro do espectro eletromagnético, a radiação cósmica se apresenta na faixa de frequências superiores a  $10^{21}$  Hz, o que equivale a comprimentos de onda menores que  $10^{-10}$  m, em uma faixa acima dos raios gama de alta energia. Esta característica de frequência e energia torna a radiação cósmica ou os raios cósmicos, descobertos em 1912 por Victor Hess em voos de balão a grandes altitudes [Kaiser, 2018], muito mais penetrantes que os raios gama ou os raios X. Inicialmente acreditava-se que a fonte e a localização de aceleração dos raios cósmicos seriam o Sol e depois a Galáxia. Só em 1956 que o físico Cocconi percebeu que a parte mais energética tinha características extragalácticas, cujo espectro de energia se estende até  $10^{20}$  eV [Alyasiri, 2019].

Os raios cósmicos são, então, geralmente definidos como partículas subatômicas que tem sua origem fora da Terra, principalmente em supernovas [Bonomi *et al.*, 2020] ou buracos negros [Boulicaut *et al.*, 2018], e que se deslocam entre planetas e galáxias [Bonechi *et al.*, 2020]. Contudo, o Sol também emite raios cósmicos, mas com energias típicas menores que 100 MeV [Turnbull, 2011].

Dentre estes, os chamados raios cósmicos primários, principalmente hádrons [Oláh *et al.*, 2017], são aqueles que atingem primeiramente e isotropicamente a atmosfera terrestre [Oláh *et al.*, 2017]. Mesmo que a composição relativa dos raios cósmicos varie em função da energia cinética [Bonomi *et al.*, 2020], os raios cósmicos primários incluem prótons (p) [Morishima *et al.*, 2016] na proporção de 85 % [Alyasiri, 2016] além de núcleos mais pesados e Hélio [Bonomi *et al.*, 2020] na proporção de 12 % [Alyasiri, 2016], elétrons ( $e^-$ ) na proporção de 2 % [Alyasiri, 2016] e antimatéria (pósitrons e antiprótons) [Bonomi *et al.*, 2020] em quantidades muito menores.

Os raios cósmicos secundários ou mésons secundários, principalmente píons ( $\pi$ ) e kaons ( $\kappa$ ) [Oláh *et al.*, 2017] compreendem as partículas produzidas nas cascatas causadas pelas interações dos raios cósmicos primários que incluem além de componentes hadrônicos e suave,

o múonico ( $\mu$ ) [Oláh *et al.*, 2017] onde, é claro, se situam os múons atmosféricos [Bonechi *et al.*, 2020]. A composição dos raios cósmicos secundários depende da altitude, de forma que acima de 5 a 6 km de altitude, prótons são em maior número que os múons ao passo que a cerca de 2 km, múons são cerca de 10 vezes em maior número. Outras partículas que atingem a superfície terrestre têm participação desprezível em comparação aos múons [Bonomi *et al.*, 2020].

Desta forma, é a partir da interação dos raios cósmicos com a atmosfera, então, que surgem os múons. Os múons foram descobertos depois dos raios cósmicos em 1936 por Carl Anderson e Seth Neddermeyer [Kaiser, 2018] quando expuseram uma câmara de nuvens a raios cósmicos. Os múons possuem massa aproximadamente 200 vezes maior que a massa do elétron [Tioukok *et al.*, 2019] com massa de repouso de  $105,658 \text{ MeV}/c^2$  [Fauth *et al.*, 2007] e por conta de sua alta energia conseguem ionizar muitos átomos antes de terem sua energia completamente esgotada [Dunne, 2000]. Possuem tempo de vida curto, como demonstrado pela primeira vez por Rasetti em 1941 [Coan *et al.*, 2021], decaindo para elétrons ( $e^-$ ), pósitrons ( $e^+$ ), neutrinos eletrônicos ( $\nu_e$ ) e muônicos ( $\nu_\mu$ ) e antineutrinos eletrônicos ( $\bar{\nu}_e$ ) e muônicos ( $\bar{\nu}_\mu$ ) conforme tenham carga positiva ou negativa. Conforme o chuvaire de raios cósmicos penetra a atmosfera, este se torna progressivamente mais rico em múons [Alyasiri, 2016].

O tempo de vida curto dos múons de  $2,197 \times 10^{-6} \text{ s}$  [Alexandrov *et al.*, 2017] sofre dilatação por conta do efeito relativístico regido pelo fator de Lorentz [Bonechi *et al.*, 2020], permitindo a estes atingirem a superfície da Terra, a velocidades muito próximas a da luz, em ângulos compreendidos entre o zênite e a linha do horizonte [Cimmino *et al.*, 2019] em trajetória retilínea [Fauth *et al.*, 2007]. Isto lhes confere a capacidade de atravessar a matéria sem a ionizar de forma eficiente antes de pararem por completo [Dunne, 2000].

Os múons atingem o solo, ao lado dos elétrons e pósitrons criados por partículas primárias mais energéticas com energia da ordem de vários TeV, formando os Chuveiros Atmosféricos Extensos, como mostrado na Figura 2.1, que espalham partículas em uma grande área [Oláh *et al.*, 2017]. Pode-se ver também que os múons se originam dos decaimentos dos mésons  $\pi^-$  e  $\kappa^-$  [Alexandrov *et al.*, 2017].

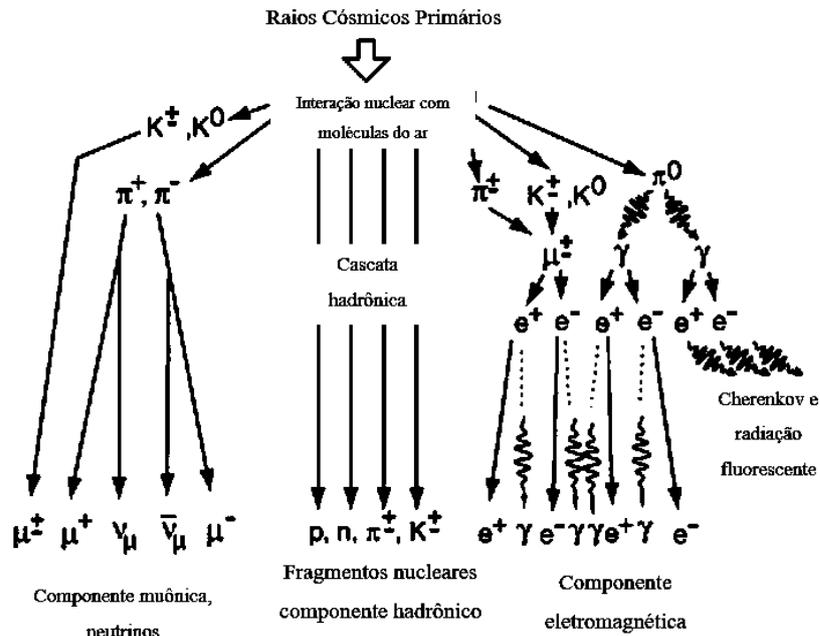


Figura 2.1: Extensive Air Showers ou Chuveiros Atmosf3ricos Extensos [hyperphysics.phy-astr.gsu.edu, 2021].

F3tons e el3trons do Chuveiro Atmosf3rico Extenso, que aparecem na Figura 2.1, perdem energia rapidamente por produ3o de pares (quando um f3ton de alta energia ou de raio gama interage com um n3cleo at3mico, produzindo um el3tron e um p3sitron) e radia3o *Bremsstrahlung* (radia3o produzida quando cargas el3tricas s3o desaceleradas) [Schultz *et al.*, 2004]. A primeira intera3o dos raios c3smicos com o ar atmosf3rico apresentada na Figura 2.1 ocorre a altitude aproximada de 32 km [Zhong *et al.*, 2016].

No Brasil, Cesar Lattes conseguiu, por meio de emuls3es fotogr3ficas especiais registrar a produ3o de p3ons por raios c3smicos e seu subsequente decaimento em m3ons, que por sua vez decaem em el3trons (ou p3sitrons) e neutrinos [Alyasiri, 2019]. Estes m3ons gerados por raios c3smicos s3o altamente penetrantes e vem sendo empregados para radiografia de objetos densos de m3dio a grande porte e por determinado de tempo de exposi3o. Tornam-se, ent3o, uma t3cnica de baixo custo, 3til e sem potencial de risco ao ambiente ou 3 sa3de, por exemplo, na detec3o de materiais densos [Nature, 2003].

## 2.2. Radiografia por M3ons e Muografia

A energia m3dia dos m3ons ao n3vel do mar 3 de cerca de 4 GeV e o espectro 3 praticamente plano e abaixo de 1 GeV [Alyasiri, 2019] conforme se pode ver pelo exemplo, na curva do gr3fico de m3ons, para a cidade de Nova Iorque na Figura 2.2 [Ziegler, 1996]. 3

sabido, no entanto, que múons chegam na direção horizontal à superfície da Terra em menor intensidade, mas com energias acima de 100 GeV. São justamente estes múons que vem sendo empregados, por exemplo, na radiografia de vulcões, pirâmides e cavernas por possuírem alta energia [Kaiser, 2018]. De modo geral, não é possível aplicar diretamente os múons gerados na atmosfera na avaliação de objetos de pequenas dimensões porque quase todos os múons podem penetrar estes tipos de objeto independentemente da mudança de material [Zhong *et al.*, 2016].

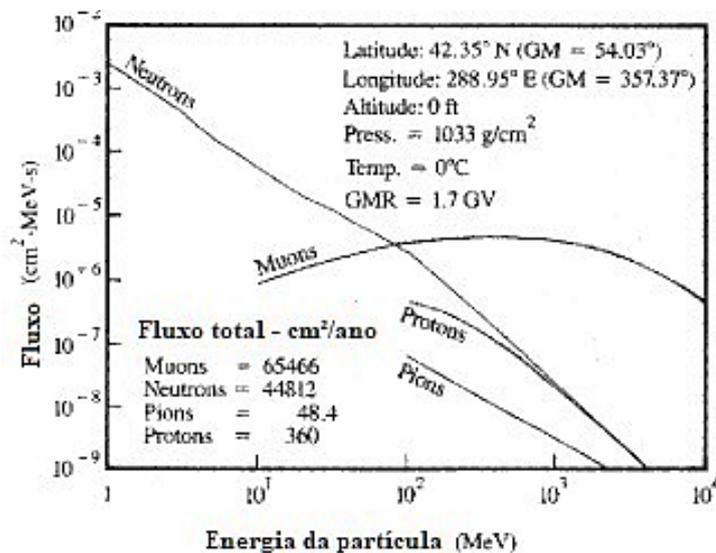


Figura 2.2 - Curvas teóricas de raios cósmicos ao nível do mar para a cidade de Nova Iorque [Ziegler, 1996].

A muografia foi aplicada pela primeira vez em 1970 sendo também conhecida pela denominação de radiografia por absorção de múons [Tioukov *et al.*, 2019]. Alguns autores fazem distinção entre os termos muografia ou radiografia e tomografia por múons: no primeiro caso, o emprego do termo se refere à aplicação dos múons de forma similar aos raios X ou à litografia e que se tornou popular pelos vulcanologistas. No segundo caso, a tomografia por múons se assemelha à tomografia por raios X [Kaiser, 2018].

Um outro tipo de classificação proposta é a que se baseia no comportamento dos múons ao atravessar a matéria, gerando dois tipos de técnicas diferentes. Fala-se em muografia por transmissão ou absorção como sendo aquela que se baseia na perda de energia dos múons e, novamente similar ao emprego dos raios X, de sua probabilidade em atravessar uma quantidade limitada de matéria para avaliar um corpo. Por outro lado, quando o objetivo é avaliar um corpo a partir do espalhamento dos múons dentro de um corpo, define-se a muografia como sendo muografia por desvio [Gómez *et al.*, 2017].

As diferenças de espessura dos objetos analisados por meio da muografia são avaliadas, então, por meio da taxa de atenuação dos múons. No caso dos raios gama, por exemplo, a atenuação se dá pela combinação de três interações principais que são o Espalhamento Compton, o Efeito Fotoelétrico e a Produção de Pares [Altaeemi *et al.*, 2019]. Nesse sentido, dentre os metais, o chumbo possui maior capacidade de atenuação do que, por exemplo, o cobre, o zinco ou o alumínio para os múons [Altaeemi *et al.*, 2019]. A distribuição desta taxa, mensurada por meio de detectores, varia conforme o zênite o azimute em função da trajetória dos múons e pode ser empregada para avaliar a estrutura interna de um objeto. Sendo  $\theta$  o ângulo zenital,  $\phi$  o ângulo azimutal,  $I_t$  a intensidade de múons medida com o objeto na trajetória dos múons e  $I_0$  a intensidade de múons sem o objeto de estudo na trajetória, é possível estabelecer, tal como para outros tipos de radiação, a taxa de atenuação de múons  $D$  através da Equação 2.1 [Chaiwongkhot *et al.*, 2018].

$$D(\theta, \phi) = 1 - \frac{I_t(\theta, \phi)}{I_0(\theta, \phi)}$$

Equação 2.1

Sendo  $\mu$  o coeficiente de atenuação de um material e  $x$  a espessura do material, a intensidade  $I$  pode ser expressa por meio da Equação 2.2.

$$I(\mu, x) = I_0 e^{-\mu x}$$

Equação 2.2

A Figura 2.3 apresenta, como exemplo, alguns valores do coeficiente de atenuação  $\mu$  para diferentes materiais em função da energia para a radiação gama ( $\gamma$ ) [Zeb *et al.*, 2010].

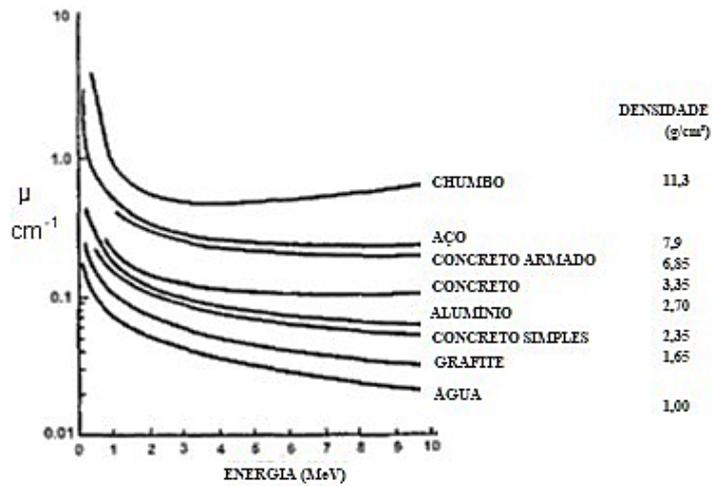


Figura 2.3: Coeficiente de atenuação em função da energia de raios gama incidentes para alguns materiais [Zeb *et al.*, 2010].

O coeficiente de atenuação está relacionado com a energia da radiação incidente, tornando-se praticamente linear (variando pouco) no caso do chumbo para energias maiores que 3 MeV, situação em que a Produção de Pares é dominante. Múons de alta energia interagem com materiais de forma complexa por conta de cascatas fotônicas e de partículas que originam mais interações secundárias. Contudo, a prevalência dos três efeitos (Espalhamento Compton, Efeito fotoelétrico e a Produção de pares) faz a atenuação do múon cósmico ser regida pela Equação 2.2 [Altaeemi *et al.*, 2019].

Desta forma, a imagem formada de corpos está diretamente relacionada à atenuação que ocorre dentro destes. Conhecendo-se a geometria do objeto alvo, a contagem de múons por detectores e os ângulos de chegada, é possível inferir a densidade média da matéria ou a espessura de um corpo através da qual os múons atravessam, porque apenas o efeito integrado ao longo do percurso leva à atenuação do fluxo. Além disso, o tempo de observação do sistema de detecção é inversamente proporcional à área do detector usado [Chaiwongkhot *et al.*, 2018].

A intensidade  $I$  (taxa normalizada) é diretamente proporcional ao quadrado do cosseno do ângulo zenital  $\theta$ , conforme pode ser visto na Figura 2.4 [Axani *et al.*, 2018].

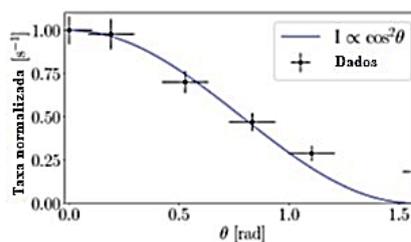


Figura 2.4: Correlação entre a intensidade do fluxo de múons e o ângulo zenital [Axani *et al.*, 2018].

A Figura 2.5 apresenta o espectro de energia dos múons ao nível do mar para alguns ângulos zenitais [Zhong *et al.*, 2016].

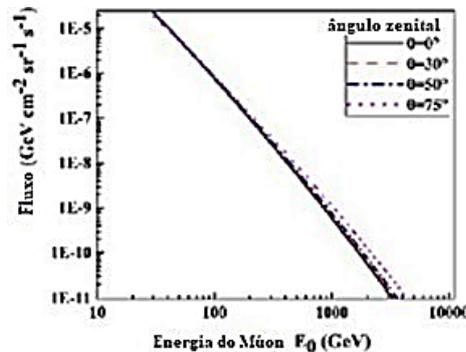


Figura 2.5: Espectro de energia dos múons ao nível do mar para diferentes ângulos zenitais [Zhong *et al.*, 2016].

Ao atravessar a matéria, os múons também podem se distribuir em ângulos de espalhamento com distribuição próxima à distribuição gaussiana, ou seja, a densidade do espalhamento está relacionada ao desvio-padrão da distribuição que, por sua vez, está diretamente relacionado ao número atômico do elemento químico preponderante da composição de um corpo ou alvo [Alyasiri, 2019].

Este espalhamento sofrido pelos múons se deve a colisões inelásticas com os elétrons dos átomos ou elásticas com os núcleos destes [Bonomi *et al.*, 2020] e é uma característica que os torna especialmente indicados à obtenção de imagens de objetos de maior espessura pois, ao contrário dos raios X, estes são partículas carregadas que interagem com a matéria [Borozdin *et al.*, 2002].

De qualquer forma, a perda de energia dos múons pode, então, se dar por interação eletromagnética, ionização, processos radioativos que incluem *Bremsstrahlung*, produção direta de pares de “ $e^+$ ” e “ $e^-$ ” e interações fotonucleares [Amsler *et al.*, 2008 apud Zhong *et al.*, 2016]. O decaimento por *Bremsstrahlung* ocorre em menor número por conta da alta massa e energia do múon [Altameemi *et al.*, 2020].

### 2.3. Fluxo de Múons na atmosfera terrestre

Alyasiri (2019) cita em seu trabalho fatores que afetam a medição do fluxo de múons:

- Velocidade do vento solar;

- Variações das condições atmosféricas como a temperatura (conforme a estação do ano) e a pressão atmosférica que influenciam a densidade do ar. Se a temperatura aumenta, a probabilidade de interação dos mésons torna-se menor e a probabilidade de decaimento em múons aumenta. Por outro lado, aumenta o caminho do ponto de geração dos múons até o detector e um maior número de múons decairá (este último será o efeito dominante). Ou seja, há correlação negativa entre temperatura e fluxo de múons de baixa energia e correlação positiva para múons de alta energia [Cecchini *et al.*, 2012];
- A altitude;
- A latitude, pois o campo geomagnético varia conforme esta e acaba por afetar a penetrabilidade dos raios cósmicos primários, bloqueando raios cósmicos de baixa energia de penetrarem a atmosfera terrestre [Cecchini *et al.*, 2012];
- O “ruído físico” de fundo que provém também dos raios cósmicos (partículas de natureza hadrônica e eletromagnética).

No entanto, com relação à influência das condições atmosféricas, Ramesh *et al.* (2011) não encontraram diferenças nas contagens realizadas entre dias com temperaturas amenas ou mais altas ou alterações relacionadas à atividade solar, em seus experimentos, mesmo os realizados em diferentes épocas do ano.

A taxa de incidência de múons ao nível do mar é estimada em cerca de 1 múon/cm<sup>2</sup>.min com uma energia média de alguns GeV, como já apresentado na Figura 2.5, o que quase sempre requer que os experimentos sejam realizados por longos tempos de detecção [Chaiwongkhot *et al.*, 2018].

Como já comentado na Seção 2.2, ao longo do percurso em um alvo, os múons sofrem múltiplos espalhamentos Coulomb, efeito que aumenta à medida que os múons perdem energia através da matéria. O espectro de energia de múons que saem de um alvo atinge o pico em baixa energia fazendo com que a maior fração de múons atinja o pico em momentos em torno de 1 GeV. Por esta razão, como será apresentado na Seção 2.4, passaram-se a empregar ferro ou chumbo em telescópios de múons [Bonechi *et al.*, 2020]. Por outro lado, é interessante notar que espalhamentos que cheguem aos detectores e que ocorram na superfície de corpos a serem estudados podem se tornar fontes de ruído no caso de múons de baixa energia [Gómez *et al.*, 2017].

Os múons, tal como outras partículas, apresentam diminuição do comprimento de onda à medida que o número atômico do material que este atravessa aumenta. Por exemplo, para uma espessura de 10 cm de água, de aço ou de chumbo, isoladamente, um múon de 3 GeV sofreria espalhamento, respectivamente, de 2,3 miliradianos, 11 miliradianos e 20 miliradianos. Um múon de 3 GeV penetraria mais de 10 m em água [Borozdin *et al.*, 2002].

#### 2.4. Cascata Eletromagnética e detecção de Múons

Um método consagrado para a detecção de múons é o que se baseia na detecção por coincidência e foi criado pelo físico nuclear Walther Bothe em 1924. Bothe provou, por meio de Espalhamento Compton, que os raios cósmicos continham partículas com energias muito maiores que as conhecidas [Clark, 2005].

O objetivo principal ao se empregar a detecção por coincidência combinada à blindagem, é evitar duplicidade e mesmo triplicidade em detecções [Stockel, 1969]. A Figura 2.6 ilustra, por exemplo, a diferença entre os resultados obtidos por Stockel em 1969 em seu experimento de detecção de múons abaixo da superfície da terra.

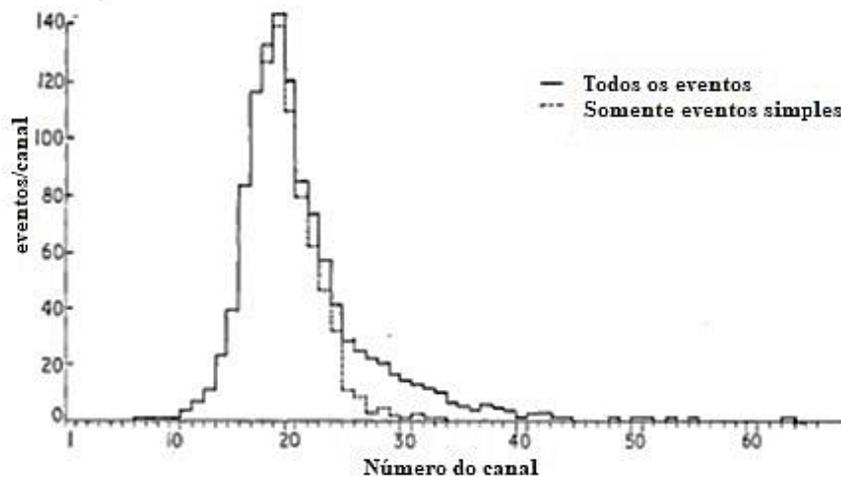


Figura 2.6: A linha contínua no gráfico inclui o registro de múons e de outras partículas do chuva cósmico ao passo que a linha tracejada indica apenas a detecção única de múons [Stockel, 1969].

A história da detecção de múons ganha destaque a partir de 1930, quando o físico Bruno Rossi fabricou contadores Geiger-Müller, alimentou-os com bateria e inventou o circuito de coincidência com emprego de válvulas triodo. Bruno Rossi conseguiu registrar pulsos coincidentes com resultados melhores que Bothe. O circuito passou a ser adotado por

experimentadores ao redor o mundo e uma foto do laboratório onde foi realizada a montagem original pode ser vista na Figura 2.7 [Clark, 2005].



Figura 2.7: Foto de 1930 em que aparece a montagem de Bruno Rossi [Clark, 2005].

Em experimentos, Bruno Rossi realizou medidas comparativas de detecção por coincidência para fluxos de múons vindos da direção leste e oeste e também pesquisou a influência da posição (latitude e altitude) nos resultados obtidos. Em 1932, Rossi realizou um experimento chave, onde colocou três contadores em uma geometria triangular cercados por blindagem de chumbo, como se pode ver na Figura 2.8, onde também é indicada a escala do arranjo. Como uma única partícula não poderia sensibilizar todos os três contadores simultaneamente, as coincidências triplas mostraram que as interações de raios cósmicos, com os detectores no interior da blindagem, só poderiam ser devidas a chuva de partículas. A descoberta foi confirmada depois por meio de fotografias de chuvas de partículas obtidas em câmara de nuvem [Clark, 2005].

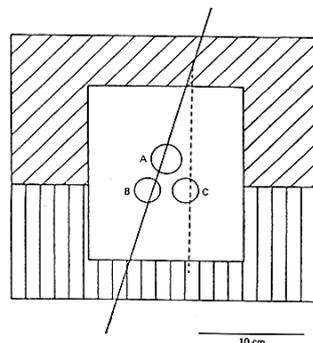


Figura 2.8: Montagem de Bruno Rossi com uso de três contadores Geiger-Müller e blindagem de chumbo com indicação da escala [Clark, 2005].

Em 1933, Bruno Rossi mediu a taxa de ocorrência de chuueiros em função da espessura da blindagem com chumbo colocada acima do arranjo triangular de tubos Geiger-Müller. O resultado, denominado Curva de Rossi, pode ser visto na Figura 2.9.

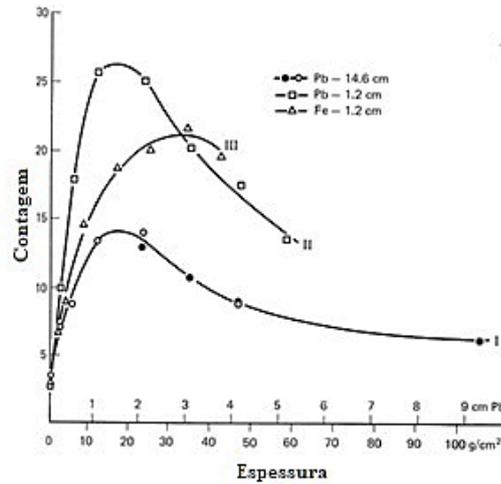


Figura 2.9: Curva de Rossi: destaque para a maior contagem registrada da blindagem de chumbo para valores de espessura de 1,2 cm [Clark, 2005].

Rossi notou, ainda, a presença nos raios cósmicos de dois componentes distintos: um do tipo “leve”, identificado como elétrons e fótons, que produzem “chuvas” e são rapidamente absorvidos pelo chumbo, e outro do tipo “pesado”, composto por partículas penetrantes (múons) que produzem chuva muito menos prontamente e que são atenuados gradualmente no chumbo. A Curva de Rossi e sua dependência do número atômico da blindagem corroborou, assim, a teoria dos chuueiros em cascata elétron-fóton. É possível observar nitidamente na Curva de Rossi presença de duas regiões distintas: a primeira que se estende de contagens mínimas até o máximo de contagens é decorrente da componente “leve” (fótons e elétrons) e responde pelo rápido aumento e diminuição inicial da contagem. A segunda, a região da “cauda”, é devida a componente “pesada” (múons) [Clark, 2005].

Na região próxima ao pico do gráfico para o chumbo são esperados elétrons emergentes do chumbo com energia em torno de 70 MeV. A determinação deste valor é feita com base na Teoria da Cascata Eletromagnética proposta por Martin, Shower e Rossi [Dunne, 2000].

Considerando elétrons relativísticos de energia  $E$  e sendo  $L_R$  o comprimento percorrido pela radiação (*radiation length*) no material alvo (espessura média do material alvo que reduz a energia média de uma partícula carregada de forma exponencial), a taxa média de perda de

energia destes por conta da espessura ou extensão do caminho  $x$  percorrido pode ser expressa por meio da Equação 2.4 [Dunne, 2000]:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{1}{L_R} E$$

Equação 2.4

Sendo  $h$  a constante de Planck,  $m$  a massa do elétron,  $Z$  o número atômico do material do alvo,  $\alpha$  uma constante de estrutura igual a  $1/137$  e  $n_a$  a densidade do material, é possível escrever a relação dada pela Equação 2.5 [Dunne, 2000]:

$$\frac{1}{L_R} = 4 \left( \frac{\hbar}{2mc} \right)^2 Z(Z+1) \alpha^3 n_a \ln \left( \frac{183}{Z^{1/3}} \right)$$

Equação 2.5

A partir da Equação 2.4 é possível escrever a Equação 2.6:

$$E_x = E_0 e^{-\frac{x}{L_R}}$$

Equação 2.6

A partir da Equação 2.5 é possível observar que  $L_R \propto m^2$  e como a massa do múon é, como já citado, aproximadamente 200 vezes maior que a massa do elétron, o múon irá apresentar comprimento de radiação muito maior que o comprimento de onda do elétron, razão pela qual a perda de energia por *Bremsstrahlung* se torna desprezível se comparada com a dos elétrons. Isso torna possível ao múon, como já apontado, atravessar extensões de material absorvente antes de atingir o repouso [Dunne, 2000].

Por outro lado, sendo o caminho livre médio  $\lambda$  dos fótons em um material, a absorção destes por meio de Produção de Pares também tem um caráter exponencial e a taxa de atenuação  $I$  de fótons por segundo ao percorrer uma distância  $x$  pode ser expressa por meio das Equações 2.7 e 2.8 [Dunne, 2000]:

$$\frac{dI}{dx} = -\frac{1}{\lambda} I$$

Equação 2.7

$$I_x = I_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

Equação 2.8

A relação entre o caminho livre da absorção de fótons por meio da Produção de pares se relaciona com o comprimento de radiação para um elétron derivado de *Bremsstrahlung* por meio da Equação 2.9 [Dunne, 2000]:

$$\lambda = \frac{9}{7} L_R$$

Equação 2.9

Desta forma, Dunne (2000) descreve, então, um modelo simplificado para a geração sucessiva de fótons e de pares elétron-pósitron, a saber:

- As partículas carregadas iniciais têm energia  $E_0$  muito maior que a energia crítica  $E_c$ , o que faz com que as perdas de energia por ionização superem a produção de pares ( $E_0 \gg E_c$ );
- Admite-se que cada elétron que tenha  $E_0 > E_c$  percorre um comprimento de radiação e que, em seguida, ceda metade de sua energia para um fóton *Bremsstrahlung*;
- Admite-se que cada fóton produzido de energia  $E_\gamma > E_c$  percorre um comprimento de radiação e que, em seguida, dê origem a um par elétron-pósitron, com cada partícula carregando consigo a metade da energia do fóton original;
- Os elétrons com energia  $E < E_c$  param de irradiar e irão perder energia por conta de colisões.

A Figura 2.10 ilustra o modelo simplificado [Dune, 2000]:

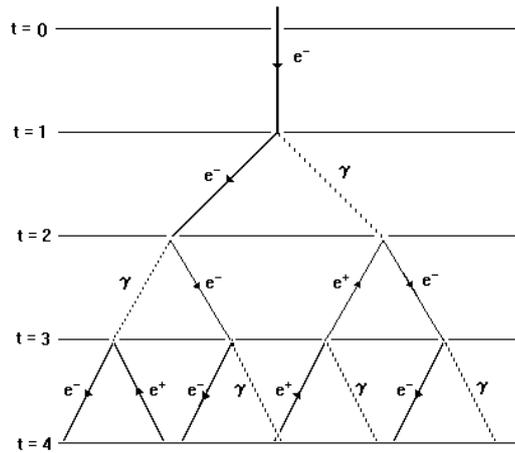


Figura 2.10: Modelo simplificado da cascata eletromagnética onde  $t$  representa sucessivos comprimentos de radiação [Dune, 2000].

Após  $t$  comprimentos de onda de radiação o “chuveiro” irá conter  $2^t$  partículas, havendo quantidades aproximadamente iguais de elétrons, pósitrons e fótons, onde cada um destes terá energia média dada por meio da Equação 2.10 [Dune, 2000].

$$E(t) = \frac{E_0}{2^t}$$

Equação 2.10

O processo de cascata eletromagnética segue até  $E(t)=E_c$  e a espessura do material absorvedor em que a cascata se interrompe,  $t_{máx}$ , pode ser determinada a partir da Equação 2.11 e definida, então, pela Equação 2.12 [Dunne, 2000]:

$$2^t = \frac{E_0}{E_c}$$

Equação 2.11

$$t_{máx} = \frac{\ln\left(\frac{E_0}{E_c}\right)}{\ln 2}$$

Equação 2.12

Rossi concluiu, então, que o aumento em poucos milímetros de espessura do chumbo fez a taxa de coincidência diminuir, mas mais que isso, que isto se devia às partículas secundárias que foram produzidas pelos múons que entram na matéria e que sofrem absorção crescente por conta do aumento da espessura total do material absorvedor [Kampert *et al.*, 2012].

O conjunto destas partículas secundárias produzidas pelos múons ao atravessar a matéria forma justamente a cascata eletromagnética a qual é composta por uma “avalanche” de elétrons, pósitrons e raios  $\gamma$ . A cascata se inicia quando um raio  $\gamma$  passa próximo do núcleo de um átomo. A natureza eletromagnética do raio  $\gamma$  permite a ele interagir com o campo elétrico forte do núcleo, o suficiente para causar a materialização de um par elétron-pósitron, o que requer cerca de 1 MeV [Dunne, 2000].

Contudo, como os raios  $\gamma$  podem ter até 1 GeV, o par elétron-pósitron produzido pode continuar compartilhando quase toda a energia dos raios  $\gamma$ . Se esses elétrons e pósitrons de movimento rápido passarem perto de outros núcleos, a carga positiva dos prótons dos núcleos dos átomos os acelera. Uma partícula carregada quando desacelerada emitirá radiação eletromagnética (*Bremsstrahlung*) [Dunne, 2000].

As acelerações intensas podem produzir, então, mais raios  $\gamma$  que novamente serão capazes de produzir mais pares elétron-pósitron. Este ciclo de produção de pares e geração de raios gama segue, então, conforme a energia original dos raios  $\gamma$  e se manifesta, eventualmente, na forma de várias partículas, conforme se pode ver na Figura 2.10 [Dunne, 2000].

A geração da cascata termina quando os elétrons não possuem mais a capacidade de irradiar de forma eficiente e neste momento estes elétrons passam ao estado de repouso por meio de processos de ionização comuns. O nível de energia em que os elétrons passam do processo de perda de energia por irradiação para ionização corresponde à energia crítica, cujo valor é de 7,6 MeV [Dunne, 2000]. No interior de sólidos, a cascata eletromagnética se restringe a regiões onde a presença de átomos ao longo do caminho é maior. A presença de materiais de elevado peso atômico possibilita acelerações maiores de forma mais rápida que em materiais com peso atômico relativamente menor [Dunne, 2000].

Para a detecção da avalanche, os tubos Geiger-Müller são detectores bons e de baixo custo que podem ser empregados em circuitos detectores de coincidência. Os tubos, criados em 1928, possuem em seu interior certo tipo de gás e são submetidos a tensões elétricas elevadas. Quando uma partícula ou fóton de alta energia o atravessa, o gás é ionizado ocorrendo uma pequena descarga elétrica, gerando um pulso elétrico que, por fim, pode ser contado. Os tubos

Geiger-Müller registram todo tipo de radiação ionizante de forma indiscriminada [Le Boulicaut *et al*, 2018].

É necessário, no entanto, se ter em mente o tempo de resposta do tubo Geiger-Müller utilizado e a presença de ruídos que, se não tidos em conta, poderão gerar falsos positivos. Por outro lado, a largura do pulso do tubo Geiger-Müller não pode ser estreita a tal ponto que a eletrônica não consiga detectar a coincidência relativa [Hart, 2021].

Nesse sentido, mesmo sendo o emprego de circuitos integrados de baixo custo em circuitos de detecção por coincidência atrativo e de fácil implementação, não se pode dispensar, no entanto, o emprego de técnicas de processamento dos sinais nestes. Uma destas técnicas consiste no emprego de dispositivos do tipo *Schmitt Trigger*.

Em certas etapas destes circuitos, e em particular no caso do emprego de detecção com tubos Geiger-Müller, podem ocorrer problemas no que cabe à conversão de sinais de entrada lentos ou ruidosos de forma que ruídos na entrada de um circuito integrado podem cruzar o limite do potencial de detecção gerando oscilações ou sincronismos múltiplos [Cockrill, 2011].

Um circuito do tipo *Schmitt Trigger* irá converter bordas de sinal lentas ou ruidosas em repostas mais rápidas de forma a atuar corretamente na subida ou descida de sinais de entrada, não havendo, neste tipo de circuito, limitações de tempo para subida e descida de sinais como resposta. Em outras palavras, atuam com histerese (conservando seu estado de saída por um pouco mais de tempo no surgimento ou desaparecimento do sinal de entrada que gerou a mudança de estado) no tratamento do sinal, como pode ser melhor entendido na Figura 2.11, onde são apresentadas diferentes respostas a diferentes tipos de sinais de entrada [Cockrill, 2011].

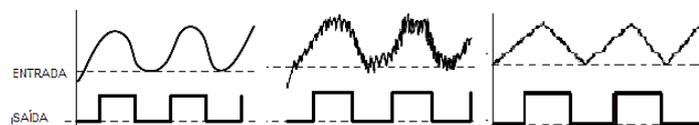


Figura 2.11: Exemplos de sinais de ENTRADA e SAÍDA para Schmitt Trigger [Cockrill, 2011].

Já em termos de geometria de montagem, espaçando-se adequadamente os tubos, pode-se conseguir uma certa compensação para estes problemas, mas o afastamento para além do necessário pode diminuir o ângulo sólido de detecção [Hart, 2021].

Se por um lado, no caso da detecção de múons, a blindagem dos detectores propicia a redução de falsas detecções por conta da radioatividade local terrestre e ambiental, por outro, a presença inevitável de decaimento radioativo natural mesmo no chumbo empregado na

blindagem de detectores e que contém isótopos naturais Pb-210 sujeitos a decaimento  $\beta$  emite, também, radiação que interfere nos resultados da detecção. Mais uma vez, os métodos de detecção de coincidência se constituem em uma forma confiável de discriminar entre a radiação local e as fontes cósmicas e mitigar estas detecções indesejáveis [Hart, 2021].

## 2.5. Análise Estatística

A estimativa da média  $\mu$  de uma população é um tipo de inferência que pode ser feita a partir dos dados de amostras. A média  $\mu$  compõe, juntamente com outras características, os parâmetros de uma população. Por outro lado, a média  $\bar{X}$  de uma amostra ao lado também de outras características, é chamada de estatística. Se a análise recai somente sobre as amostras temos o que se chama Estatística Descritiva e se abrange as populações, temos a chamada Estatística Inferencial. De forma geral, a ideia central dos estudos estatísticos é descobrir se alterações em variáveis independentes se relacionam a mudanças em variáveis dependentes. Ambos os tipos de variáveis podem ser compostos por dados relacionais [Schmuller, 2018].

Dentro da Estatística Inferencial, os estatísticos formulam hipóteses nulas  $H_0$  ou hipóteses alternativas  $H_1$  que podem ser aceitas ou rejeitadas. As hipóteses nulas correspondem às situações em que não há diferenças entre amostras, ao contrário das hipóteses alternativas. Neste tipo de Estatística, existem dois tipos de erros possíveis, o de Tipo I em que se rejeita  $H_0$  quando não se deveria rejeitar e o de Tipo II em que se dá o oposto. A supressão destes tipos de erro requer que se reúna às vezes mais dados. Em um teste de uma hipótese nula contra uma hipótese alternativa, cada hipótese corresponde a uma distribuição amostral diferente e um critério de decisão para aceitação ou rejeição é o chamado valor crítico [Schmuller, 2018].

Sendo  $X$  o valor de uma medida em uma amostra e  $N$ , o número total de medidas, define-se a média pela Equação 2.13 [Schmuller, 2018]:

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N}$$

Equação 2.13

Exemplos de outros tipos de média são a média interna (que pode ser empregada na eliminação de valores discrepantes antes de se calcular a média, ou seja, *outliers*), a média geométrica e a média harmônica. A média é capaz de resumir dados de forma fácil, mas é

afetada pela presença de números extremos e pode não representar corretamente um grupo. Nestes casos, se recorre à mediana que corresponde ao número que, ao se ordenar estes, se encontra “no meio”, acima do qual se encontra a metade dos valores e abaixo, outra metade igual. Por outro lado, a moda se constitui na medida mais representativa da tendência central [Schmuller, 2018].

A variância de uma amostra  $s^2$  é dada pela Equação 2.14 e indica o quão dispersos estão os valores de uma amostra [Schmuller, 2018]:

$$s^2 = \frac{\sum(X - \bar{X})^2}{N - 1}$$

Equação 2.14

A variância de uma amostra é um número muitas vezes alto e por este motivo se torna conveniente o uso do desvio-padrão. O desvio-padrão  $s$  de uma amostra é definido pela Equação 2.15 e indica os limites inferiores e superiores para a média [Schmuller, 2018]:

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

Equação 2.15

Na comparação de valores pode ser útil a definição de um valor padrão ou valor  $z$  que para uma amostra é apresentado na Equação 2.16 [Schmuller, 2018].

$$z = \frac{X - \bar{X}}{s}$$

Equação 2.16

A distribuição de valores de uma amostra em torno da média que a caracteriza, nem sempre se faz de forma uniforme, sendo comum se encontrar distorções em que podemos ter valores mais frequentes acima ou abaixo da média ou mesmo distribuídos de forma mais concentrada ou dispersa nos extremos do conjunto de valores. Por estes motivos, são introduzidos parâmetros como distorção e curtose.

A *distorção* ou simetria indica o grau de simetria da distribuição dos valores de uma amostra e é definida por meio da Equação 2.17. Valores positivos indicam inclinação para direita e valores negativos inclinação para a esquerda [Schmuller, 2018].

$$distorção = \frac{\sum(X - \bar{X})^3}{(N - 1)s^3}$$

Equação 2.17

A Figura 2.12 mostra o aspecto das distribuições em torno da média zero para diferentes valores de distorção (simetria).

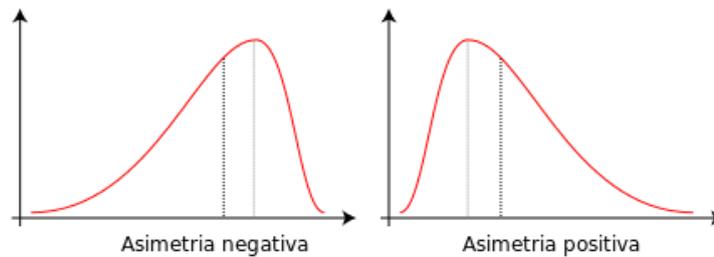


Figura 2.12: Aspectos de distribuições para assimetrias negativas e positivas [Wikimedia, 2022].

A *curtose* indica se os valores de uma amostra se distribuem em forma de pico (curtose positiva ou leptocúrtica) ou tendendo a formar um plano (curtose negativa ou platicúrtica) e pode ser determinada por meio da Equação 2.18 [Schmuller, 2018].

$$curtose = \frac{\sum(X - \bar{X})^4}{(N - 1)s^4} - 3$$

Equação 2.18

A Figura 2.13 mostra o aspecto das distribuições em torno da média zero para diferentes valores de curtose.

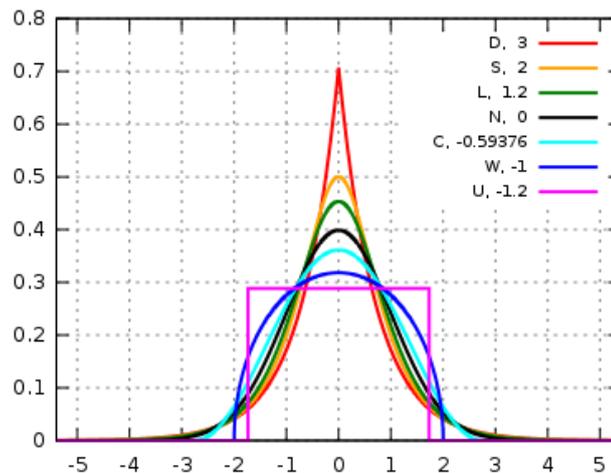


Figura 2.13: Aspecto de distribuições com diferentes valores de curtose [Wikimedia, 2022].

Os parâmetros apresentados até este ponto são capazes de descrever a distribuição dos valores de uma amostra e o conjunto formado pelas Equações 4.13, 4.14, 4.17 e 4.18 são chamados de momentos estatísticos. Mas, além destes, a distribuição de frequência, a partir da qual é possível construir histogramas e porcentagem cumulativa, também é de grande utilidade pois é a partir desta que se pode obter os gráficos de “sino” característicos das chamadas distribuições normais. Nos gráficos de distribuições normais as áreas abaixo das curvas correspondem numericamente à densidade de probabilidade. A média fica no meio da distribuição, mas no caso de uma distribuição normal padrão, o meio coincide com o zero da abscissa e a distribuição emprega os valores  $z$  na construção da curva o que é útil na comparação de curvas de amostras diferentes [Schmuller, 2018].

A partir de uma população é possível obter várias amostras, possuindo cada uma sua média particular. Esse conjunto de médias de amostras chama-se distribuição amostral da média  $\mu_{\bar{x}}$ . Em linhas gerais, uma distribuição amostral corresponde a todos os valores que são possíveis para uma estatística que depende do tamanho da amostra. O desvio padrão de uma distribuição amostral recebe o nome de erro padrão e, no caso particular de uma distribuição amostral da média, recebe o nome de erro padrão da média  $\sigma_{\bar{x}}$  [Schmuller, 2018].

Para contornar o problema da quantidade de amostras na determinação da distribuição amostral mesmo que a população considerada não se comporte como uma distribuição normal, usa-se o Teorema do Limite Central que diz que [Schmuller, 2018]:

- Para amostras grandes o suficiente (30 ou mais medidas), a distribuição amostral de uma média corresponde aproximadamente a uma distribuição normal;

- A média da distribuição amostral da média é idêntica à média da população, ou seja,  $\mu_{\bar{x}} = \mu$ , onde  $\mu$  é a média da população;
- Sendo  $\sigma$  o desvio padrão da população, o erro padrão da média é dado pela Equação 2.19.

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{N}$$

Equação 2.19

Caso não se saiba o valor do desvio padrão da população  $\sigma$ , pode-se substituir, então, pelo desvio padrão da amostra  $s$  e empregar a Equação 2.20 na determinação do erro padrão da média [Schmuller, 2018].

$$s_{\bar{x}} = s / \sqrt{N}$$

Equação 2.20

A partir de uma distribuição amostral da estatística e do erro padrão é possível, então, se estabelecer limites superiores e inferiores para o parâmetro de uma população dentro do que se define como intervalo de confiança e que comumente tem como base, no caso de estudos científicos, o valor de 95 % ou de parâmetro de erro  $\alpha=0,05$  para erro do Tipo I mas sendo aceitos também valores entre 0,01 a 0,10 [Hulley *et al*, 2015].

O valor de 95 % corresponde à área sob a curva normal e compreende os valores que se situem nesta região no eixo das abscissas, a partir da média, tanto à esquerda como à direita. No caso de testes de hipótese, o valor crítico escolhido é que determina o parâmetro de erro  $\alpha$  [Schmuller, 2018].

Uma forma para determinar os limites destes deslocamentos laterais em torno da média é empregar a distribuição normal padrão e encontrar o valor  $z$  em que se tem 47,5% dos lados direito e esquerdo a partir da média e, em seguida, multiplicar  $z$  por  $s_{\bar{x}}$ . Outra opção é consultar tabelas para obtenção deste valor. Para variações maiores ou se reduz o nível de confiança ou se aumenta o tamanho da amostra [Schmuller, 2018].

No caso de amostras pequenas, a distribuição amostral da média compõe um grupo chamado de distribuições  $t$  e dentro deste grupo as distribuições amostrais de média, o parâmetro que as torna diferentes umas das outras é o que se chama de graus de liberdade que numericamente corresponde ao denominador  $N-1$  presente na Equação 2.14. Quanto maior o

valor do grau de liberdade mais a distribuição  $t$  se aproxima da distribuição normal. Ou seja, no caso de amostras pequenas, um nível de confiança de 95 % irá requerer grau de liberdade adequado [Schmuller, 2018].

A amostra de qualquer população normalmente distribuída sempre será normal qualquer que seja o tamanho da amostra. Isso permite definir para este caso o valor  $z$ , agora denominado como estatística de teste, conforme a Equação 2.21 [Schmuller, 2018].

$$z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{N}}$$

Equação 2.21

Um valor de  $z$  calculado maior que o valor crítico  $z$  tabelado para determinado parâmetro de erro  $\alpha$ , indicará a rejeição da hipótese nula  $H_0$ . Este tipo de teste é chamado de teste de uma cauda e é capaz de indicar se uma média é maior que a outra. Um outro tipo de teste é o bicaudal que apenas é capaz de distinguir a diferença entre ambas. Um dos problemas envolvidos na escolha do tipo de teste a fazer para um mesmo conjunto de dados, se uni ou bicaudal, é que o teste de uma cauda pode rejeitar  $H_0$  ao passo que o de duas caudas pode não rejeitar. A partir do valor  $z$  também é possível, por meio de tabelas, se encontrar o chamado  $p$ -valor, que indica também a probabilidade de se rejeitar a hipótese nula e que tende a valores próximos a zero no sentido de rejeição de  $H_0$ . De qualquer forma, o teste de uma cauda requer certo conhecimento do que se espera em termos do “sentido” de diferença entre as duas médias [Schmuller, 2018].

No caso de populações das quais se desconhecem os parâmetros e se emprega amostras de tamanho reduzido, deve-se utilizar os dados da amostra para se estimar o desvio padrão da população e adotar a distribuição amostral da média como sendo um dos elementos do grupo da distribuição  $t$  e este se torna estatística de teste. De forma análoga à Equação 2.21 pode-se definir, neste caso, a Equação 2.22 para a estatística de Teste T, também chamado de  $t$ -crítico [Schmuller, 2018].

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{s / \sqrt{N}}$$

Equação 2.22

De forma similar ao teste de hipótese de uma amostra como apresentado, também é possível se realizar o teste de hipótese para o caso de comparação entre duas amostras tanto unicaudal ( $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$  e  $H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$  ou  $H_1: \mu_1 - \mu_2 < 0$ ) como bicaudal ( $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$  e  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$ ). A execução do teste é precedida da escolha do valor de  $\alpha$  sendo que posteriormente deve ser calculada a média e o desvio padrão para cada amostra [Schmuller, 2018].

Para a realização deste tipo de teste faz-se necessário introduzir o conceito de distribuição amostral da diferença entre médias. Este tipo de distribuição corresponde à distribuição de todos os valores possíveis para as diferenças entre os pares de médias de amostra, onde o tamanho das amostras é constante para cada par, onde dentro de cada par, cada amostra é tomada de uma população diferente [Schmuller, 2018].

O Teorema do Limite Central pode se aplicar também ao teste de hipótese com duas amostras garantindo que se as populações são distribuídas normalmente, a distribuição amostral é também uma distribuição normal mesmo que as amostras sejam pequenas. Sejam  $\mu_1$  e  $\sigma_1$  parâmetros uma população de  $N_1$  indivíduos e  $\mu_2$  e  $\sigma_2$  parâmetros de uma outra população com  $N_2$  indivíduos, a média da distribuição amostral pode ser definida por meio da Equação 2.23 [Schmuller, 2018].

$$\mu_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} = \mu_1 - \mu_2$$

Equação 2.23

Pode-se, então, definir o desvio padrão da distribuição amostral ou o erro padrão da diferença entre médias por meio da Equação 2.24 [Schmuller, 2018].

$$\sigma_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}}$$

Equação 2.24

Empregando-se valores  $z$  como estatística de teste, pode-se definir a Equação 2.25 que converte a diferença entre as médias das amostras em valor padrão. Este valor pode, então, ser comparado com a distribuição normal padrão, onde  $\mu=0$  e  $\sigma=1$  e, se o valor se encontrar dentro da zona de rejeição delimitada por  $\alpha$ , a  $H_0$  deve ser rejeitada. Esta equação pode ser empregada caso sejam conhecidos os valores de  $\sigma_1^2$  e  $\sigma_2^2$  [Schmuller, 2018].

$$z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sigma_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}}$$

Equação 2.25

As Equações 2.23, 2.24 e 2.25 compõem um conjunto de equações que formam o chamado Teste Z que pode ser empregado apenas quando se conhecem as variações da população. Fora desta situação, é necessário se recorrer, novamente, à distribuição  $t$ . As variações de amostras de uma população, cuja variância seja desconhecida, podem ser usadas para se estimar este parâmetro através de combinação. Para o caso de se supor variações iguais, sendo  $s_p^2$  a estimativa combinada, pode-se estabelecer a Equação 2.26 [Schmuller, 2018]:

$$s_p^2 = \frac{(N_1 - 1)s_1^2 + (N_2 - 1)s_2^2}{(N_1 - 1) + (N_2 - 1)}$$

Equação 2.26

Lembrando que  $(N_1 - 1) + (N_2 - 1)$  são os graus de liberdade. A partir da Equação 2.27 é possível, então, calcular  $t$  [Schmuller, 2018].

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}}$$

Equação 2.27

Para o caso de variações desiguais, faz-se necessário reduzir os graus de liberdade com base no desvio padrão e no tamanho das amostras. Neste caso, o assim chamado Teste T, deve ser calculado por meio da Equação 2.28 [Schmuller, 2018].

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Equação 2.28

Finalmente, a partir da Equação 2.28, é possível escrever a Equação 2.29 para determinação de *t-crítico* para o caso de comparação de estatísticas entre duas amostras:

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Equação 2.29

Além de ser aplicado para comparação de médias, o teste de hipótese também pode ser aplicado para testar hipóteses de variações. Neste caso, o resultado do teste será obtido por meio do quociente entre a maior variância e a menor variância. Esta razão se chama de razão F e o teste se chama Teste F em homenagem ao matemático Ronald Fisher. As distribuições deste teste recebem a mesma denominação. Diferentemente do Teste T, cada membro de um grupo se associa a dois valores de graus de liberdade. O Teste F assume importância quando usado em conjunto com o Teste T pois, quando usado antes de se executar o segundo, permite supor se estamos trabalhando com variações iguais ou desiguais nas amostras [Schmuller, 2018].

Em raras situações valores elevados de  $\alpha$  são considerados bons. Se aceitar a hipótese nula  $H_0$  é o que se deseja, os valores de  $\alpha$  devem ser maiores de forma que diferenças pequenas não conduzam à rejeição. O mais desejável, entretanto, é empregar o Teste T para variações iguais pois nesta situação se terá mais graus de liberdade em comparação com o Teste T para variações desiguais. Determinar valor alto para  $\alpha$  (menor ou igual a 0,20) para o Teste F permite supor variações iguais [Schmuller, 2018].

## 2.6. Supressão de *outliers* por Interquartil

O termo inglês *outliers* é usado para designar um ou mais valores que se diferenciam sobremaneira em relação a outros valores de uma amostra. Estes pontos podem ser causados por problemas na aquisição dos dados, variações inesperadas e isoladas de um processo ou por outros motivos que requerem investigação das causas e podem interferir nos resultados das análises estatísticas. Um dos métodos mais empregados na identificação de *outliers* é o método interquartil ou de amplitude interquartil. Este método analítico possibilita melhor identificação de *outliers* do que a inspeção visual por meio de gráficos [Norris, 2014].

Os quartis dividem uma distribuição de valores em 4 partes iguais e o método interquartil empregado no presente trabalho compreende as seguintes etapas [Norris, 2014]:

- Cálculo da média da distribuição de valores de uma amostra;
- Determinação do 1º quartil que corresponde ao valor que delimita os 25% valores menores da amostra;
- Determinação do 3º quartil que corresponde ao valor que delimita os 25% valores maiores da amostra;
- Cálculo da diferença (subtração) dos valores encontrados entre o 3º e 1º quartis;
- Determinação do intervalo de dados de valores a serem considerados para análise estatística de cada amostra, subtraindo-se da média da amostra o valor da diferença multiplicado por 1,5 (limite de corte inferior) e somando-se à média da amostra o valor da diferença multiplicado por 1,5 (limite de corte superior).

## 2.7. Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnov

Antes de se aplicar a análise estatística apresentada na Seção 2.5 faz-se necessário verificar a aderência à condição de normalidade na distribuição dos dados de uma amostra. O teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) pode ser empregado com essa finalidade e se trata de um teste simples que tem como objetivos verificar qual o grau de diferença entre duas amostras e se uma distribuição em particular é decorrente de uma outra distribuição hipotética [Crawley, 2005].

Como apresentado na Figura 2.14, o teste de K-S aplicado à verificação de normalidade visa a comparar a função cumulativa teórica normal com a função cumulativa empírica ou experimental, admitida esta última como assintoticamente normalmente distribuída, a partir do cálculo do maior desvio absoluto entre as funções [Lewis, 2004].

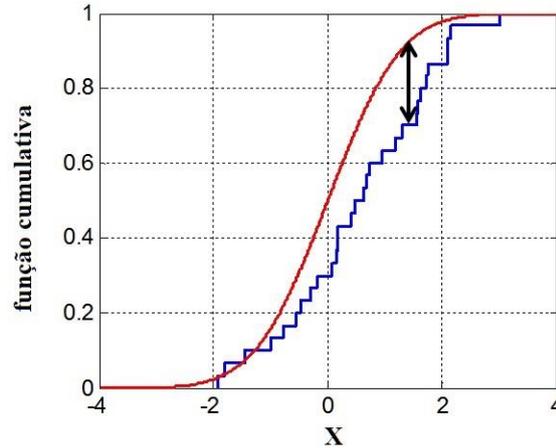


Figura 2.14: Exemplo de comparação feita pelo Teste K-S: em vermelho, a curva teórica normal e em azul, a curva experimental ou empírica [wikimedia.org, 2022].

Sendo  $N$  o número de dados a serem analisados,  $Y_i$  os valores das curvas ordenadas em ordem crescente e  $F$  a distribuição cumulativa teórica da distribuição da amostra em teste, é possível calcular o valor máximo da distribuição normal  $D$ , que será tão maior quanto os dados se afastem da distribuição teórica de referência, por meio da Equação 2.30 [deepai.org, 2022].

$$D = \frac{\max_{1 \leq i \leq N} (F(Y_i) - \frac{i-1}{N}, \frac{i}{N} - F(Y_i))}{1}$$

Equação 2.30

## 2.8. Poder estatístico ou amostral

Como já pontuado na Seção 2.5, erros do Tipo I (rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira) ou Tipo II (não rejeitar a hipótese nula quando ela for falsa) podem ser cometidos ao se analisar estatisticamente os resultados de um experimento. Ao se realizar um estudo, deve-se estabelecer a probabilidade máxima admitida para estes tipos de erro. Desta forma, como já apresentado, a probabilidade máxima designada pela letra  $\alpha$  é também conhecida também como nível de significância estatística [Hulley *et al*, 2015].

Por outro lado, a probabilidade de um erro Tipo II é designada pela letra grega  $\beta$  e o valor  $(1 - \beta)$  é denominado poder estatístico. O poder estatístico representa a probabilidade de rejeição correta da hipótese nula ( $H_0$ ) na amostra quando o efeito real em uma população for igual ou maior que a magnitude de efeito estabelecida [Hulley *et al*, 2015].

O ideal seria que  $\alpha$  e  $\beta$  fossem próximos de zero de forma a minimizar a possibilidade de ocorrência de resultados falso-positivos e falso-negativos. Para a redução dos valores destes parâmetros algumas medidas podem ser adotadas, tais como: aumentar o tamanho de uma amostra, usar variáveis contínuas e realizar medidas mais precisas e/ou pareadas, por exemplo. De forma arbitrária, grande parte dos estudos estabelecem para  $\beta$  o valor de 0,20 (sendo aceitáveis valores entre 0,05 e 0,20) correspondente a um valor de poder de 0,80. Cabe ao realizador do estudo escolher entre evitar erros do Tipo I ou do Tipo II [Hulley *et al.*, 2015].

## 2.9. Petróleo, parafinas e asfaltenos

O petróleo bruto é uma mistura complexa de compostos orgânicos e inorgânicos com predominância de hidrocarbonetos que pode ser extraído da Terra na forma líquida. Se origina a partir da decomposição de matéria orgânica depositada no fundo dos mares e lagos sob ação do calor, da pressão, da pouca oxigenação e da ação de bactérias [Neto *et al.*, 2014].

A participação em peso dos elementos químicos na composição dos hidrocarbonetos do petróleo leva em conta o Carbono (83,9 % a 86,8 %), o Hidrogênio (11,4 % a 14,0 %), o Enxofre (0,06 % a 9,00 %), Nitrogênio (0,11 % a 1,70 %), Oxigênio (0,50 %) e Metais como Ferro, Níquel, Vanádio entre outros (0,30 %) [Neto *et al.*, 2014].

Desta forma, estes elementos químicos quando combinados irão formar uma variada gama de moléculas simples e complexas que formam o petróleo, dentre as quais temos as parafinas e os asfaltos. As parafinas, muito conhecidas pelo emprego na fabricação de velas e na indústria alimentícia compreendem um grupo de compostos saturados de cadeia aberta (alifáticos) dentro, como já dito, do conjunto de hidrocarbonetos que formam o petróleo [Neto *et al.*, 2014]. A Figura 2.15 mostra a fórmula estrutural de cadeia aberta simples composta por ligações de átomos de carbono de alguns tipos de parafinas [Ducke, 2015].

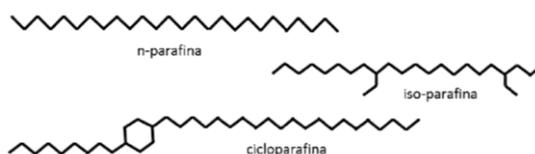


Figura 2.15: Estrutura de alguns tipos de parafinas [Ducke, 2015].

Apesar de seu emprego, a parafina pode se tornar um problema sério no processamento do petróleo. Por exemplo, na Figura 2.16 é possível ver a foto de uma obstrução ocasionada pela deposição de parafinas em um duto [Ducke, 2015].



Figura 2.16: Obstrução parcial de duto ocasionada pela deposição de parafinas [Ducke, 2015].

Por outro lado, são os óleos asfálticos, onde se situam os asfaltos empregados em pavimentação, que contém grande quantidade de compostos aromáticos polinucleados onde se encontra uma alta concentração de asfaltenos [Neto *et al.*, 2014]. A Figura 2.17 apresenta um modelo bidimensional de uma molécula de asfalteno [Murgich *et al.*, 1995].

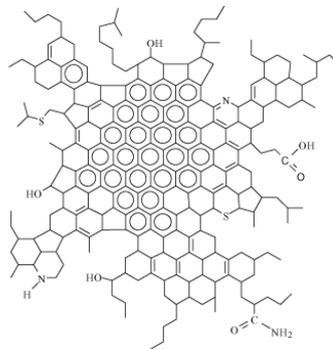


Figura 2.17: Modelo bidimensional de uma molécula de asfalteno [Murgich *et al.*, 1995].

O transporte do óleo bruto dos campos de produção até aos terminais marítimos e refinarias pode ser feito por meio dos chamados oleodutos, os quais também podem ser empregados para o transporte dos produtos finais das refinarias para o mercado consumidor [Neto *et al.*, 2014].

De forma análoga ao que corre com a parafina, na Figura 2.18 é possível ver foto de obstrução ocasionada pela deposição de asfaltenos em um duto [tecpetro.com.br, 2021].



Figura 2.18: Obstruções parciais por asfaltenos em dutos [tecpetro.com.br, 2021].

## Capítulo 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

A partir de adaptação de um projeto eletrônico disponibilizado na Internet pelo astrônomo amador australiano Robert Hart no site *www.cosmicray.com.au* e com o objetivo de avaliar, em escala de bancada, a viabilidade da medição dos múons na avaliação de obstruções em dutos, foi construída uma unidade de pequenas dimensões composta por dois detectores Geiger-Müller posicionados na horizontal (lado a lado) no interior de blindagem de chumbo e conectados a circuito de coincidência para a realização de medidas de detecção de múons, em área parcialmente coberta, na presença de parafina e asfalto.

#### 3.1. Esquema eletrônico do circuito

A Figura 3.1 apresenta o esquema eletrônico do circuito utilizado no projeto adaptado [Pontes, 2022]. O circuito é composto, basicamente, por duas seções idênticas formadas cada uma por uma fonte de alta-tensão (DC-DC STEP-UP ou elevadora de tensão de 500V), um tubo Geiger-Müller LND-713, 2 circuitos integrados que enviam um sinal de coincidência para uma placa NodeMCU e outros componentes passivos. Na adaptação realizada nas duas seções do circuito, foi introduzido o trecho da fonte de alta tensão, entre o trimpot multivoltas (helitrim) de 10 k $\Omega$  (primeiro à esquerda) e o diodo 1N4007 além do trimpot de 10 k $\Omega$  na porta D1 do NodeMCU.

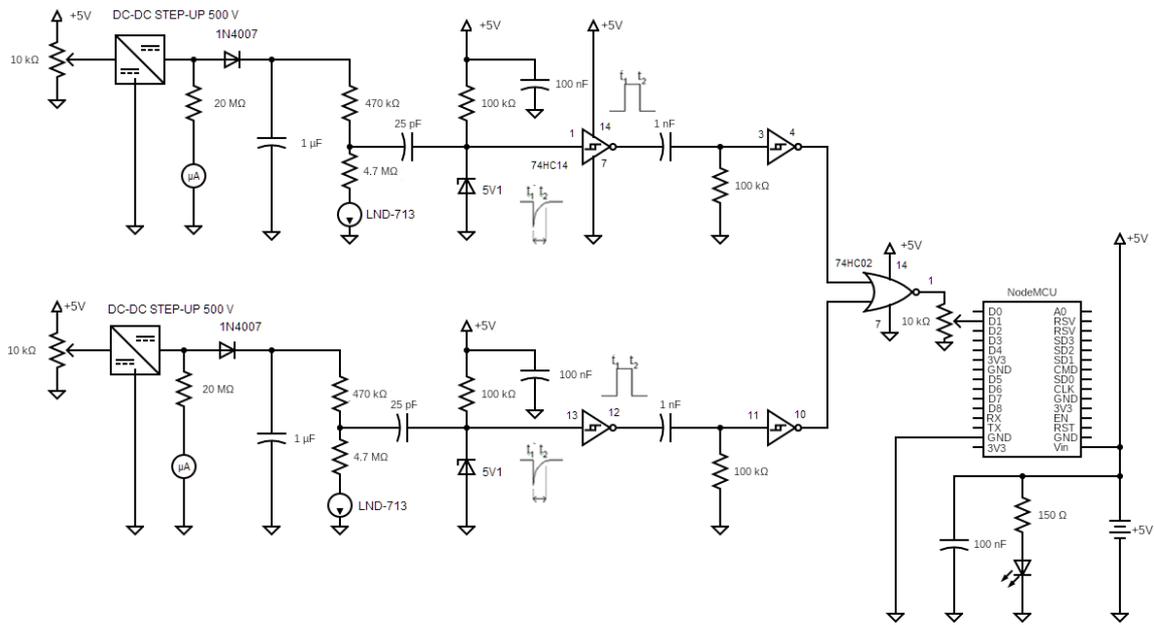


Figura 3.1: Esquema eletrônico do circuito empregado com a indicação de sinais presentes no circuito integrado 74HC14 [Pontes, 2022].

A tensão de alimentação do circuito é realizada por meio de bateria do tipo “Power Bank” com tensão de 5 V e capacidade de carga de 10000 mAh, o que fornece autonomia ao circuito de funcionamento superior a 72 h de forma contínua com corrente estimada em 140 mA. Esta autonomia pode ser estendida para até 5 dias se reduzida frequência de processamento do módulo NodeMCU de 160 MHz para 80 MHz. A tensão de 5 V é aplicada, por meio de trimpot multivoltas de 10 kΩ, que permite ajuste fino de tensão, à entrada das fontes do tipo DC-DC STEP-UP e que, posteriormente ajustadas pelo trimpot na própria placa da fonte, fornecem 500 V DC ao circuito. Para a medição e regulação da tensão para estes tipos de fonte, foram adicionados resistores de 20 MΩ (um em cada seção do circuito) com tolerância de  $\pm 1\%$  e que, em série com multímetro digital da marca FOXLUX na função de microamperímetro DC, possibilitaram o ajuste indireto das tensões das fontes, por meio da leitura de 25  $\mu\text{A}$  de corrente através do resistor de 20 MΩ. Após o ajuste, o microamperímetro foi retirado, sendo mantida a ligação destes resistores de 20 MΩ ao circuito, na saída das fontes.

A tensão de 500 V é aplicada por meio de diodos comuns de tensão de isolamento de 1000 V e que tem por função impedir que flua corrente no sentido oposto, aos tubos Geiger-Müller em série com resistores de 470 kΩ e 4,7 MΩ (conforme configuração recomendada pelo fabricante dos tubos) e aos capacitores de poliéster de 1  $\mu\text{F}$  e tensão de isolamento de 630 V. O capacitor de 25 pF, tem como função isolar a alta tensão do restante do circuito, conduz o pico negativo da queda de tensão ocasionada por detecção dos tubos Geiger-Müller, cuja tensão é

limitada pelos diodos Zener de 5,1 V juntamente com o resistor de 100 k $\Omega$ , aos pinos 1 e 13 do circuito integrado 74HC14. O resistor de 100 k $\Omega$  polariza a entrada do circuito integrado 74HC14 com entrada “alta” e saída “baixa”. Ao receber o pulso negativo do tubo Geiger-Müller, a situação se inverte, passando a entrada para o estado “baixo” e a saída para o estado “alto”.

A cada vez que os tubos Geiger-Müller sofram perturbação simultânea por conta de radiação incidente, o circuito integrado 74HC14 na configuração *Schmitt Trigger* recebe o sinal oriundo dos tubos Geiger-Müller e gera um pulso digital que é, então, enviado ao circuito integrado 74HC02 nos pinos 2 e 3. Este, detectando sinal simultâneo em seus pinos, envia pulso digital TTL de 5 V para a porta D1 do módulo NodeMCU, via trimpot multivoltas de 10 k $\Omega$ . Estes sinais foram verificados com auxílio de um osciloscópio portátil DSO150 e os registros das medições são apresentadas na Figura 3.2. O trimpot de 10 k $\Omega$  na porta D1 do módulo NodeMCU tem por função reduzir a tensão de saída para 3,3 V que é a tensão máxima e de trabalho desta porta digital no NodeMCU. O menor tempo mínimo registrado pelo NodeMCU para detecção de eventos simultâneos consecutivos nos ensaios foi de 6 ms.

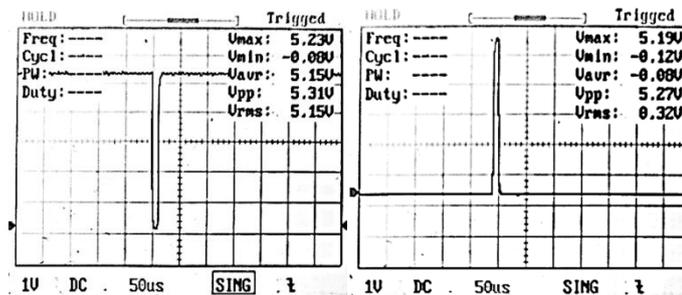


Figura 3.2: Sinais registrados por osciloscópio nas escalas de tempo de 50  $\mu$ s e de tensão de 1 V DC: na imagem à esquerda no pino 1 e na imagem à direita no pino 14 do circuito integrado 74HC14. Sinais similares também registrados respectivamente nos pinos 13 e 12 do mesmo circuito integrado [Pontes, 2022].

Quanto mais longo for o pulso de cada um dos tubos Geiger-Müller, maior será a probabilidade de falsas detecções de coincidência por conta da radiação terrestre local. A ideia do projeto de Robert Hart para mitigar este problema foi encurtar a largura de pulso usando um circuito de curto-circuito de pulso, formado pelo capacitor de 1 nF e um resistor de 100 k $\Omega$  na entrada do circuito integrado 74HC14. A saída fica no estado “baixo” para cada detecção nos tubos Geiger-Müller, quando isso ocorre é gerado um pulso na saída da porta NOR. A detecção de coincidência entre os dois tubos Geiger-Müller é obtida usando uma porta NOR no circuito integrado 74HC02, conforme apresentado na Figura 3.3 [embarcados.com.br].

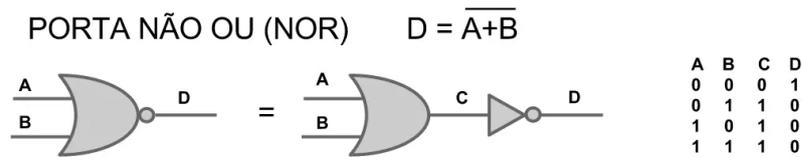


Figura 3.3: Entradas A (pino 1) e B (pino 2) para porta NOR do CI 74HC02 [embarcaados.com.br].

A função final do módulo NodeMCU é efetuar o registro, contagem, descartar registros em duplicidade de um mesmo sinal de origem e submeter, via Internet, os dados para registro em servidor Web na Internet a cada uma hora utilizando, para isso, uma rede Wi-Fi local. A alimentação de baixa tensão de 5 V de todo circuito é feita por meio do pino  $V_{in}$  do NodeMCU que recebe a alimentação por meio de cabo USB que conecta o módulo à bateria “Power Bank”. A frequência do processador do NodeMCU é ajustada para o máximo de 160 MHz, podendo ser alterada por meio do código de programação e no momento da compilação do código binário para 80 MHz.

### 3.2. Fontes de alta-tensão, Tubos Geiger-Müller, bateria e NodeMCU

A fonte de alta tensão testada e usada no projeto é a apresentada na Figura 3.4 [www.alexnl.com, 2021]. Trata-se de um tipo de fonte comercializada pela Internet, montada em tecnologia de montagem em superfície (SMD). Sua dimensão é de 25 mm por 48 mm sendo capaz de fornecer correntes de saída entre 2 e 20 mA com tensão ajustável entre 300 V e 1200 V por meio de trimpot localizado na placa da fonte. Foram empregadas duas fontes idênticas, uma para cada ramo do circuito.



Figura 3.4: Detalhes da fonte de alta-tensão ajustável [www.alexnl.com, 2021].

O tubo Geiger-Müller utilizado no projeto é o modelo 713 da LND, INC. que é mostrado na Figura 3.5 [www.lndinc.com, 2021].



Figura 3.5: Tubo Geiger-Müller modelo LND-713 [www.lndinc.com, 2021].

Este tubo pode operar com tensões entre 450 V e 600 V, mas com tensão de trabalho recomendada pelo fabricante de 500 V para temperatura ambiente entre -10 °C e +75 °C. O tempo morto mínimo deste tubo é de 45  $\mu$ s podendo operar com resistores em série no anodo entre 2,2 M $\Omega$  a 4,7 M $\Omega$  (este último valor corresponde ao valor de resistor empregado no circuito construído). A saída do tubo Geiger-Müller é do tipo pulso dente de serra negativo e aparece a cada vez que uma partícula ionizante atravessa o tubo causando uma avalanche de elétrons em seu interior.

O módulo NodeMCU, apresentado na Figura 3.6 [wikimedia.org, 2022], surgiu no mercado após o advento das placas Arduino em projetos de automação e registro de dados de baixo custo. As placas NodeMCU, voltadas para o segmento Internet das Coisas (IoT), são de código aberto, incorporam a capacidade embarcada de conexão Wi-Fi, de fácil programação pela IDE Arduino, possuindo dimensões reduzidas e capacidade de processamento maior que as placas Arduino UNO (16 MHz) ou MEGA (16 MHz). O módulo NodeMCU possui apenas uma porta digital de entrada para registro de sinais (a porta D1) que comporta sinais de amplitude máxima de 3,3 V. Podem ser alimentadas via porta USB com tensões de 5V e fornecer aos circuitos auxiliares esta tensão por meio do pino  $V_{in}$  (que serve tanto para alimentação como saída de tensão para outros circuitos) com corrente máxima de 500 mA. Dispõem, também, de recursos de economia de energia que diminuem o consumo que seria decorrente do emprego de conexão Wi-Fi.



Figura 3.6: Placa NodeMCU [wikimedia.org, 2021].

### 3.3. Montagem

A Figura 3.7 apresenta a unidade montada para a realização dos ensaios e obtenção dos dados coletados [Pontes, 2022]. Algumas características da montagem são:

- Os componentes foram montados em placa de circuito universal;
- Seção de alta tensão segregada da placa de circuito universal, ou seja, da seção de baixa tensão;
- Foram instalados *trimpots* de controle das tensões de entrada das fontes de alta tensão para ajuste fino caso necessário;
- Os circuitos integrados foram montados em soquetes de forma a permitir a troca em caso de avarias;
- Os tubos Geiger-Müller foram colocados na posição horizontal, segregados da placa de circuito universal e inseridos em blindagem de chumbo, envoltos em teflon branco, de forma a proteger a superfície dos mesmos;
- Confeccionado “berço” em silicone azul para posicionamento da blindagem e dos tubos Geiger-Müller.

A utilização da configuração dos tubos Geiger-Müller de “empilhados” (na vertical) para “lado-a-lado” na horizontal, visa a maximizar a detecção da cascata eletromagnética, uma vez que o objetivo do trabalho não seria a mensuração da taxa de múons como objetivo primário, mas sim a influência da presença dos corpos de prova no trajeto da radiação proveniente da cascata eletromagnética, como já assinalado.

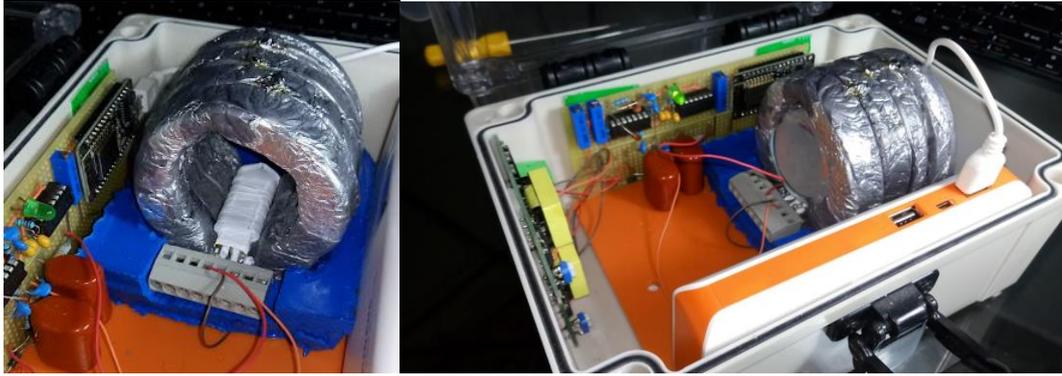


Figura 3.7: Tubos GM na horizontal e instalados em "berço" de silicone no interior dos anéis de chumbo [Pontes, 2022].

A Figura 3.8 apresenta uma visão posterior, com amostra em frasco de penicilina (designação comercial) contendo parafina inserida no interior, da blindagem de chumbo [Pontes, 2022]. A confecção desta blindagem é detalhada a seguir.



Figura 3.8: Visão da parte posterior dos anéis de chumbo [Pontes, 2022].

#### 3.4. Confecção de moldes, blindagem de chumbo e corpos de prova

A confecção da blindagem de chumbo compreendeu as seguintes etapas:

- Confecção de molde em silicone líquido (negativo) para criar a forma de gesso;
- Confecção da forma de gesso;
- Forração em papel alumínio do molde de gesso para facilitar a retirada da peça fundida;
- Derretimento de chumbo, aplicação em molde, resfriamento e retirada;
- Junção dos anéis de chumbo com uso de solda de estanho.

A Figura 3.9 mostra a etapa inicial da confecção do molde em silicone líquido [Pontes, 2022]. O silicone azul líquido utilizado foi misturado, na proporção adequada, a catalisador fornecido pelo fabricante. A mistura, então, foi vertida no interior de uma contenção construída com placas de papelão coladas com emprego de cola de cianoacrilato. Dentro da contenção, foram posicionados o frasco de penicilina e canudos de papel no diâmetro aproximado dos tubos Geiger-Müller. Após o tempo de cura recomendado de 24 h, o frasco e os canudos foram retirados para que se despejasse a mistura de gesso e água, para a confecção da forma de gesso como mostrada adiante.



Figura 3.9: Preparação de negativo em silicone líquido: à esquerda com frasco e canudos de papel inseridos e, à direita, teste de posicionamento com os tubos Geiger-Müller inseridos [Pontes, 2022].

A Figura 3.10 apresenta o molde em gesso, já pronto, com a parte central em gesso fixada [Pontes, 2022]. O gesso utilizado foi o gesso comum industrial tendo sido consumidos aproximadamente 500 g de gesso adicionados a 200 ml de água. Toda a peça foi confeccionada a partir de moldes de silicone com auxílio de recipientes de plástico descartáveis reaproveitados. Antes de se passar à etapa seguinte de fundição do chumbo, aguardou-se 24 h para se ter a cura completa do gesso. A escolha pelo gesso como material para acondicionar o chumbo se deu pelo fato do alto ponto de fusão (1450 °C) e pelo emprego popularizado na confecção de artefatos de pesca que utilizam o metal.



Figura 3.10: Molde em gesso criado para deposição do chumbo derretido com régua graduada posicionada para permitir a percepção das dimensões da peça confeccionada [Pontes, 2022].

A Figura 3.11 mostra o chumbo derretido já depositado sobre folha de papel alumínio (ponto de fusão de  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) usada para forrar a forma de gesso [Pontes, 2022]. O derretimento do chumbo foi realizado em área ventilada, com emprego de equipamento de proteção individual (luva térmica combinada com luva de vaqueta e máscara para vapores metálicos) e uso de gás. Até a mínima temperatura necessária para fundir o chumbo (ponto de fusão teórico de  $327,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), este não entra em ebulição (ponto teórico de ebulição do chumbo de  $1749\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), não havendo desprendimento de vapores tóxicos. O acompanhamento da temperatura foi feito com emprego de termômetro laser digital automotivo medindo-se a temperatura de parede de panela de teflon comum onde as barras de chumbo foram colocadas a derreter. O principal risco envolvido nesta etapa é de queimaduras graves e lesões severas à pele e outros órgãos em caso de contato acidental com o metal aquecido. O chumbo utilizado, segundo informação do fornecedor (Tinsolder Comércio e Soluções em Eletrônica Ltda), possuiria grau de pureza de 99%.



Figura 3.11: Molde contendo chumbo derretido sobre folha de papel alumínio no molde de gesso [Pontes, 2022].

Como se nota na Figura 3.12 [Pontes, 2022] a opção pela confecção de anéis e não pela fundição de uma peça inteira de chumbo se fez necessária por questões de manuseio e também pelo fato de a confecção de peça inteiriça não ter sido bem-sucedida com os recursos disponíveis à época. O diâmetro interno das peças mede aproximadamente 45 mm e paredes com espessura média de 1,2 cm.



Figura 3.12: Anéis de chumbo confeccionados [Pontes, 2022].

As medidas aproximadas dos anéis de chumbo são apresentadas na Figura 3.13.

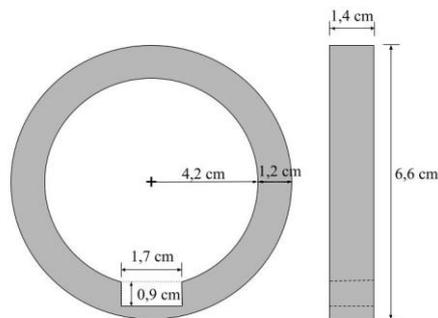


Figura 3.13: Medidas aproximadas dos anéis de chumbo: à esquerda vista frontal e à direita vista lateral [Pontes, 2022].

A Figura 3.14 exibe os anéis já agrupados com um frasco de penicilina utilizado como corpo de prova no interior do conjunto e já unidos por meio de solda de estanho [Pontes, 2022].



Figura 3.14: Montagem final dos anéis soldados com estanho: as fotos mostram, sob diferentes ângulos, o frasco de penicilina inserido no interior da blindagem de chumbo [Pontes, 2022].

Para atestar a presença de asfaltenos na amostra de asfalto empregada (betume pixe asfalto em pedra do fornecedor Vedacit), foi realizado teste de presença de asfaltenos, com emprego de N-Hexano (fornecedor Orion Produtos Científicos) por meio de decantação destes, conforme mostrado na Figura 3.15 [Pontes, 2022].



Figura 3.15: Amostra de asfalto com formação de depósito, no fundo de frasco de amostragem, de asfaltenos após diluição e decantação com N-Hexano [Pontes, 2022].

Como se pode visualizar pelas Figuras 3.16 e 3.17 [Pontes, 2022], duas categorias de corpos de prova foram produzidas. A primeira fez uso de frascos de penicilina de 50 ml, cujo formato serviu de base para a confecção dos anéis de chumbo utilizados na blindagem. Nesta categoria, foram utilizados quatro tipos de corpos de prova nos ensaios: um contendo parafina (inserida no frasco a partir de derretimento de vela comum adquirida no comercio nacional), outro contendo asfaltenos, outro contendo água e um frasco contendo ar, ou seja, sem produtos em seu interior. Outra categoria usou luvas de aço galvanizado de 1” contendo ar, parafina e asfalto.



Figura 3.16: Frascos de amostra de penicilina contendo parafina (à esquerda) e asfalto (à direita) [Pontes, 2022].



Figura 3.17: Luva de aço galvanizado de 1” contendo amostra de parafina (à direita) e asfalto (à esquerda) no interior [Pontes, 2022].

### 3.5. Programação cliente e servidor para data logger

Os dados adquiridos e processados pelo módulo NodeMCU foram enviados via Wi-Fi para servidor privado VPS por meio de uma arquitetura do tipo cliente/servidor, estando acessíveis publicamente na Internet, de onde podem ser consultados e recuperados. A Figura 3.18 [Pontes, 2022] apresenta o algoritmo do “lado” cliente e o código completo (*Sketch*) pode ser consultado no Apêndice I deste trabalho.

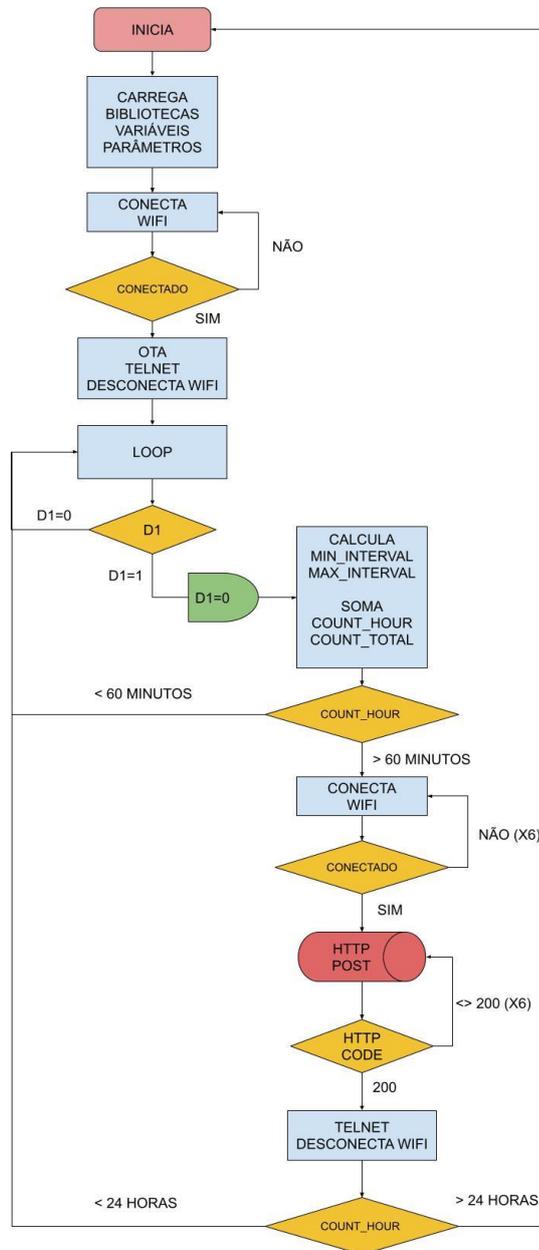


Figura 3.18: Algoritmo de programação do módulo NodeMCU [Pontes, 2022].

Os dados enviados pela placa NodeMCU foram submetidos, então, via Internet por meio do protocolo HTTP, tendo sido processados por script PHP em servidor Linux/Ubuntu “rodando” servidor Apache e banco de dados MariaDB. O mesmo *script* processa e exibe os resultados na Internet e pode ser acessado pelo link que aparece no código PHP do “lado” servidor e que é apresentado no Apêndice II deste trabalho. Os dados do link foram importados diretamente do servidor, via Internet, para análise estatística no Microsoft Excel licenciado, por meio da ferramenta “Conexões” do próprio aplicativo.

### 3.6. Local e programação dos ensaios

Como já abordado na Seção 1.3, os múons são utilizados no estudo de estruturas de concreto por conta do poder de absorção destas estruturas. De forma a se conseguir, então, o máximo de incidência de múons, o conjunto montado foi instalado no terraço de um prédio, em área coberta apenas por telhas de amianto, a uma altura equivalente a 10 andares como apresentado e indicado pela seta na cor vermelha na foto da Figura 3.19 [Pontes, 2022].



Figura 3.19: Local de instalação da unidade de testes na cidade do Rio de Janeiro [Pontes, 2022].

As informações de Latitude e Longitude bem como de nivelamento da unidade podem ser vistas em ambas as Figuras 3.20 e 3.21 que apresentam visões de ângulos diferentes do conjunto já montado e posicionado [Pontes, 2022]. Como pode ser observado, a unidade montada foi colocada em cima de uma escada de madeira e sua posição foi mantida fixa ao longo de todos os ensaios, não tendo havido deslocamentos do local onde foi posicionada. A posição foi determinada por conta de limitações do alcance do sinal Wi-Fi que operou no limite do alcance máximo possível, com sinais de qualidade considerada ruim entre -80 dBm a -90 dBm, mas que não impossibilitaram o registro dos dados que, eventualmente, sofreram

pequenas falhas de registro. As aquisições de dados foram realizadas em faixas de dias diferentes.

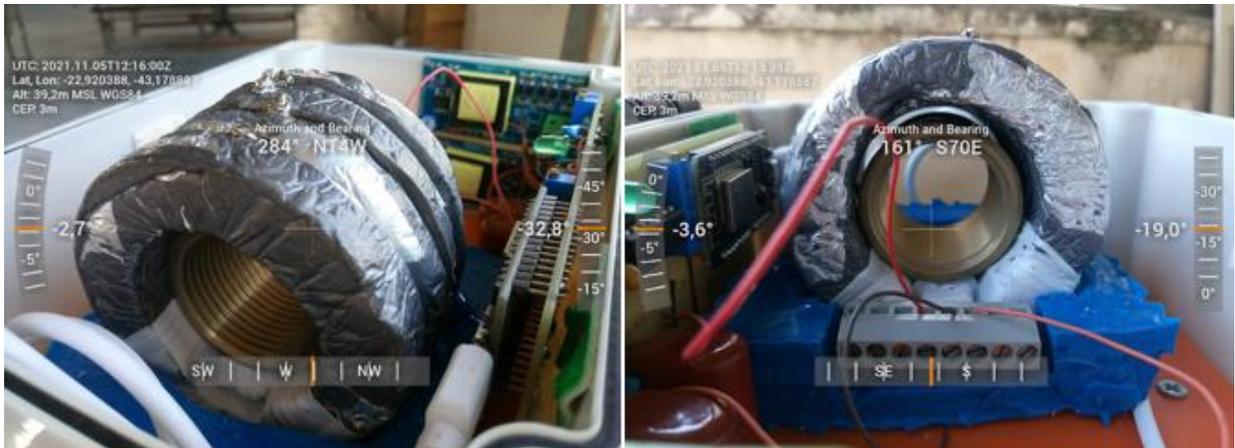


Figura 3.20: Visão com informações de posição (latitude de -22,920388, longitude de -73,178887, altitude de 39,2 m, azimute de 161° e rumo de S70E) na foto da esquerda e visão da luva de aço galvanizado no interior dos anéis de chumbo na foto à direita [Pontes, 2022].



Figura 3.21: Posição final da unidade: anéis de chumbo com eixo alinhado com azimute de 46° e perpendicular ao Nordeste (NE ou N46E) na foto à esquerda e posição final em cima da escada à direita [Pontes, 2022].

Cada medição registrada pelo equipamento corresponde ao número de eventos simultâneas registrados no intervalo de uma hora e todas as medições podem ser consultadas no Apêndice III deste trabalho. Os ensaios para a realização das medições foram realizados no intervalo máximo de três meses de forma a mitigar possível influência por conta de mudança de estação do ano e sem interrupções quanto à hora do dia, da seguinte forma:

- Em ambiente coberto sem corpo de prova (no andar térreo do interior da edificação que possui 9 andares e que foi o único não realizado no local da Figura 3.19) para fins de comparação com os dados registrados no terraço do prédio (19 medições ou 19 h de aquisição de dados);
- Em espaço aberto (apenas coberto por telhado de amianto) com o corpo de prova de vidro (frasco de penicilina) contendo apenas ar atmosférico sem material no interior (133 medições ou 133 h de aquisição de dados, divididas em duas sequências separadas por 8 dias de 4 dias consecutivos e de 5 dias consecutivos);
- Em espaço aberto com o corpo de prova de vidro contendo parafina (109 medições ou 109 h de aquisição ao longo de 8 dias consecutivos);
- Em espaço aberto com o corpo de prova de vidro contendo asfalto (155 medições ou 155 h de aquisição divididas em duas sequências separadas por 47 dias de 4 dias consecutivos e 5 dias consecutivos);
- Em espaço aberto com o corpo de prova de vidro contendo água (122 medições ou 122 h de aquisição divididas em duas sequências separadas por 29 dias de 4 dias consecutivos);
- Em espaço aberto com o corpo de prova de aço contendo ar atmosférico sem material no interior (195 medições ou 195 h de aquisição divididas em três sequências de 4 dias separadas por 6 dias e 41 dias);
- Em espaço aberto com o corpo de prova de aço contendo parafina (190 medições ou 190 h de aquisição divididas em duas sequências separadas por 8 dias de 4 dias consecutivos e 7 dias consecutivos);
- Em espaço aberto com o corpo de prova de aço contendo asfalto (140 medições ou 140 h de aquisição divididas em duas sequências separadas por 11 dias de 5 dias consecutivos e de 4 dias consecutivos);

### 3.7. Tratamento dos dados

Os dados registrados de todos os ensaios podem ser consultados no Apêndice III do presente trabalho. De forma geral, os dados passaram pelos seguintes tratamentos:

- Importação da fonte de dados da Internet pelo Excel;

- Classificação quanto à condição do Ensaio (tipo de corpo de prova);
- Supressão de *outliers* por tratamento por Faixa Interquartil;
- Teste de Normalidade de *Kolmogorov-Smirnov* para  $\alpha=0,05$  feito por meio de planilha em Microsoft Excel (todos os resultados atenderam ao Teste);
- Traçado dos gráficos de Curva F (função cumulativa) para comparação dos resultados;
- Cálculo dos Momentos Estatísticos (Média, Variância, Desvio-Padrão, Assimetria e Curtose);
- Realização dos Testes F para determinação do comportamento das variâncias e T para comparação de médias diferentes entre as amostras na forma Uni e Bicaudal para grau de confiança de 95% (determinação do *p-valor*);
- Determinação do poder estatístico (amostral) dos resultados;
- Cálculo do poder amostral por meio do programa *GPower 3.1*.

## Capítulo 4

### RESULTADOS

#### 4.1. Resultados de ensaio em ambiente coberto

A Tabela 4.1 apresenta a estatística para o ensaio executado em ambiente coberto sem corpo de prova no interior da blindagem com a quantidade de medidas realizadas e os momentos estatísticos (média, variância, desvio-padrão, assimetria e curtose) das contagens.

Tabela 4.1: Estatística do ensaio sem corpo de prova em ambiente coberto.

CONDIÇÃO	Medidas	Média	Variância	Desvio-Padrão	Assimetria	Curtose
<b>AMBIENTE COBERTO</b>	19	49	44,46	6,67	0,33	-0,63

A Figura 4.1 apresenta o histograma e o percentual cumulativo do ensaio [Pontes, 2022]. As curvas polinomiais foram traçadas com a finalidade de facilitar a visualização e comparação dos dados. Também são apresentados os resultados de  $R^2$  para as mesmas.

Os resultados do ensaio realizado em ambiente coberto indicaram leitura média em torno de 49 contagens com contagem mais baixa em relação aos resultados apresentados adiante nas Seções 4.2 e 4.3.

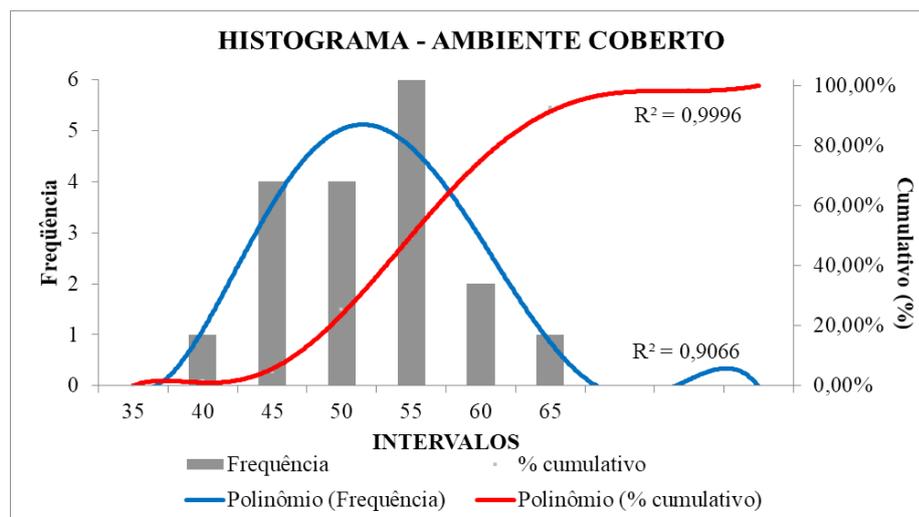


Figura 4.1: Histograma e Percentual Cumulativo para ensaio em ambiente coberto [Pontes, 2022].

#### 4.2. Resultados dos ensaios com corpos de prova de vidro em espaço aberto

A Tabela 4.2 apresenta a estatística para as amostras coletadas a partir dos ensaios com corpos de prova de vidro.

Tabela 4.2: Estatística dos ensaios com corpos de prova de vidro em espaço aberto.

CONDIÇÃO	Medidas	Média	Variância	Desvio-Padrão	Assimetria	Curtose
AR	133	77	84,39	9,19	0,08	-0,67
PARAFINA	109	76	80,04	8,95	0,18	-0,61
ASFALTO	155	77	67,53	8,22	0,06	-0,59
ÁGUA	122	73	61,24	7,83	0,05	-0,55

Os resultados dos ensaios realizados em espaço aberto com corpos de prova de vidro indicaram leituras médias em torno de 73 a 77. O valor médio de 73 coincidências por hora para corpo de prova com água, que é o menor dentre os corpos de prova de outras composições, pode ser explicado por conta da capacidade da água em absorver com mais eficiência em relação ao ar, a parafina e ao asfalto, a radiação gama oriunda da cascata eletromagnética resultante da interação dos múons com o chumbo.

O gráfico da Figura 4.2 [Pontes, 2022] apresenta os resultados para a variância e para a média da Tabela 4.2 para melhor visualização. É possível notar pela Figura 4.2 a tendência de decréscimo dos valores da variância e da média, da esquerda para a direita, sugestiva do que poderia ser uma maior capacidade de absorção da radiação das substâncias apresentadas na ordem apresentada.

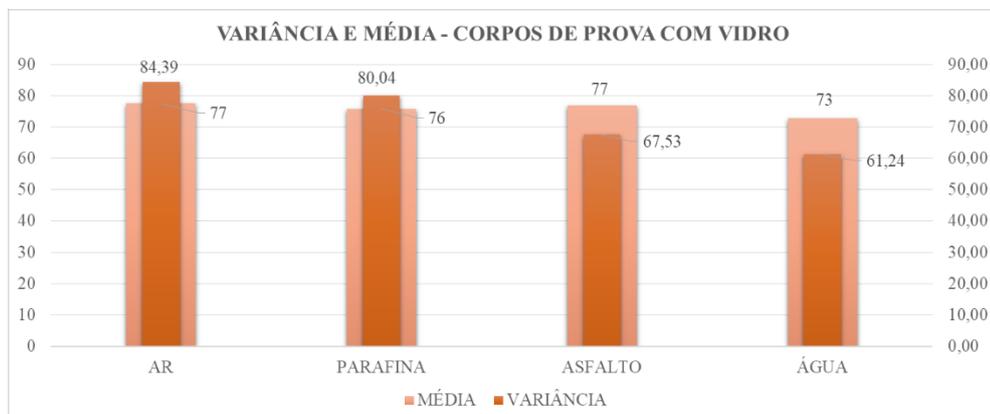


Figura 4.2: Resultados para variância e média com base na Tabela 4.2 [Pontes, 2022].

A Figura 4.3 [Pontes, 2022] apresenta os resultados para a assimetria e para a curtose da Tabela 4.2 para melhor visualização.

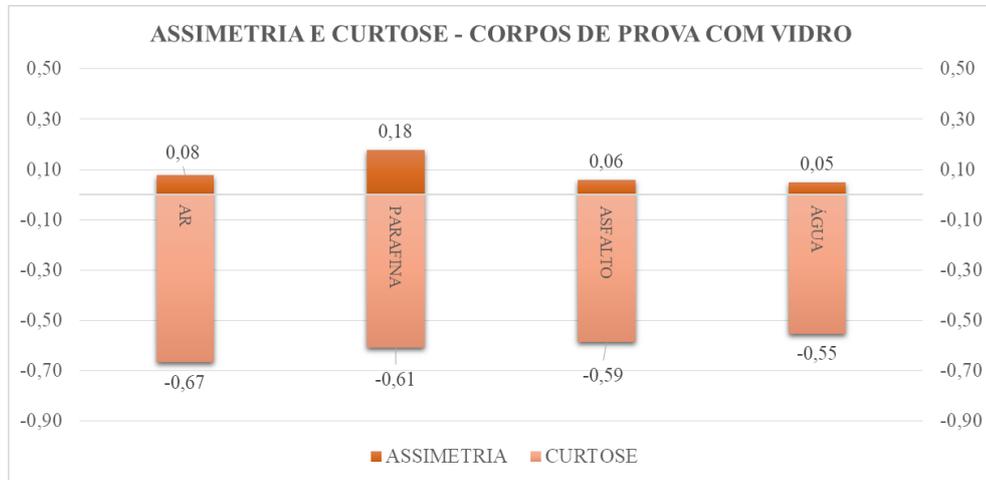


Figura 4.3: Resultados para assimetria e curtose com base na Tabela 4.2 [Pontes, 2022].

Conforme se observa pela Figura 4.3, a assimetria apresentou valores levemente positivos em todos os casos tendo sido mais expressiva para o caso da parafina. Este comportamento de leituras de coincidências por hora mais frequentes em valores mais baixos que a média pode ser um indício da capacidade de absorção de radiação gama oriunda da cascata eletromagnética, ao menos para determinada faixa de energia desta radiação. Apesar dos valores muito próximos, é possível notar leve tendência de aumento, da esquerda para a direita da curtose, que poderia estar também associada à variação da absorção da radiação pelas diferentes substâncias.

A Figura 4.4 apresenta o histograma e o percentual cumulativo do ensaio em espaço aberto com corpo de prova de vidro com ar [Pontes, 2022].

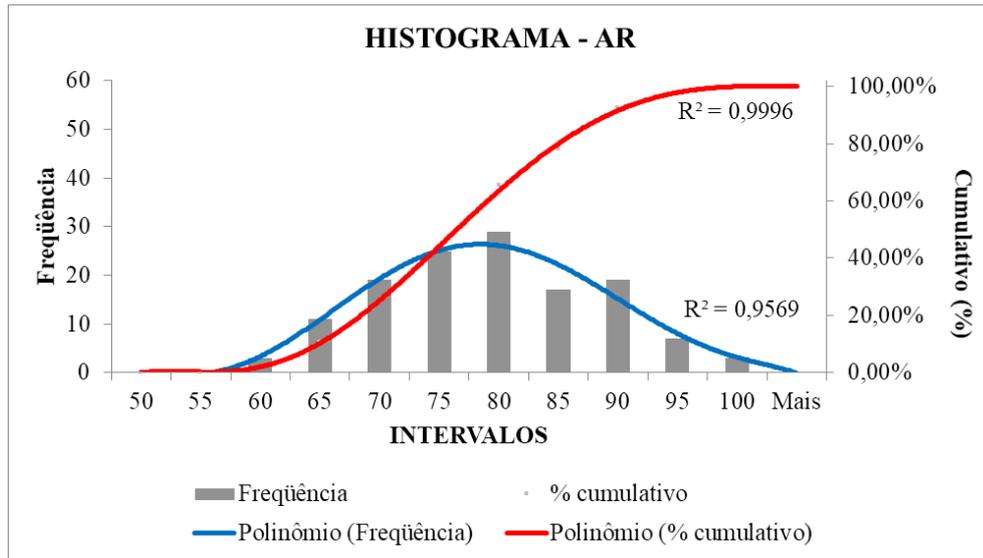


Figura 4.4: Histograma e Percentual Cumulativo em espaço aberto para corpo de prova de vidro com ar [Pontes, 2022].

A Figura 4.5 apresenta o histograma e o percentual cumulativo do ensaio em espaço aberto com corpo de prova de vidro com parafina [Pontes, 2022].

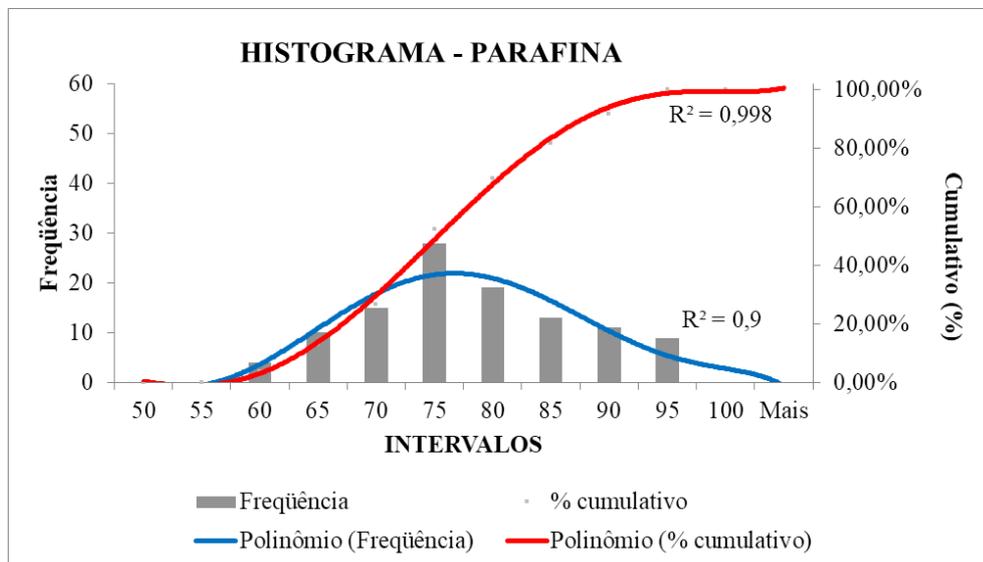


Figura 4.5: Histograma e Percentual Cumulativo em espaço aberto para corpo de prova de vidro com parafina [Pontes, 2022].

A Figura 4.6 apresenta o histograma e o percentual cumulativo do ensaio em espaço aberto com corpo de prova de vidro com asfalto [Pontes, 2022].

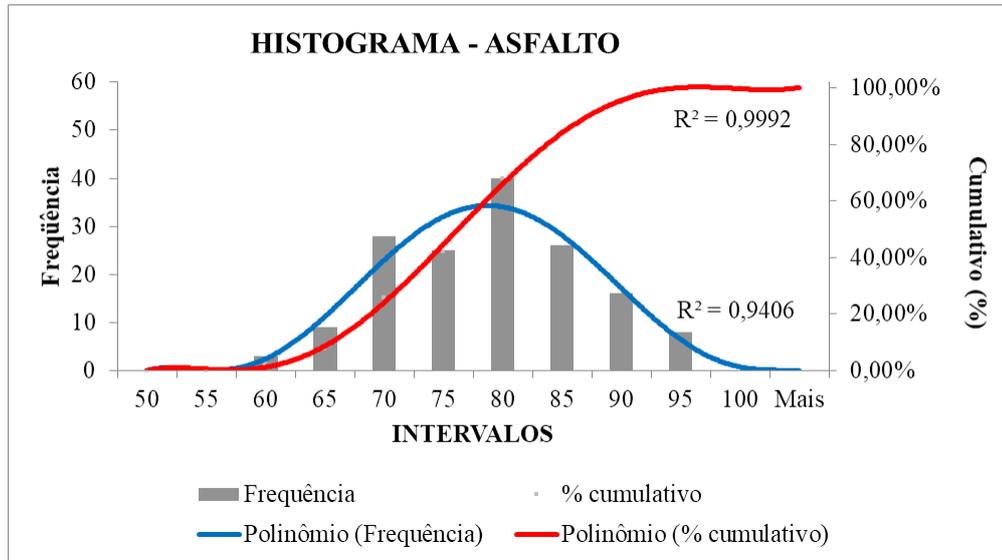


Figura 4.6: Histograma e Percentual Cumulativo em espaço aberto para corpo de vidro com asfalto [Pontes, 2022].

A Figura 4.7 apresenta o histograma e o percentual cumulativo do ensaio em espaço aberto com corpo de prova de vidro com água [Pontes, 2022].

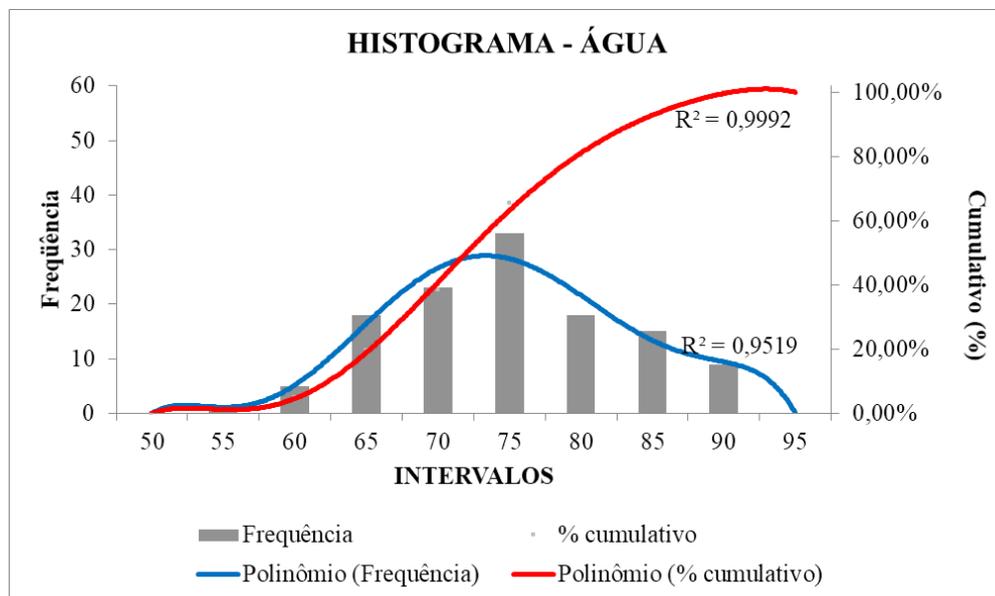


Figura 4.7: Histograma e Percentual Cumulativo em espaço aberto para corpo de prova de vidro com água [Pontes, 2022].

A Figura 4.8 apresenta as Curvas Cumulativas F dos ensaios em espaço aberto com os diferentes tipos de corpos de prova com frasco de vidro para comparação [Pontes, 2022].

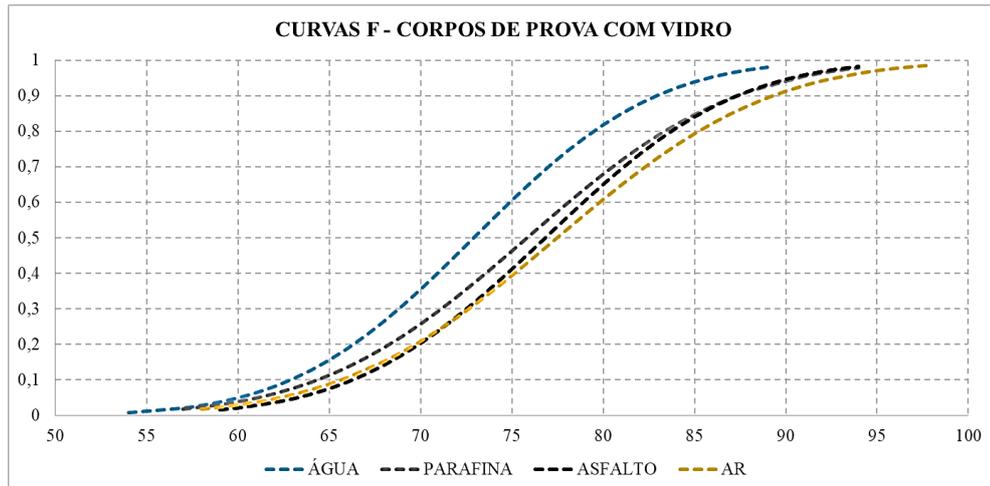


Figura 4.8: Curvas Cumulativas F dos ensaios com corpos de prova com vidro (frasco de penicilina) [Pontes, 2022].

É possível observar através da Figura 4.8 a diferença e o deslocamento para a esquerda da Curva F, sobretudo para o corpo de prova com água, um indício do efeito de absorção, ainda que variando em intensidade, das diferentes substâncias em relação ao ar.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos Testes F e T (valor  $p$ ) para comparação de variâncias e médias e dos poderes amostrais para as condições dos ensaios.

Tabela 4.3: Comparação de ensaios com corpos de prova de vidro em espaço aberto para todos os valores.

CONDIÇÃO	TESTE F	TESTE T UNICAUDAL	(1- $\beta$ ) UNICAUDAL	TESTE T BICAUDAL	(1- $\beta$ ) BICAUDAL
	<b>PARAFINA VERSUS AR</b>	0,78	0,08	0,29	0,17
<b>ASLFATO VERSUS AR</b>	0,19	0,27	0,27	0,55	0,55
<b>ÁGUA VERSUS AR</b>	0,07	0,00	1,00	0,00	0,96

Apesar dos gráficos da Figura 4.2 indicarem a redução progressiva da variância de forma decrescente, tal como se observa, os resultados dos Testes F apresentados na Tabela 4.3 para os ensaios em espaço aberto considerando todos os valores medidos após supressão de *outliers*, não apontaram, seguindo o critério de confiabilidade de 95 %, diferença entre as variâncias para as diferentes condições confrontadas na tabela. Note-se, no entanto, que o valor do Teste F para o ensaio realizado com corpo de prova com ar em confronto com o corpo de prova com água ficou bem próximo do desejável, com 93 % (0,07 na segunda coluna e terceira linha da tabela).

Apesar das tendências já assinaladas para a variação das médias, dentre os Testes T para os ensaios com corpo de prova de vidro em espaço aberto, para a mesma faixa de valores,

somente os testes unicaudal e bicaudal da água versus ar conseguiram atingir poder amostral (quantidade suficiente de valores na amostra) alto. Permitiram inferir que não foi detectada diferença entre o corpo de prova de ar e o de asfalto e que o corpo de prova contendo água apresentou, em relação ao ar, notável diferença com confiança maior que 99% (0,00 nos Testes T uni e bicaudal). Novamente, para se estabelecer com assertividade mais conclusões, o restante dos testes para este grupo de ensaios iria requerer a obtenção de amostras maiores, notadamente o da parafina que, na faixa de valores considerados, chegou a indicar diferença no Teste T unicaudal para com o ar com confiança de 92 % (0,08), mas com poder amostral baixo, no valor de 0,29 ( $1 - \beta$ ).

#### 4.3. Resultados dos ensaios com corpos de prova de aço em espaço aberto

A Tabela 4.4 apresenta a estatística para as amostras coletadas a partir dos ensaios com corpos de prova com aço (luva de aço galvanizado).

Tabela 4.4: Estatística dos ensaios com corpos de prova de aço em espaço aberto para todos os valores.

CONDIÇÃO	Medidas	Média	Variância	Desvio-Padrão	Assimetria	Curtose
<b>AR</b>	195	70	55,78	7,47	-0,04	-0,55
<b>PARAFINA</b>	190	69	44,44	6,67	-0,05	-0,51
<b>ASFALTO</b>	140	68	60,92	7,81	0,05	-0,61

Conforme se observa na Tabela 4.4, os corpos de prova de aço galvanizado indicaram leituras médias em torno de 68 a 70, o que revela notável diferença entre estes e os resultados para os testes com corpos de prova de vidro apresentados na Seção 4.2. O valor médio de 68 eventos (ou coincidências) por hora para corpo de prova com asfalto foi o menor dentre os corpos de prova, mas não houve diferença notável para a média dentro das condições dos ensaios considerando-se os desvios-padrão.

O gráfico da Figura 4.9 [Pontes, 2022] apresenta os resultados para a variância e para a média da Tabela 4.4.

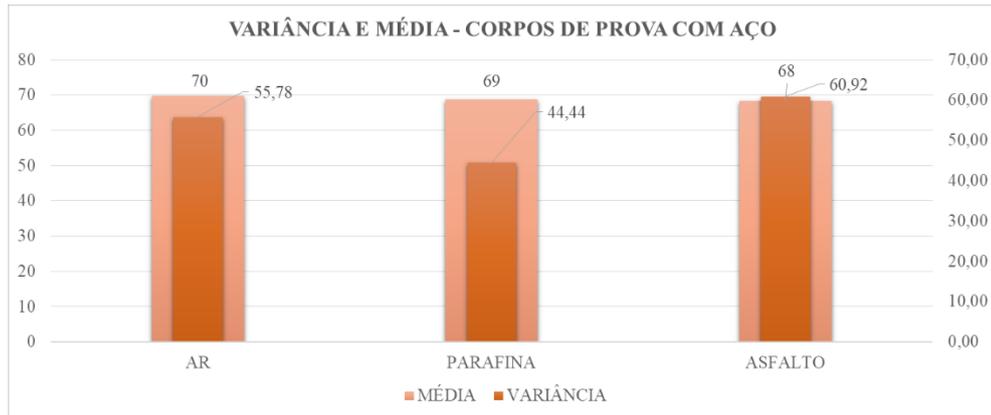


Figura 4.9: Resultados para variância e média com base na Tabela 4.4 [Pontes, 2022].

Ao contrário do comportamento observado por meio da Figura 4.2, o gráfico da Figura 4.9 indicou variância maior para o asfalto em comparação aos outros corpos de aço galvanizado, o que pode ser um indício de interação diferenciada do asfalto em razão da faixa de energia da radiação incidente e proveniente da cascata eletromagnética, impossível de se medir por meio do conjunto eletrônico empregado neste trabalho. Por outro lado, a redução do valor observado para a variância no caso da parafina precisaria ser analisada futuramente em outros testes para se estabelecer melhor compreensão.

O gráfico da Figura 4.10 [Pontes, 2022] apresenta os resultados para a assimetria e para a curtose da Tabela 4.4.

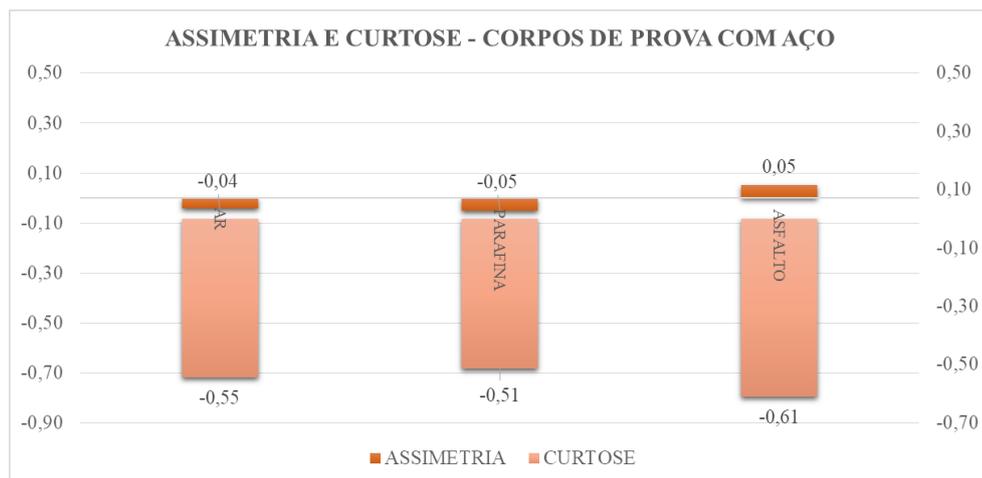


Figura 4.10: Resultados para assimetria e curtose com base na Tabela 4.4 [Pontes, 2022].

Conforme se observa pela Figura 4.10, a assimetria se apresentou levemente positiva para a amostra com asfalto e levemente negativa para as amostras com ar e com parafina, mas em valores tão próximos entre si e de zero que dificultam maiores conclusões a respeito. A curtose negativa se mostrou muito similar entre as diferentes condições dos ensaios com corpo

de prova de aço galvanizado em espaço aberto, não permitindo inferir maiores conclusões, notando-se apenas ligeira diferença para valor negativo para o corpo de prova com asfalto, o que, juntamente com a diferença para assimetria deste material, poderia também ser um indício de comportamento diferenciado desta substância para com a absorção da radiação.

A Figura 4.11 apresenta o histograma e o percentual cumulativo do ensaio em espaço aberto com corpo de prova de aço com ar [Pontes, 2022].

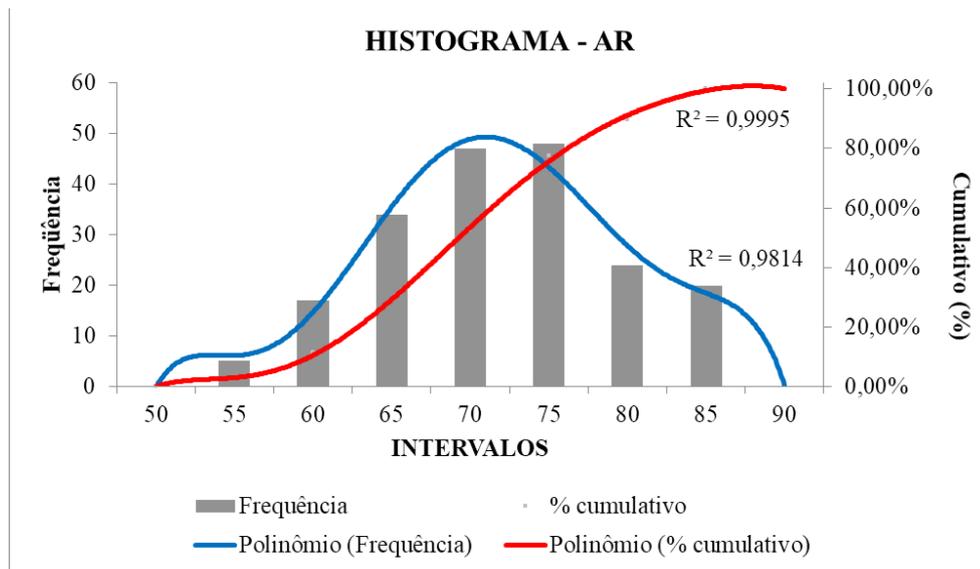


Figura 4.11: Histograma e Percentual Cumulativo em espaço aberto para corpo de prova de aço com ar [Pontes, 2022].

A Figura 4.12 apresenta o histograma e o percentual cumulativo do ensaio em espaço aberto com corpo de prova de aço com parafina [Pontes, 2022].

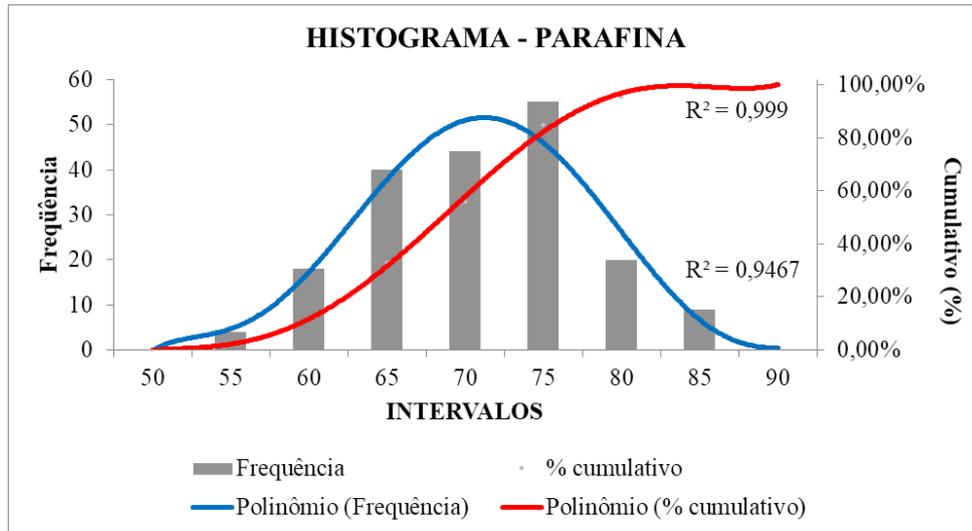


Figura 4.12: Histograma e Percentual Cumulativo em espaço aberto para corpo de prova de aço com parafina [Pontes, 2022].

A Figura 4.13 apresenta o histograma e o percentual cumulativo do ensaio em espaço aberto com corpo de prova de aço com asfalto [Pontes, 2022].

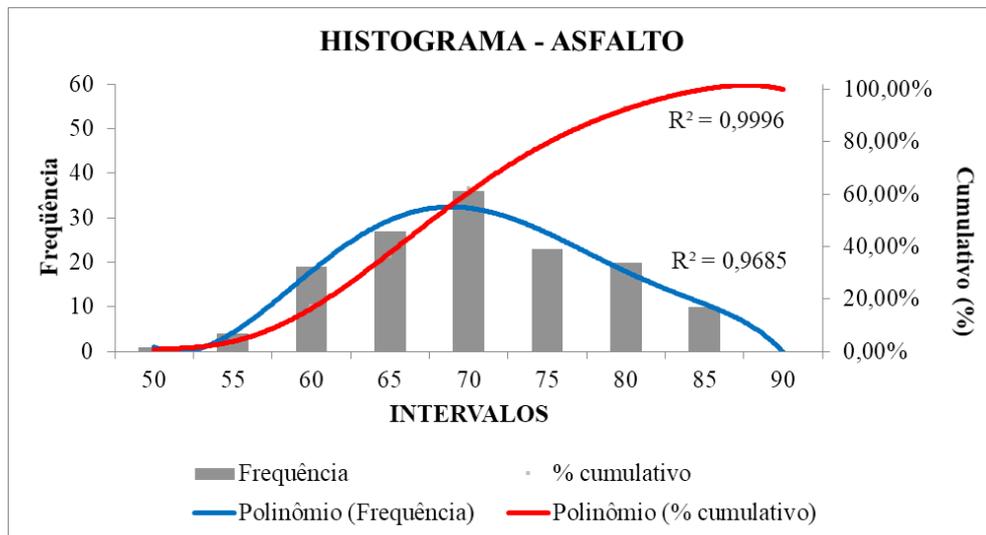


Figura 4.13: Histograma e Percentual Cumulativo em espaço aberto para corpo de prova de aço com asfalto [Pontes, 2022].

A Tabela 4.5 apresenta os resultados dos Testes F e T (valor  $p$ ) para comparação de variâncias e médias e dos poderes amostrais para as condições dos ensaios.

Tabela 4.5: Comparação de ensaios com corpos de prova de aço galvanizado em espaço aberto para todos os valores.

CONDIÇÃO	TESTE	TESTE T	(1- $\beta$ )	TESTE T	(1- $\beta$ )
	F	UNICAUDAL	UNICAUDAL	BICAUDAL	BICAUDAL
PARAFINA VERSUS AR	0,12	0,08	0,49	0,16	0,49
ASFALTO VERSUS AR	0,57	0,04	0,73	0,08	0,72

Os resultados dos Testes F apresentados na Tabela 4.5 para os ensaios em espaço aberto considerando todos os valores medidos após supressão de *outliers*, não apontaram diferença entre as variâncias para as diferentes condições confrontadas.

Dentre os Testes T, o resultado para a parafina em confronto com ar apresentou poder amostral médio (1-  $\beta$ ) de 0,49 tendo a diferença sido estabelecida com grau de confiança de 92 % apenas no Teste T Unicaudal (0,08). Por outro lado, os resultados para o asfalto em confronto com o ar, o poder amostral chegou a valores em torno de 0,7 apontando diferença entre as médias das duas condições no Teste Unicaudal com grau de confiança de 96 % (0,04 na tabela).

A Figura 4.14 apresenta as Curvas Cumulativas F dos ensaios em espaço aberto com os diferentes tipos de corpos de prova com aço galvanizado para comparação [Pontes, 2022].

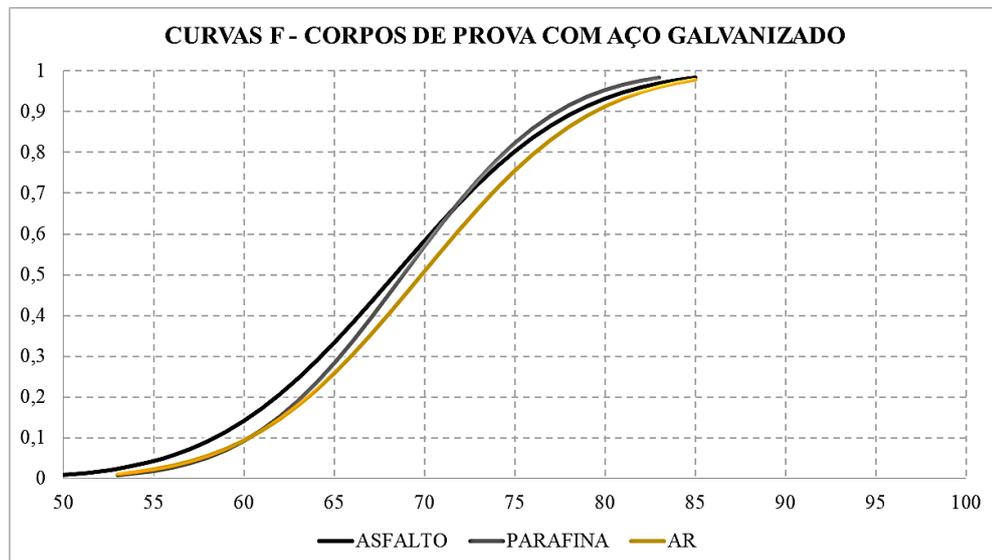


Figura 4.14: Curvas Cumulativas F dos ensaios com corpos de prova com aço galvanizado (luva de aço galvanizado) [Pontes, 2022].

Ainda a respeito dos resultados dos ensaios com corpo de aço galvanizado em espaço aberto, é possível observar, através da Figura 4.14, pequena diferença no perfil da Curva F conforme o material, sobretudo para coincidências registradas fora dos extremos do gráfico. É possível observar que o ar assume, ao menos através das curvas F, comportamento diferenciado com relação ao asfalto e a parafina que parecem exibir comportamento muito próximo entre si.

A Figura 4.15 apresenta o gráfico das Curvas F com todos os resultados, onde é fácil se perceber a diferença de perfil entre as condições de ensaio entre os grupos com corpos de aço galvanizado e o com corpos de frasco de vidro [Pontes, 2022]. Dentro de cada grupo de ensaios, esta diferença também se faz mais perceptível para valores acima da média de eventos por hora de 70 para corpos de aço galvanizado e de 75 para corpos com frascos de vidro.

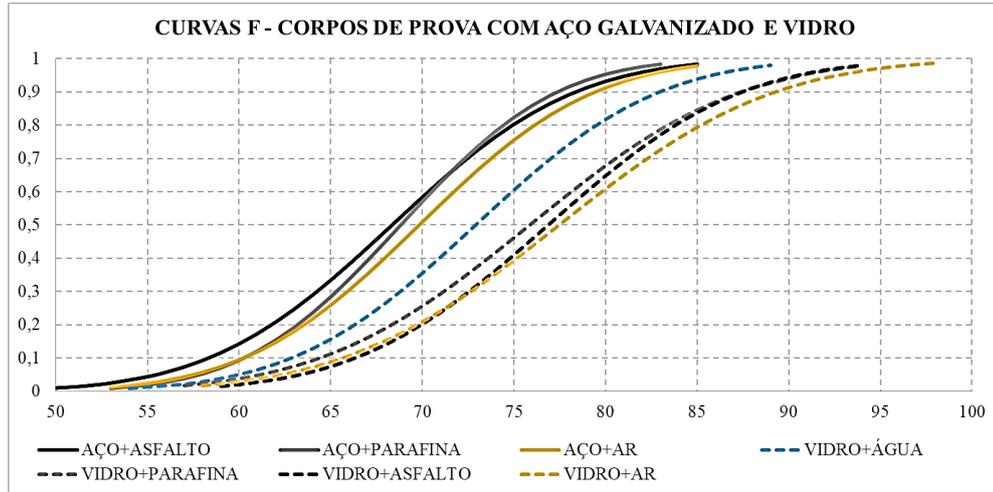


Figura 4.15: Curvas F de todos os ensaios realizados em espaço aberto considerando todos os valores (sem segregação de valores acima da média) [Pontes, 2022].

#### 4.4. Resultados com segregação de valores acima das médias

Para verificar se a segregação de valores acima da média poderia ou não apresentar melhores resultados, realizou-se a repetição dos testes F e T para os valores acima da média para os ensaios em espaço aberto.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados calculados para os Testes F e T (valor  $p$ ) de corpos de prova de vidro para valores maiores que as médias.

Tabela 4.6: Comparação de ensaios com corpos de prova de vidro em espaço aberto para valores maiores que as médias.

CONDIÇÃO	TESTE	TESTE T	(1- $\beta$ )	TESTE T	(1- $\beta$ )
	F	UNICAUDAL	UNICAUDAL	BICAUDAL	BICAUDAL
PARAFINA VERSUS AR	0,56	0,02	0,44	0,05	0,48
ASFALTO VERSUS AR	0,48	0,02	0,59	0,05	0,63
ÁGUA VERSUS AR	0,27	0,00	0,99	0,00	0,99

A Tabela 4.6 apresenta justamente os resultados para a repetição dos Testes F e T para as mesmas condições da Seção 4.2, mas, considerando agora para fins de cálculo nos Testes, apenas os valores de cada condição que se encontram acima da média indicada na Tabela 4.2. Dela se depreende que os resultados indicaram diferença entre as médias de todos os ensaios com acréscimo do poder amostral em comparação aos resultados da Tabela 4.3. No pior caso, foi encontrado o valor de 0,44 (valor unicaudal na segunda linha e quarta coluna da Tabela 4.6) para a parafina versus ar.

A Tabela 4.7 apresenta os resultados calculados para os Testes F e T (valor  $p$ ) de corpos de prova de aço galvanizado para valores maiores que as médias.

Tabela 4.7: Comparação de ensaios com corpos de prova de aço galvanizado em espaço aberto para valores maiores que as médias.

CONDIÇÃO	TESTE	TESTE T	(1- $\beta$ )	TESTE T	(1- $\beta$ )
	F	UNICAUDAL	UNICAUDAL	BICAUDAL	BICAUDAL
<b>PARAFINA VERSUS AR</b>	0,22	0,00	0,96	0,00	0,93
<b>ASFALTO VERSUS AR</b>	0,82	0,18	0,70	0,37	0,72

De forma análoga à Tabela 4.6, a Tabela 4.7 apresenta os resultados para a repetição dos Testes F e T para as mesmas condições da Seção 4.3, mas, considerando também para fins de cálculo nos Testes, apenas os valores de cada condição que se encontram acima da média indicada na Tabela 4.4. Dela se depreende que os resultados indicaram diferença entre as médias dos ensaios da parafina em confronto com o ar com confiabilidade maior que 99% (0,00 na segunda linha e colunas 3 e 4 da Tabela 4.7), mas com decréscimo da diferença para o asfalto em confronto com o ar que passou para 82% (0,18 na terceira linha e na coluna 3 da Tabela 4.7) de confiança. Em ambos os casos houve considerável acréscimo do poder amostral (valores maiores de 1-  $\beta$ ) em comparação aos resultados da Tabela 4.4. No pior caso, foi encontrado o valor de 0,72 para o asfalto em confronto com o ar.

Quando a unidade é posicionada em espaço aberto, é esperado que a contribuição da cascata eletromagnética tenda a ser maior nos extremos superiores da população (distribuição das contagens), onde as contagens são maiores, ainda que menos frequentes, por conta da interação de múons com o chumbo (ainda que não se tenha como dizer se em número, espectro de energia ou ângulo favorável) em detrimento de outros tipos de detecção ou sinais espúrios.

Ou em outras palavras, a contribuição destas detecções melhora a discriminação entre os materiais estudados.

## Capítulo 5

### CONCLUSÃO

A análise gráfica das curvas cumulativas possibilitou estabelecer claramente a diferença dentre os grupos de corpos de aço e corpos de vidro e, para o caso da água no corpo de vidro, sua notável diferenciação com relação aos perfis de todas as outras curvas. A análise visual das curvas cumulativas foi capaz, também, de apontar diferenças, ainda que muito discretas, entre os diferentes tipos de materiais dentro de seus grupos.

Os resultados dos momentos estatísticos para o caso dos corpos de vidro com diferentes materiais possibilitaram, em conjunto, estabelecer limitada diferenciação entre estes, mas em conformidade com o comportamento que se esperaria para os materiais. Já para os corpos de prova com aço, não foi possível estabelecer com rigor tal diferenciação.

Os resultados dos Testes T que incluíram todos os valores de cada amostra apresentaram resultados conclusivos com grau de confiança superior a 99 % e poder estatístico de 96 % ao se comparar corpos de prova de vidro com água e com ar. O sucesso deste resultado se manteve quando tomados, para fins de execução dos Testes T, apenas valores da amostra acima da média, tendo se observado também grau de confiança mínimo de 98 % na distinção entre as amostras com corpo de vidro com acréscimo, ainda que abaixo do valor aceitável de 80 %, do poder estatístico dos resultados. Para valores acima da média para execução dos Testes T com corpos de aço, o resultado apresentou notável melhora para a parafina quando comparada ao ar, atingindo grau de confiança acima de 99 % com poder amostral de 93 %.

Desta forma, dos resultados obtidos os que mais se aproximaram do objetivo do trabalho foram os que consideraram na realização dos Testes T os valores registrados para as taxas de eventos por hora acima da média para cada caso. Obteve-se nesse caso, na situação mais desfavorável, os valores de confiabilidade de 82 % e de 63 % na diferenciação entre asfalto e ar com poder amostral de 72 %. As tendências observadas para as diferenças entre as médias dos diferentes corpos de prova requerem, no entanto, a realização de amostras maiores e maior precisão das medidas para que se possa aumentar o poder amostral e se estabelecer com segurança os resultados alcançados. Nesse sentido, dada a “arquitetura” do projeto, não é possível estabelecer se essa melhora na precisão quando do aproveitamento apenas de valores de taxas maiores de eventos por hora é devida ao aumento do fluxo ou de flutuações, para mais ou para menos, na faixa de energia ou dos ângulos de incidência dos múons. Além disso, a

redução ou supressão de ruído indesejável, mesmo no circuito de coincidência, precisa ser aprimorada de forma a tornar mais eficaz e acurada a detecção.

A medição em espaço aberto se mostrou mais indicada como esperado dada a maior disponibilidade de múons incidentes que seriam bloqueados por estruturas de concreto armado que compõem as edificações.

A construção do circuito de detecção simultânea de múons, a confecção da blindagem de chumbo, a confecção dos corpos de prova e a elaboração de código de programação para registro e envio de dados via Internet foram bem-sucedidos.

Em trabalhos futuros tem-se como objetivo fazer a detecção com tubulações reais com sistemas multifásicos, tanto em campo como em laboratório, contendo amostras de obstruções, com o emprego de mais tubos Geiger-Müller e de outras unidades ou protótipos para confrontação de dados operando em paralelo e em outras regiões. Além disso objetiva-se o aprimoramento da blindagem de chumbo e o emprego de equipamentos que possibilitem a discriminação dos múons não só em termos de número, mas de energia derivada da cascata eletromagnética, através de dispositivo multicanal.

## REFERÊNCIAS

**(GMR) Sensors and a Pipe-Encircling Excitation for Evaluation of Corrosion under Insulation.** Sensors, MDPI, 2017.

AGOSTINELLI, S et. al. **GEANT 4 – a simulation toolkit.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 506, 250–303, ELSEVIER, 2003.

ALEXANDROV, A.B., VLADYMYROV, M.S., GALKIN, V.I., GONCHAROVA, L.A., GRACHEV, V.M., VASINA, S.G., KONOVALOVA, N.S., MALOVICHKO, A.A., MANAGADZE, A.K., OKAT’EVA, N.M., POLUKHINA, N.G., ROGANOVA, T.M., STARKOV, N.I., TIOUKOV, V.E., CHERNYAVSKY, M.M., SCHEDRINA, T.V. **Muon radiography method for fundamental and applied research.** PACS numbers: 07.05.Fb, 07.05.Hd, 07.05.Kf, 29.40, Russian Academy of Sciences, 2017.

ALTAMEEMI, R.N.I. *et al.* **Examination the cosmic ray muon attenuation by heavy metal alloys.** J. Phys.: Conf. Ser. 1768 012006, 2021.

ALTAMEEMI, R.N.I., GOPIR, G. **Effect of copper and aluminium on the event rate of cosmic ray muons at ground level in Bangi, Malaysia.** American Institute of Physics, 2016.

ALTAMEEMI, R.N.I., HAMID, N.S.A., AIMRAN, W.M., KAMIL, W.M., AHMED, S.M.S. **Determination of muon absorption coefficients in heavy metal elements.** Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 12:1, 281-288, Taylor & Francis, 2019.

ALYASIRI, M.G.S. **Muography as a new imaging technique.** Siileyman Demirel University, 2019.

ARBOL, P.M.R.D., GARCIA, P.G., GONZALEZ, C.D., ALONSO, A.I., ORIOALONSO, A. **Non-destructive testing of industrial equipment using muon radiography.** Phil. Trans. R. Soc. A, The Royal Society Publishing, 2018.

ASTM. **Standard Test Methods for Separation of Asphalt into Four Fractions.** D 4124 – 82, ASTM International, 2001.

AXANI, S.N., FRANKIEWICZ, K., CONRAD, J.M. **The CosmicWatch Desktop Muon Detector: a self-contained, pocket sized particle detector.** MIT, 2018.

BAILEY, J., LONG, N., HUNZE, A. **Eddy Current Testing with Giant Magnetoresistance Basic Cosmic Ray Detector Circuit.** **Cosmic Ray Astronomy.** Disponível em: <<http://cosmicray.com.au/basic-cosmic-ray-detector-circuit>>. Acesso em: 24 de nov. de 2021.

BONECHI, L., D’ALESSANDRO, R., GIAMMANCO, A. **Atmospheric muons as an imaging tool.** Reviews in Physics, ELSEVIER, 2020.

BONOMI, G., CHECCHIA, P., D’ERRICO, M., PAGANO, D., SARACINO, G. **Applications of cosmic-ray múons.** Progress in Particle and Nuclear Physics, ELSEVIER, 2020.

BORDALO, S.N., OLIVEIRA, R.C. **Escoamento bifásico óleo-água com precipitação de parafinas em dutos submarinos de produção de petróleo.** 4º DPETRO, Campinas, São Paulo, 2007.

BOROZDIN, K.N., HOGAN, G.E., MORRIS, C., PRIEDHORSKY, W.C., SAUNDERS, A., SCHULTZ, L.J., TEASDALE, M.E. **Radiographic imaging with cosmic-ray muons.** Nature Publishing Group, VOL.422, Nature, 2003.

BULLER, A.T., **Oil and gas technologies.** StatoilHydro ASA, 2009.

CANTUARIA, H.O.K.H. **Produção de traçador radioativo por eletromarcação de derivado de petróleo com  $^{123}\text{I}$ .** Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

CHAIWONGKHOT, K., TADAHIRO, K., OHNO, H., SASAKI, R., NAGAT, Y., KONDO, K., WATANABE, Y. **Development of a Portable Muography Detector for Infrastructure Degradation Investigation.** IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, IEEE, VOL. 65, NO. 8, 2018.

CHEN, X.T., BUTLER, T., VOLK, M., BRILL, J. P. **Techniques for measuring wax thickness during single and multiphase flow.** Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 1997.

CHUP, E.L., FORREST, D.J., LAVARAKE, P.J. **Gamma Ray Production in Paraffin by Cosmic Rays.** University of New Hampshire, 1968.

CIMMINO, L., BACCANI, G., NOLI, P., AMANTO, L., AMBROSINO, F., BONECHI, L., BONGI, M., CIULLI, V., D'ALESSANDRO, R., D'ERRICO, M., GONZI, S., MELON, B., MININ, G., SARACINO, G., SCOGNAMIGLIO, L., STROLIN, P., VILIANI, L. **3D Muography for the Search of Hidden Cavities.** Scientific Reports, Nature, 2019.

CLARK, G.W. **THE CONTRIBUTIONS OF BRUNO B. ROSSI TO PARTICLE PHYSICS AND ASTROPHYSICS.** XXV Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell'Astronomia, Milano, 10-12, 2005.

COCKRILL, C. **Understanding Schmitt Triggers.** Application Report, Texas Instruments, 2011.

CONTI, H.C. **Garantia de fluxo: deposição de parafinas.** Monografia, UFF, Niterói, 2013.

Cosmic Ray (Muon) Detector using Geiger-Müller Tubes. <<https://www.hardhack.org.au/book/export/html/52>>. Acesso em: 25 de nov. de 2021.

Cosmic ray discoverer outshone: study. **News in Science (ABC Science).** <<https://www.abc.net.au/science/articles/2010/02/26/2830391.htm>>. Acesso em: 25 de nov. de 2021.

Cosmic Rays Electromagnetic Cascade. **PhysicsOpenLab.** <<https://physicsopenlab.org/2016/04/12/cosmic-rays-cascade/>>. Acesso em: 25 de nov. de 2021.

Cosmic-ray particles reveal secret chamber in Egypt's Great Pyramid. **Nature News & Comment**. <<https://www.nature.com/news/cosmic-ray-particles-reveal-secret-chamber-in-egypt-s-great-pyramid-1.22939>>. Acesso em: 25 de nov. de 2021.

CRAWLEY, M. J. **Statistics: An Introduction Using R**. Wiley, 2005.

Detector Considerations. **Cosmic Ray Astronomy**. <<http://cosmicray.com.au/how-to-detect-a-cosmic-ray/detecting-muons>>. Acesso em: 25 de nov. de 2021.

DUARTE, U. **Métodos de determinação de vazão com o emprego de traçadores radioativos**. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 1973.

DUNNE, P. **Demonstrating cosmic ray induced electromagnetic cascades**. Preston College, 2000.

DUNCKE, A. **Morfologia de parafinas em petróleo, sistemas modelo e emulsões água/óleo por meio de microscopia óptica**. Tese M.Sc., PUC-RJ, 2015.

Electromagnetic Cascade. <<https://hardhack.org.au/book/export/html/76>>. Acesso em: 25 de nov. de 2021.

FAUTH, A.C., PENEREITO, J.C., KEMPL, E., GRIZOLLIL, W.C., CONSALTER, D.M., GONZALEZ, L.F.G. **Demonstração experimental da dilatação do tempo e da contração do espaço dos múons da radiação cósmica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.29, n. 4, p. 585-591, Sociedade Brasileira de Física, 2007.

FILHO, J.H.B.A., FAÇANHA, F., MATA, L. D., CRAIG, A. P. L., SARDENHA, C., SANTANA, A. P. S. C. **Utilização do monoetileglicol como agente inibidor da formação de hidratos aplicados na indústria do petróleo**. Ciências exatas e tecnológicas, Aracaju, v.3, n.2, p.11-22, Março, 2016.

FURTADO, A.T., **Pré-sal, desenvolvimento industrial e inovação**. Revista Paranaense de Desenvolvimento, Curitiba, v.34, n.125, p.79-100, jul/dez., 2013.

GAZINEU, M.H.P. **Teores de radionuclídeos em processos de extração e de produção de petróleo no Nordeste do Brasil**. Tese D.Sc. UFPE, Recife-PE, Brasil, 2005.

GOMES, E.A.S. **Estudo da cristalização de parafinas em sistemas solventes/tensoativos/água**. Tese D.Sc., UFRN, Rio Grande do Norte, 2009.

GÓMEZ, H., GIBERT, D., GOY, C., JOURDE, K., KARYOTAKIS, Y., KATSANEVAS, S., MARTEAU, J., ROSAS-CARBAJAL M., TONAZZO, A. **Forward scattering effects on muon imaging**. IOP Publishing, Sissa Medialab, 2017.

GUILLÉN, M., DULHOSTE, J-F, BESANCON, G., SANTOS, R. **Study of a flow model for detection and location of leaks and obstructions in pipes**. 9th International Conference on Modeling, Optimization & SIMulation, Bordeaux, França, 2012.

HART, R. **Cosmic Ray (Muon) Detector using Geiger–Müller tubes within lead shielding**. <<https://hardhack.org.au/book/export/html/94>>. Acesso em: 25 de nov. de 2021.

HULLEY, S. B., CUMMINGS, S. R., BROWNER, D. G. G., GRADY, D. G., NEWMAN, T. B. **Delineando a pesquisa clínica, 4ª Edição, Artmed Editora, 2015.**

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Radiotracer residence time distribution method for industrial and environmental applications.** Vienna, 2008.  
Issues to consider in the design of Muon (cosmicray) Detectors. <<https://www.hardhack.org.au/book/export/html/93>>. Acesso em: 25 de nov. de 2021.

KAISER, R. **Muography: overview and future directions.** Phil. Trans. R. Soc. A, The Royal Society Publishing, 2019.

KAMPERT, K-H., WATSON, A.A. **Extensive Air Showers and Ultra High-Energy**

Kolmogorov-Smirnov Test. <<https://deepai.org/machine-learning-glossary-and-terms/kolmogorov-smirnov%20test>>. Acessado em 21 de mar. de 2022.

LEIROZ, A.T., AZEVEDO, L. F. A. **Studies on the mechanisms of wax deposition in pipelines.** Offshore Technology Conference, 2005.

LEWIS, N.C. **Operational Risk with Excel and VBA: Applied Statistical Methods for Risk Management.** Wiley, 2004.

MARINHO, C.A., COSTA, R., SANTOS, E., COSTA, A.K., OLIVEIRA, D.F., LOPES, R.T. **Monitoração e Quantificação de Incrustações por Métodos Radiográficos.** Revista Abende, v. 42, p. 45-52, 2011.

MISHEV, A., ANGELOV, I., DUVERGER, E., GSCHWINDC, R., MAKOVICKAC, L., STAMENOVA, J. **Experimental study and Monte Carlo modeling of the Cherenkov effect.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 474, 101–107, ELSEVIER, 2001.

MORISHIMA, K., NISHIO, A., MOTO, M., NAKANO, T., NAKAMURA, M. **Development of nuclear emulsion for muography.** ANNALS OF GEOPHYSICS, 60, 1, 2017.

Muon Experiment. **J-PARC MLF.** <<https://mlfinfo.jp/en/aboutmlf/muon.html>>. Acesso em: 25 de nov. de 2021.

Muons. <[https://cosmic.lbl.gov/SKliewer/Cosmic\\_Rays/Muons.htm](https://cosmic.lbl.gov/SKliewer/Cosmic_Rays/Muons.htm)>. Acesso em: 25 de nov. de 2021.

MURGICH, J., RODRIGUEZ, J., ARAY, Y. **Molecular recognition in model asphaltenes and resin micelles.** Proceedings of the 1st International Symposium on Colloid Chemistry in Oil Production: Asphaltenes and Wax Deposition, p.95, Rio de Janeiro, 1995.

NABEYAMA, G. N. D. **Detecção de parafina por instrumentação ultrassônica.** Dissertação de Mestrado, UTFPR, Paraná, 2015.

NATIONAL ENERGY BOARD OF CANADA. **Pipeline Incident Report.** Canada, 2002.

NETO, A.A.D., GURGEL, A. **Refino de Petróleo e Petroquímica.** UFRN, 2014.

NISHIYAMA, R., TAKETA, A., MIYAMOTO, S., KASAHARA, K. **Monte Carlo simulation for background study of geophysical inspection with cosmic-ray muons.** Geophysical Journal International, 206, 1039-1050, Oxford University, 2016.

NÓBREGA, A.C.V., BARBOSA, A. F.F., SILVA, D.R., PIMENTA, G.S., PEIXOTO, D.G. **Estudo de caso - corrosão interna em dutos transportadores de gás natural.** 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, 2003.

NORRIS, G., QURESHI, F., HOWITT, D., CRAMDER, D. **Introduction do Statistics with SPSS for Social Science.** Taylor & Francis, 2014.

OIL REGION ALLIANCE. **Early Oil Transportation: A brief history.** Nationwide Museum Kit-Educator's Guide, 2009.

OLÁH, L., VARGA, D. **Investigation of soft component in cosmic ray detection.** Astroparticle Physics, ELSEVIER, 2017.

OLIVEIRA, D.F., NASCIMENTO, J.R., MARINHO, C.A., LOPES, R.T. **Gamma transmission system for detection of scale in oil exploration pipelines.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 784, 616-620, 2015.

PRIEDHORSKY, W.C., BOROZDIN, K.N., HOGAN, G.E., MORRIS, C., SAUNDERS, A., SCHULTZ, L.J., TEASDALE, M.E. **Detection of high-Z objects using multiple scattering of cosmic ray muons.** Review of Scientific Instruments 74, 4294, AIP Publishing, 2003.

RIBEIRO, F.S., MENDES P.R.S., BRAGA, S.L. **Obstruction of pipelines due to paraffin deposition during the flow of crude oils.** Int. J. Heat Mass Transfer. Vol.40, No. 18, pp.4319-4328, 1997.

RAMESH, N., HAWRON, M., MARTIN, C., BACHRI, A. **Flux variation of Cosmic Muons.** Journal of the Arkansas Academy of Science, Vol. 65, 2011.

SCHULTZ, L.J., BLANPIED, G.S., BOROZDIN, K.N., FRASER, A.M., HENGARTNER, N.W., KLIMENKO, A.V., MORRIS, C.L., ORUM, C., SOSSONG, M.J. **Statistical Reconstruction for Cosmic Ray Muon Tomography.** IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, VOL. 16, NO. 8, 2007.

SCHULTZ, L.J., BOROZDIN, K.N., GOMEZ, J.J., HONGAN, G.E., MCGILLC, J.A., MORRIS, C.L., PRIEDHORSKY, W.C., SAUNDERS, A. A., TEASDALE, M.E. **Image reconstruction and material Z discrimination via cosmic ray muon radiography.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 519, 687-694, ELSEVIER, 2004.

SCHMULLER, J. **Análise Estatística com Excel para leigos.** Alta Books Editora, Rio de Janeiro, 2018.

STOCKEL, C.T. **A study of muons deep underground. I. Angular distribution and vertical intensity.** J. Phys. A: Gen. Phys. 2 639, Northern Polytechnic, London, 1969.

TIOUKOV, V., ALEXANDROV, A., BOZZAL, C., CONSIGLIO, L., D'AMBROSIO, N., DE LELLIS, G., DE SILA, C., GIUDICEPIETRO, F., MACEDONIO, G., MYRAMOTO, S., NISHIYAMA, R., ORAZI, M., PELUSO, R., SHESHUKOV, A., SIRIGNANO, C., STELLACCIL, S. M., STROLIN, P., TANAKA, H. K. M. **First muography of Stromboli Volcano.** Scientific Reports, Nature, 2019.

TURNBULL, S. **Muon interaction with lead shielding producing activation: implications for Gamma-Ray Spectrometry.** Tese, Royal Melbourne Institute of Technology, 2011.

VANINI, S., CALVINI, P., CHECCHIA, P., GAROLA, R.A., KLINGER, J., ZUMERLE, G., BONOMI, G., DONZELLA, A., ZENONI, A. **Muography of different structures using muon scattering and absorption algorithms.** Phil. Trans. R. Soc. A, The Royal Society Publishing, 2018.

VARGA, D., NYITRAI, G., HAMAR, G., GALGÓCZI, A., OLÁH, L., TANAKA, H.K.M., OHMINATO, T. **Detector developments for high performance Muography applications.** Nuclear Inst. And Methods in Physics Research, A, ELSEVIER, 2019.

ZEB, J., ARSHED, W., RASHID, A., AKHTE, P. **Gamma Shielding by Aluminum.** Health Physics Division Directorate of Systems & Services, Pakistan Institute of Nuclear Science & Technology, Islamabad, Pakistan, December, 2010.

ZHONG, J., JIANG, X. **A study of using cosmic ray muon radiography to detect CO2 leakage from a primary storage into geological formations.** Environ Earth Sci 75, 912, Springer, 2016.

ZIEGLER, J.F. **Terrestrial Cosmic Rays.** IBM J. RES. DEVELOP. VOL. 40, NO. 1, 1996.

## APÊNDICE I

### CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DA PLACA NODEMCU (Contém bibliotecas e trechos de código de terceiros)

```

#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266mDNS.h>
#include <WiFiUdp.h>
#include <ESP8266HTTPClient.h>
#include <ESP8266httpUpdate.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <ArduinoOTA.h>
#include <ESPTelnet.h>
#define LED D0

const char* ssid = "NOME DA REDE WIFI";
const char* password = "SENHA DA REDE WIFI";
int status = WL_IDLE_STATUS;
const char* link = "https://www.caspontes.pro.br/muon.php";
String apiKeyValue = "CHAVE DE VALIDAÇÃO NO PHP";
IPAddress ip;
ESPTelnet telnet;

int last_conn = 0;
int count_hour = 0;
int count_total = 0;
int detection = 0;
int min_interval = 1000000;
int max_interval = 0;
int first_millis = 0;
int last_millis = 0;
int first_micros = 0;
int last_micros = 0;
int retry = 1;
float wifi_db = 0.00;
float vcc = 0.00;
String remote = "Q";

SoftwareSerial mySerial(14,12);

ADC_MODE(ADC_VCC);

void setupTelnet() {

telnet.onConnect(onTelnetConnect);
telnet.onInputReceived([](String str) {
  if (str == "R") {
    telnet.println("Rebooting now...");
    delay(1000);
    telnet.stop();
    delay(1000);
    ESP.restart();
  }
  else if (str == "C") {
    telnet.println("Start continuous dB measurement...");
    remote = "C";
  }
  else if (str == "S") {
    telnet.println("Stop continuous dB measurement...");
    telnet.print("> ");
    remote = "W";
  }
});
}

```

```

    }
    else if (str == "Q") {
        telnet.println("Exiting... You can close the window.");
        remote = "Q";
    }
    else {
        telnet.print("> ");
    }
}
});

}

void onTelnetConnect(String ip) {

    telnet.println("\nWelcome " + telnet.getIP());
    telnet.println("Use R, C, S or Q + <ENTER>");
    telnet.print("> ");
    remote="W";

}

void setup() {

    system_update_cpu_freq(160);
    pinMode(2,OUTPUT);
    pinMode(16,OUTPUT);
    pinMode(D1,INPUT);
    Serial.begin(115200);

    digitalWrite(2,HIGH);
    digitalWrite(16,HIGH);

    delay(1000);

    WiFi.mode(WIFI_STA);
    WiFi.setPhyMode(WIFI_PHY_MODE_11G);
    WiFi.begin(ssid, password);
    delay(1000);

    while (WiFi.waitForConnectResult() != WL_CONNECTED) {

        digitalWrite(16,LOW);
        delay(500);
        digitalWrite(16,HIGH);

    }

    digitalWrite(16,LOW);

    ArduinoOTA.onStart([]() {
        Serial.println("Start");
    });
    ArduinoOTA.onEnd([]() {
        Serial.println("\nEnd");
    });
    ArduinoOTA.onProgress([](unsigned int progress, unsigned int total) {
        Serial.printf("Progress: %u%%\r", (progress / (total / 100)));
    });
    ArduinoOTA.onError([](ota_error_t error) {
        Serial.printf("Error[%u]: ", error);
        if (error == OTA_AUTH_ERROR) Serial.println("Auth Failed");
        else if (error == OTA_BEGIN_ERROR) Serial.println("Begin Failed");
        else if (error == OTA_CONNECT_ERROR) Serial.println("Connect Failed");
        else if (error == OTA_RECEIVE_ERROR) Serial.println("Receive Failed");
        else if (error == OTA_END_ERROR) Serial.println("End Failed");
    });
}

```

```

});
ArduinoOTA.begin();

while (!Serial);
delay(100);

first_millis=millis();

while ((millis()-first_millis)<60000){

  ArduinoOTA.handle();
  delay(50);

}

setupTelnet();
telnet.begin();
first_millis=millis();

while ((millis()-first_millis)<60000 || remote!="Q"){

  telnet.loop();
  digitalWrite(16,HIGH);
  delay(500);
  if (remote=="C") {
    wifi_db=Wifi.RSSI();
    telnet.print(String(wifi_db));
    telnet.println(" dBm");
  }
  digitalWrite(16,LOW);

}

telnet.stop();
delay(1000);
WiFi.forceSleepBegin();
delay(1000);
digitalWrite(16,HIGH);
last_millis = millis();
last_micros = micros();

}

void loop() {

  if (digitalRead(D1) == 1) {

    while (digitalRead(D1) != 0){
      // aguardando mudança de estado da porta digital
    }

    first_micros=micros();
    first_millis=millis();

    if ((first_micros-last_micros) < min_interval) {
      min_interval = (first_micros-last_micros);
    }
    if ((first_millis-last_millis) > max_interval) {
      max_interval = (first_millis-last_millis);
    }

    if (detection==0) {
      detection = 1;
      digitalWrite(2,LOW);
    }
  }
}

```

```

else {
    detection = 0;
    digitalWrite(2,HIGH);
}

count_hour++;
count_total++;
unsigned long Now = millis()/1000;
int Hours = (Now/3600)%25;

last_millis = millis();
last_micros = micros();

if (Hours>last_conn) {

    digitalWrite(2,HIGH);
    last_conn = Hours;
    send_data();
    count_hour = 0;
    last_millis = millis();
    last_micros = micros();
    min_interval = 1000000;
    max_interval = 0;

    if (Hours == 24) {

        ESP.restart();

    }

}

}

}

void send_data(){

    WiFi.forceSleepWake();
    delay(1000);

    while (WiFi.waitForConnectResult() != WL_CONNECTED && retry<6) {

        digitalWrite(16,LOW);
        delay(500);
        digitalWrite(16,HIGH);
        retry++;

    }

    retry=1;

    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {

        digitalWrite(16,LOW);
        wifi_db = WiFi.RSSI();
        vcc = ESP.getVcc();

        WiFiClient client;
        HTTPClient http;
        http.begin(client,link);
        http.addHeader("Content-Type", "application/x-www-form-urlencoded");
        String content = "api_key=" + apiKeyValue + "&last_conn=" + last_conn + "&count_hour=" + count_hour + "&count_total=" +
count_total + "&wifi_db=" + wifi_db + "&vcc=" + vcc + "&max_interval=" + max_interval + "&min_interval=" + min_interval;
        int httpCode = http.POST(content);

```

```

delay(2000);

while (httpCode!=200 && retry<6) {

    digitalWrite(16,HIGH);
    delay(250);
    digitalWrite(16,LOW);
    delay(250);
    digitalWrite(16,HIGH);
    delay(250);
    digitalWrite(16,LOW);
    delay(250);
    digitalWrite(16,HIGH);
    delay(250);
    digitalWrite(16,LOW);
    delay(250);
    digitalWrite(16,HIGH);
    delay(250);
    digitalWrite(16,LOW);
    delay(250);
    int httpCode = http.POST(content);
    retry++;

}

retry=1;
http.end();
while (!Serial);
delay(100);
setupTelnet();
telnet.begin();
first_millis=millis();

while ((millis()-first_millis)<10000 || remote!="Q"){

    telnet.loop();
    digitalWrite(16,HIGH);
    delay(500);
    if (remote=="C") {
        wifi_db=WiFi.RSSI();
        telnet.print(String(wifi_db));
        telnet.println(" dBm");
    }

}

telnet.stop();
delay(1000);

}

WiFi.forceSleepBegin();
delay(1000);
digitalWrite(16,HIGH);

}

```

## APÊNDICE II

### CÓDIGO PHP DO SERVIDOR WEB PARA TRATAMENTO E REGISTRO DOS DADOS ENVIADOS VIA INTERNET (Contém trechos de código de terceiros)

```

<?php

/*
*/

$servername = "ENDEREÇO DO BANCO DE DADOS - MARIADB P.EX.";
$dbname = "NOME DO BANCO DE DADOS PARA CONEXÃO";
$username = "LOGIN DO USUÁRIO";
$password = "SENHA DO USUÁRIO";
$sapi_key_value = "CHAVE DE VALIDAÇÃO PELO PHP";
$sapi_key = $last_conn = $count_hour = $count_total = $wifi_db = $vcc = "";

$conn = mysqli_connect($servername, $username, $password, $dbname);

if (mysqli_connect_errno($conn)){

    echo "Failed to connect to MySQL: " . mysqli_connect_error();

}

else {

    if ($_SERVER["REQUEST_METHOD"] == "POST") {

        $sapi_key = test_input($_POST["api_key"]);

        if ($sapi_key == $sapi_key_value) {

            $last_conn = test_input($_POST["last_conn"]);
            $count_hour = test_input($_POST["count_hour"]);
            $count_total = test_input($_POST["count_total"]);
            $wifi_db = test_input($_POST["wifi_db"]);
            $vcc = test_input($_POST["vcc"]);
            $max_interval = test_input($_POST["max_interval"]);
            $min_interval = test_input($_POST["min_interval"]);

            $sql = "INSERT INTO muon (date_time,last_conn,count_hour,count_total,wifi_db,vcc,max_interval,min_interval) VALUES
(NOW(),".$last_conn."','".$count_hour."','".$count_total."','".$wifi_db."','".$vcc."','".$max_interval."','".$min_interval.")";

            $result = mysqli_query($conn,$sql);

        }

        else {

            echo "Wrong or missing API key!";

        }

    }

    else {

        $sql = "SELECT * FROM muon ORDER BY date_time DESC LIMIT 48";

        if ($result = mysqli_query($conn,$sql)){
    
```

```

$rowcount = mysqli_num_rows($result);

if ($rowcount>0) {

    echo '<html><head><meta http-equiv="refresh" content="900"></head><body bgcolor="black" text="white">
        <center><p><b>Muon Detection System Report V.2.0</b></p><table align="center" border="1">';

    echo '<tr align="center"><th>DATE AND TIME</th><th>UPTIME (h)</th><th>MUON RATE (&mu;/h)</th>
        <th>ACCUMULATED (&mu;)</th><th>RSSI (dBm)</th><th>VCC (mV)</th><th>MAX (ms)</th>
        <th>MIN (&mu;s)</th></tr>';

    while ($row = mysqli_fetch_array($result)) {

        $date_time = $row['date_time'];
        $last_conn = $row['last_conn'];
        $count_hour = $row['count_hour'];
        $count_total = $row['count_total'];
        $wifi_db = $row['wifi_db'];
        $vcc = $row['vcc'];
        $max_interval = $row['max_interval'];
        $min_interval = $row['min_interval'];

        echo '<tr align="center"><td>'.$date_time.'</td><td>'.$last_conn.'</td><td>'.$count_hour.'</td>
            <td>'.$count_total.'</td><td>'.$wifi_db.'</td><td>'.$vcc.'</td><td>'.$max_interval.'</td>
            <td>'.$min_interval.'</td></tr>';

    }

    echo '</table></center></body></html>';

}

else {

    echo "The query returned no data!";

}

}

/* mysqli_free_result($result);
*/
mysqli_close($conn);
exit();

}

function test_input($data) {

    $data = trim($data);
    $data = stripslashes($data);
    $data = htmlspecialchars($data);
    return $data;

}
?>

```

## APÊNDICE III

### 1 - RESULTADO DOS ENSAIOS SEM AMOSTRA EM AMBIENTE COBERTO

DATE AND TIME	UPTIME (h)	MUON RATE ( $\mu$ /h)	ACCUMULATED ( $\mu$ )	RSSI (dBm)	VCC (mV)	MAX (ms)	MIN ( $\mu$ s)
05/01/2022 13:09	19	41	938	-77	3050	250918	794619
05/01/2022 12:09	18	47	897	-68	3050	309920	1000000
05/01/2022 11:09	17	63	850	-71	3050	256708	349706
05/01/2022 10:11	16	54	787	-71	3048	346108	108664
05/01/2022 09:09	15	42	733	-73	3049	261700	1000000
05/01/2022 08:09	14	46	691	-72	3050	319814	187470
05/01/2022 07:10	13	44	645	-72	3050	437587	45
05/01/2022 06:12	12	47	601	-72	3049	277795	1000000
05/01/2022 05:09	11	53	554	-72	3050	316437	1000000
05/01/2022 04:10	10	51	501	-70	3050	254906	1000000
05/01/2022 03:09	9	39	450	-72	3049	298625	1000000
05/01/2022 02:11	8	43	411	-70	3050	491351	1000000
05/01/2022 01:09	7	54	368	-71	3050	218441	1000000
05/01/2022 00:10	6	55	314	-69	3049	524180	77020
04/01/2022 23:09	5	49	259	-69	3050	440524	1000000
04/01/2022 22:09	4	56	210	-75	3048	357626	1000000
04/01/2022 21:09	3	43	154	-74	3050	330375	227353
04/01/2022 20:10	2	60	111	-64	3049	238185	42609
04/01/2022 19:12	1	51	51	-71	3050	510606	1000000

## 2 - RESULTADO DOS ENSAIOS PARA CORPO DE PROVA DE VIDRO+PARAFINA

DATE AND TIME	UPTIME (h)	MUON RATE ( $\mu$ /h)	ACCUMULATED ( $\mu$ )	RSSI (dBm)	VCC (mV)	MAX (ms)	MIN (ms)
26/10/2021 17:21	14	73	1011	-84	3070	161308	1111
26/10/2021 16:21	13	59	938	-83	3070	284427	636
26/10/2021 15:19	12	85	879	-85	3068	177268	128
26/10/2021 14:20	11	71	794	-85	3068	239826	5
26/10/2021 13:20	10	81	723	-86	3069	209951	1027
26/10/2021 12:20	9	81	642	-87	3069	183475	594
26/10/2021 11:20	8	74	561	-87	3066	225039	2099
26/10/2021 10:20	7	76	487				
26/10/2021 09:20	6	62	411	-83	3069	245356	719
26/10/2021 08:20	5	71	349	-80	3070	308865	600
26/10/2021 07:20	4	74	278	-81	3069	215023	1552
26/10/2021 06:20	3	65	204				
26/10/2021 05:20	2	54	139	-81	3074	315527	1009
26/10/2021 04:20	1	85	85	-82	3075	251967	31
26/10/2021 03:19	23	92	1789	-79	3074	177031	92
26/10/2021 02:20	22	70	1697	-84	3074	199478	789
26/10/2021 01:19	21	87	1627	-81	3070	188669	555
26/10/2021 00:19	20	72	1540	-81	3074	336183	7
25/10/2021 23:20	19	77	1468	-86	3074	219483	98
25/10/2021 22:19	18	74	1391	-85	3074	194495	225
25/10/2021 21:19	17	78	1317	-85	3073	208424	414
25/10/2021 20:19	16	68	1239	-83	3074	225774	150
25/10/2021 19:19	15	76	1171	-86	3075	412411	425
25/10/2021 18:20	14	60	1095				
25/10/2021 17:21	13	72	1035	-81	3074	180249	270
25/10/2021 16:21	12	87	963	-86	3072	161100	94
25/10/2021 15:20	11	75	876	-83	3068	270211	938
25/10/2021 14:20	10	72	801	-83	3074	195962	367
25/10/2021 13:20	9	86	729	-83	3069	241546	1356
25/10/2021 12:20	8	74	643	-83	3069	254459	494
25/10/2021 11:20	7	81	569	-82	3069	241543	635
25/10/2021 10:21	6	93	488	-80	3072	157735	937
25/10/2021 09:19	5	92	395	-82	3072	243956	1
25/10/2021 08:20	4	74	303	-79	3072	221989	719
25/10/2021 07:21	3	71	229	-85	3074	343922	343
25/10/2021 06:20	2	74	158	-79	3073	278352	257
25/10/2021 05:20	1	84	84	-79	3070	187483	254
25/10/2021 04:19	23	86	1770	-79	3069	197147	376
25/10/2021 03:19	22	68	1684	-79	3075	213691	2006
25/10/2021 02:19	21	63	1616	-77	3074	265344	84
25/10/2021 01:19	20	72	1553	-79	3074	218922	241
25/10/2021 00:19	19	71	1481	-77	3070	276815	378
24/10/2021 23:20	18	94	1410	-80	3074	207622	552
24/10/2021 22:21	17	57	1316	-82	3074	332974	1175
24/10/2021 19:19	14	67	1103	-79	3068	190268	1685
24/10/2021 18:19	13	88	1036	-80	3070	246787	214
24/10/2021 17:19	12	86	948	-79	3070	309923	543
24/10/2021 16:19	11	97	862	-83	3068	200279	25
24/10/2021 15:19	10	72	765	-81	3069	193277	1061
24/10/2021 14:19	9	78	693	-79	3069	348697	163
24/10/2021 13:20	8	74	615	-84	3069	222924	926
24/10/2021 12:19	7	79	541	-81	3068	249949	1291
24/10/2021 11:18	6	86	462				
24/10/2021 10:20	5	67	376	-80	3069	281561	274
24/10/2021 09:20	4	85	309	-85	3069	288309	271
24/10/2021 08:19	3	74	224	-81	3040	201784	220
24/10/2021 05:18	23	85	1752	-81	3070	161348	422
24/10/2021 04:19	22	94	1667	-80	3069	194318	138
24/10/2021 03:18	21	75	1573	-77	3070	203664	66
24/10/2021 02:21	20	88	1498	-80	3070	249198	780
24/10/2021 01:18	19	62	1410	-80	3072	223451	575
24/10/2021 00:21	18	74	1348	-83	3072	219465	2653
23/10/2021 23:20	17	81	1274	-80	3072	389116	68
23/10/2021 22:19	16	94	1193				
23/10/2021 21:19	15	72	1099	-82	3072	200141	293
23/10/2021 20:18	14	76	1027	-87	3069	157455	2525
23/10/2021 19:18	13	67	951				
23/10/2021 18:19	12	85	884	-85	3069	167765	176
23/10/2021 17:19	11	67	799	-81	3069	322811	895
23/10/2021 16:18	10	68	732	-86	3067	233261	566
23/10/2021 15:18	9	77	664	-84	3068	210990	415
23/10/2021 14:18	8	76	587	-80	3068	195279	395

23/10/2021 13:18	7	77	511	-82	3068	171412	314
23/10/2021 12:19	6	78	434	-80	3067	300129	1292
23/10/2021 11:18	5	69	356	-85	3069	191632	176
23/10/2021 10:20	4	62	287	-83	3069	268934	448
23/10/2021 09:19	3	63	225	-81	3069	258260	383
23/10/2021 08:18	2	70	162	-82	3064	227806	1739
23/10/2021 07:19	1	92	92	-84	3074	242629	172
22/10/2021 17:17	23	61	1729	-87	3075	226343	1439
22/10/2021 16:17	22	88	1668	-85	3072	161250	83
22/10/2021 15:17	21	68	1580	-87	3070	230995	349
22/10/2021 14:17	20	73	1512	-86	3070	165598	2256
22/10/2021 13:20	19	78	1439	-86	3070	265127	91
22/10/2021 12:17	18	86	1361	-87	3069	165737	344
22/10/2021 11:17	17	68	1275	-86	3069	255628	917
22/10/2021 10:17	16	63	1207	-87	3069	338433	249
22/10/2021 09:18	15	74	1144	-87	3069	210978	16
22/10/2021 08:18	14	72	1070	-86	3066	242964	1439
22/10/2021 07:18	13	75	998	-83	3072	196588	321
22/10/2021 06:19	12	81	923	-83	3074	220204	363
22/10/2021 05:17	11	71	842	-80	3075	248351	553
22/10/2021 04:18	10	70	771	-83	3074	219226	184
22/10/2021 03:17	9	78	701	-79	3074	253441	81
22/10/2021 02:18	8	91	623	-81	3074	205089	60
22/10/2021 01:18	7	76	532	-81	3075	206324	1210
22/10/2021 00:17	6	79	456	-85	3075	204814	218
21/10/2021 23:18	5	80	377	-79	3075	193023	812
21/10/2021 22:17	4	83	297	-83	3074	257454	340
21/10/2021 21:19	3	60	214	-82	3074	259162	1412
21/10/2021 20:18	2	78	154	-88	3074	219617	2872
21/10/2021 19:17	1	76	76	-87	3074	223978	53
20/10/2021 03:34	9	77	673	-81	3052	255334	326
20/10/2021 02:35	8	72	596	-81	3051	222629	1501
20/10/2021 01:34	7	69	524	-82	3053	162107	1722
20/10/2021 00:35	6	65	455	-85	3052	284879	2906
19/10/2021 23:35	5	66	390	-84	3051	206682	644
19/10/2021 22:34	4	91	324	-80	3052	190255	945
19/10/2021 21:33	3	64	233	-83	3052	223551	319
19/10/2021 20:33	2	87	169				
19/10/2021 19:34	1	82	82	-87	3051	369779	499

## 3 - RESULTADO DOS ENSAIOS PARA CORPO DE PROVA DE VIDRO+ASFALTO

DATE AND TIME	UPTIME (h)	MUON RATE ( $\mu$ /h)	ACCUMULATED ( $\mu$ )	RSSI (dBm)	VCC (mV)	MAX (ms)	MIN (ms)
20/12/2021 18:47	8	74	625	-85	3050	264422	1000000
20/12/2021 17:43	7	77	551	-82	3050	199331	479307
20/12/2021 16:44	6	76	474	-81	3051	205742	1000000
20/12/2021 15:45	5	81	398	-84	3050	163658	2764
20/12/2021 14:44	4	80	317	-82	3049	186758	755682
20/12/2021 13:45	3	80	237	-83	3050	173938	14260
20/12/2021 12:46	2	89	157				
20/12/2021 11:44	1	68	68	-78	3049	215610	190722
20/12/2021 10:43	24	74	1804	-83	3049	174672	437971
20/12/2021 09:42	23	72	1730	-82	3050	195636	628617
20/12/2021 08:43	22	62	1658	-82	3050	325501	150583
20/12/2021 07:43	21	74	1596	-83	3053	216983	843549
20/12/2021 06:43	20	81	1522	-83	3051	350548	158306
20/12/2021 05:44	19	85	1441	-82	3054	218627	164882
20/12/2021 04:43	18	82	1356	-78	3055	183754	1000000
20/12/2021 03:43	17	69	1274	-78	3055	178485	818763
20/12/2021 02:44	16	76	1205	-79	3051	191278	101198
20/12/2021 01:43	15	78	1129	-80	3054	218259	227912
20/12/2021 00:43	14	78	1051	-79	3053	254603	95718
19/12/2021 23:44	13	74	973	-80	3054	244471	698968
19/12/2021 22:43	12	76	899	-78	3051	211373	1000000
19/12/2021 21:43	11	67	823	-84	3053	475918	1000000
19/12/2021 20:44	10	73	756	-81	3053	247945	1000000
19/12/2021 19:43	9	83	683	-84	3051	267682	345967
19/12/2021 18:43	8	93	600	-84	3051	150259	333168
19/12/2021 17:43	7	67	507	-81	3049	373401	17309
19/12/2021 16:43	6	68	440	-82	3050	240440	314137
19/12/2021 15:43	5	90	372	-80	3049	196785	34940
19/12/2021 14:43	4	62	282	-85	3050	229346	890505
19/12/2021 13:44	3	77	220	-84	3045	199874	220136
19/12/2021 12:43	2	73	143	-81	3049	243996	1000000
19/12/2021 11:43	1	70	70	-82	3050	270501	825008
19/12/2021 10:42	24	82	1840	-84	3050	193927	1000000
19/12/2021 09:42	23	68	1758	-83	3050	256402	1000000
19/12/2021 08:42	22	83	1690	-83	3050	203496	772166
19/12/2021 07:42	21	77	1607	-82	3050	189544	944624
19/12/2021 06:43	20	65	1530	-81	3052	186037	344926
19/12/2021 05:43	19	89	1465	-78	3053	199349	190821
19/12/2021 04:43	18	68	1376	-79	3054	251943	903069
19/12/2021 03:45	17	77	1308	-81	3054	284533	64243
19/12/2021 02:44	16	84	1231	-79	3054	249080	771835
19/12/2021 01:43	15	87	1147	-79	3052	177705	130801
19/12/2021 00:44	14	83	1060	-84	3052	198404	156637
18/12/2021 23:43	13	62	977	-83	3052	290372	1000000
18/12/2021 22:42	12	79	915	-81	3053	390145	477079
18/12/2021 21:42	11	66	836	-83	3054	269804	1000000
18/12/2021 20:42	10	82	770	-84	3053	162653	1000000
18/12/2021 19:43	9	85	688	-83	3051	172038	1000000
18/12/2021 18:42	8	78	603	-83	3049	172836	1000000
18/12/2021 17:43	7	78	525	-83	3050	213343	464651
18/12/2021 16:42	6	75	447	-82	3050	239119	186553
18/12/2021 15:42	5	70	372	-80	3046	311146	1000000
18/12/2021 14:42	4	79	302	-82	3049	192187	979427
18/12/2021 13:43	3	79	223	-78	3045	165529	367521
18/12/2021 12:42	2	75	144	-81	3044	277443	120179
18/12/2021 11:42	1	69	69	-80	3050	243607	1000000
18/12/2021 10:42	24	72	1771	-84	3046	269399	777583
18/12/2021 09:39	23	72	1699	-83	3050	221791	1000000
18/12/2021 08:38	22	51	1627	-79	3048	215997	163391
18/12/2021 07:41	21	90	1576	-83	3050	286745	53515
18/12/2021 06:37	20	60	1486	-83	3052	239443	46083
18/12/2021 05:38	19	83	1426	-78	3054	180195	787816
18/12/2021 04:38	18	64	1343	-79	3051	209259	196699
18/12/2021 03:42	17	85	1279	-83	3054	258367	696146
18/12/2021 02:38	16	70	1194	-84	3053	280224	1000000
18/12/2021 01:38	15	70	1124	-84	3053	209970	595044
18/12/2021 00:39	14	71	1054	-84	3052	253331	329829
17/12/2021 23:38	13	76	983	-85	3050	221469	1000000
17/12/2021 22:40	12	80	907	-85	3053	267420	1000000
17/12/2021 21:38	11	86	827	-77	3052	213537	246165
17/12/2021 20:38	10	78	741	-83	3051	273096	853977
17/12/2021 19:38	9	72	663	-80	3052	196717	182755

17/12/2021 18:38	8	86	591	-79	3051	142439	422197
17/12/2021 17:37	7	82	505	-79	3051	159249	130636
17/12/2021 16:38	6	66	423	-80	3050	269510	145383
17/12/2021 15:37	5	81	357	-80	3051	171912	355910
17/12/2021 14:38	4	70	276	-83	3046	218286	509164
17/12/2021 13:39	3	64	206	-79	3049	361081	356914
17/12/2021 12:38	2	82	142	-78	3043	238171	772405
17/12/2021 11:37	1	60	60	-78	3041	339158	6969
31/10/2021 07:27	17	75	1299	-84	3073	365400	772
31/10/2021 06:26	16	67	1224	-82	3074	234459	2427
31/10/2021 05:26	15	78	1157	-83	3074	196152	145
31/10/2021 03:25	13	80	1004	-85	3074	221750	1453
31/10/2021 02:26	12	70	924	-83	3074	268457	367
31/10/2021 01:25	11	75	854	-85	3074	187089	158
30/10/2021 23:26	9	67	702	-85	3074	196259	122
30/10/2021 22:25	8	63	635	-86	3075	313737	300
30/10/2021 21:25	7	80	572	-85	3074	226880	362
30/10/2021 20:26	6	68	492	-87	3074	331296	451
30/10/2021 19:29	5	78	424	-88	3073	250057	1368
30/10/2021 18:26	4	92	346	-86	3073	262269	332
30/10/2021 17:25	3	88	254	-87	3072	180089	73
30/10/2021 15:25	1	83	83	-80	3074	256035	77
30/10/2021 13:24	22	77	1670	-87	3069	163760	3
30/10/2021 12:24	21	80	1593	-86	3069	219533	280
30/10/2021 11:24	20	79	1513	-81	3069	272071	202
30/10/2021 10:24	19	69	1434	-86	3069	266255	477
30/10/2021 09:25	18	74	1365	-84	3069	248560	1121
30/10/2021 08:23	17	87	1291	-83	3070	167656	357
30/10/2021 07:23	16	94	1204	-82	3072	167206	279
30/10/2021 06:24	15	68	1110	-79	3073	355719	53
30/10/2021 05:24	14	62	1042	-80	3074	241053	348
30/10/2021 04:25	13	81	980	-80	3078	223805	442
30/10/2021 03:24	12	76	899	-85	3075	147713	1683
30/10/2021 02:23	11	66	823	-81	3074	235804	318
30/10/2021 01:24	10	71	757	-81	3074	207232	1872
30/10/2021 00:24	9	92	686	-81	3074	149104	295
29/10/2021 23:23	8	89	594	-86	3074	186541	16
29/10/2021 22:23	7	73	505	-82	3074	204339	1045
29/10/2021 21:25	6	72	432	-83	3074	289825	47
29/10/2021 20:27	5	66	360				
29/10/2021 19:26	4	74	294	-85	3074	252526	501
29/10/2021 18:25	3	74	220	-85	3073	244957	208
29/10/2021 17:25	2	75	146	-83	3073	284173	1313
29/10/2021 16:23	1	71	71	-80	3070	264831	271
29/10/2021 15:23	23	89	1820	-85	3075	137295	1896
29/10/2021 14:24	22	76	1731	-84	3072	203503	575
29/10/2021 11:25	19	88	1507	-84	3070	241490	29
29/10/2021 09:24	17	79	1351	-84	3070	269721	545
29/10/2021 08:23	16	68	1272	-85	3070	199364	1461
29/10/2021 07:23	15	91	1204	-82	3073	194803	501
29/10/2021 06:22	14	78	1113	-84	3077	307435	1
29/10/2021 05:23	13	78	1035	-83	3073	173310	1109
29/10/2021 04:24	12	76	957	-82	3073	238539	797
29/10/2021 03:22	11	76	881	-79	3074	193597	2072
29/10/2021 02:23	10	81	805	-86	3072	222830	15
29/10/2021 01:23	9	71	724	-83	3074	384292	1049
29/10/2021 00:23	8	94	653				
28/10/2021 23:24	7	92	559	-82	3072	150251	230
28/10/2021 22:23	6	83	467	-79	3072	226997	156
28/10/2021 21:22	5	68	384	-81	3074	212876	220
28/10/2021 20:23	4	78	316	-80	3074	174491	879
28/10/2021 19:23	3	78	238	-83	3073	229053	210
28/10/2021 18:22	2	70	160	-83	3072	165315	122
28/10/2021 17:25	1	90	90	-85	3074	183030	536
28/10/2021 16:22	23	59	1786	-89	3072	330354	381
28/10/2021 15:22	22	67	1727	-87	3069	201062	59
28/10/2021 14:23	21	82	1660	-89	3070	188024	427
28/10/2021 13:23	20	48	1578	-87	3069	219905	1909
28/10/2021 12:26	19	57	1530	-89	3068	293579	24
28/10/2021 11:21	18	77	1473	-83	3067	155767	318
28/10/2021 10:21	17	84	1396	-85	3069	276744	126
28/10/2021 09:25	16	77	1312	-85	3074	250543	600
28/10/2021 08:23	15	97	1235	-87	3072	163592	391
28/10/2021 07:23	14	88	1138	-83	3073	177283	287
28/10/2021 06:21	13	80	1050	-82	3074	329161	496
28/10/2021 05:22	12	90	970	-83	3074	268338	184
28/10/2021 04:23	11	64	880	-85	3074	339675	1165

28/10/2021 03:21	10	78	816	-85	3072	222850	1152
28/10/2021 02:22	9	94	738	-85	3074	197881	390
28/10/2021 01:22	8	80	644	-86	3073	222281	19
28/10/2021 00:22	7	81	564	-86	3074	240259	299
27/10/2021 23:22	6	81	483				
27/10/2021 22:22	5	75	402	-89	3074	283624	489
27/10/2021 21:21	4	85	327	-86	3063	221761	45
27/10/2021 20:22	3	83	242	-86	3072	140691	507
27/10/2021 19:23	2	69	159				
27/10/2021 18:22	1	90	90	-89	3073	170286	549

## 4 - RESULTADO DOS ENSAIOS PARA CORPO DE PROVA DE VIDRO+AR

DATE AND TIME	UPTIME (h)	MUON RATE ( $\mu$ /h)	ACCUMULATED ( $\mu$ )	RSSI (dBm)	VCC (mV)	MAX (ms)	MIN ( $\mu$ s/ms)
16/12/2021 04:18	6	74	421	-74	3049	213606	516445
16/12/2021 03:18	5	58	347	-76	3050	310241	228924
16/12/2021 02:21	4	80	289	-76	3050	207977	504746
16/12/2021 01:18	3	71	209	-75	3050	180135	75457
16/12/2021 00:17	2	77	138	-76	3050	188233	296508
15/12/2021 23:17	1	61	61	-81	3050	303858	1000000
15/12/2021 22:17	24	68	1838	-76	3050	291990	307613
15/12/2021 21:17	23	63	1770	-83	3050	231069	636053
15/12/2021 20:17	22	88	1707	-79	3050	228010	898148
15/12/2021 19:17	21	91	1619	-83	3050	214782	127715
15/12/2021 18:19	20	82	1528	-78	3050	200823	1000000
15/12/2021 17:17	19	70	1446	-82	3046	156466	805844
15/12/2021 16:18	18	63	1376	-84	3044	251172	1000000
15/12/2021 15:17	17	76	1313	-83	3041	143521	70416
15/12/2021 14:17	16	80	1237	-84	3041	248450	4399
15/12/2021 13:18	15	74	1157	-84	3041	248965	668329
15/12/2021 12:18	14	77	1083	-78	3041	264602	1000000
15/12/2021 11:17	13	71	1006	-77	3041	198857	1000000
15/12/2021 10:17	12	81	935	-80	3041	204314	253961
15/12/2021 09:18	11	66	854	-75	3041	263396	401070
15/12/2021 08:17	10	80	788	-76	3049	200118	1000000
15/12/2021 07:17	9	77	708	-78	3050	179820	239651
15/12/2021 06:17	8	62	631	-74	3050	303585	424479
15/12/2021 05:18	7	81	569	-74	3051	167401	97072
15/12/2021 04:17	6	71	488	-78	3050	283770	116183
15/12/2021 03:17	5	80	417	-82	3050	163313	441441
15/12/2021 02:17	4	97	337	-78	3051	219486	254024
15/12/2021 01:18	3	83	240	-82	3051	208831	554159
15/12/2021 00:18	2	87	157	-78	3051	271610	470382
14/12/2021 23:17	1	70	70	-77	3050	299703	198338
14/12/2021 22:16	1	74	74	-84	3050	161369	35614
14/12/2021 21:15	24	70	1741	-79	3051	204993	805769
14/12/2021 20:17	23	79	1671	-83	3050	270040	1000000
14/12/2021 19:16	22	70	1592	-77	3050	190301	264996
14/12/2021 18:15	21	85	1522	-79	3044	173881	860175
14/12/2021 17:15	20	74	1437	-80	3050	173545	24821
14/12/2021 16:16	19	59	1363	-82	3042	242221	1000000
14/12/2021 15:18	18	54	1304	-78	3041	279999	788672
14/12/2021 14:16	17	77	1250	-83	3041	192625	907321
14/12/2021 13:15	16	72	1173	-83	3041	245947	224284
14/12/2021 12:16	15	89	1101	-82	3041	191738	469313
14/12/2021 11:15	14	70	1012	-83	3041	245374	657020
14/12/2021 10:16	13	74	942	-82	3041	201574	261072
14/12/2021 09:15	12	84	868	-77	3046	189492	230928
14/12/2021 08:15	11	72	784	-84	3048	275171	382783
14/12/2021 07:15	10	88	712	-80	3050	182295	93472
14/12/2021 06:15	9	74	624	-77	3051	169080	1000000
14/12/2021 05:16	8	79	550	-81	3051	312684	934413
14/12/2021 04:15	7	70	471	-78	3051	350095	764999
14/12/2021 03:15	6	74	401	-81	3052	219128	522482
14/12/2021 02:15	5	47	327	-79	3050	418374	945400
14/12/2021 01:15	4	64	280	-77	3052	212849	776738
14/12/2021 00:15	3	70	216	-78	3051	175514	838225
13/12/2021 23:15	2	69	146	-83	3049	269714	48055
13/12/2021 22:17	1	77	77	-76	3050	265206	342577
13/12/2021 21:14	24	70	1848	-79	3050	243164	25858
13/12/2021 20:14	23	72	1778	-78	3050	170456	138349
13/12/2021 19:15	22	79	1706	-85	3051	344451	545435
13/12/2021 18:17	21	89	1627	-85	3042	254523	495342
13/12/2021 17:14	20	98	1538	-83	3046	196280	933157
13/12/2021 16:15	19	76	1440	-79	3048	342360	796792
13/12/2021 15:14	18	62	1364	-83	3046	300063	1000000
13/12/2021 14:16	17	90	1302	-83	3041	123308	286751
13/12/2021 13:14	16	76	1212	-83	3041	213285	855873
13/12/2021 12:14	15	72	1136	-78	3042	351552	283397
13/12/2021 11:15	14	66	1064	-83	3042	342686	1000000
13/12/2021 10:14	13	80	998	-83	3042	128165	1000000
13/12/2021 09:14	12	88	918	-78	3050	186699	440877
13/12/2021 08:15	11	90	830	-81	3050	234733	89384
13/12/2021 07:14	10	65	740	-80	3051	246395	98728
13/12/2021 06:14	9	84	675	-85	3052	208552	319517
13/12/2021 05:14	8	64	591	-79	3051	233040	514307
13/12/2021 04:16	7	73	527	-79	3051	236835	576414
13/12/2021 03:14	6	72	454	-79	3052	255225	677385
13/12/2021 02:14	5	83	382	-80	3052	189919	1000000
13/12/2021 00:14	3	69	217	-79	3051	252909	389091
12/12/2021 23:15	2	71	148	-84	3052	191096	946352

12/12/2021 22:15	1	77	77	-82	3050	160777	1000000
04/11/2021 03:42	15	82	1218	-85	3074	215423	1376
04/11/2021 02:47	14	70	1136	-87	3074	268857	632
04/11/2021 01:41	13	79	1066	-86	3076	162115	386
04/11/2021 00:41	12	83	987	-86	3073	221570	130
03/11/2021 23:42	11	84	904				
03/11/2021 22:40	10	68	820	-86	3074	266172	817
03/11/2021 21:41	9	92	752	-81	3072	136716	628
03/11/2021 20:42	8	88	660	-81	3072	185630	203
03/11/2021 19:41	7	94	572	-82	3074	211400	617
03/11/2021 18:41	6	94	478	-85	3072	175205	864
03/11/2021 17:41	5	80	384	-85	3072	145337	162
03/11/2021 16:41	4	75	304	-85	3069	208820	131
03/11/2021 15:41	3	85	229	-82	3074	228273	260
03/11/2021 14:40	2	79	144	-86	3069	203066	1300
03/11/2021 13:41	1	65	65	-87	3070	195548	3308
03/11/2021 12:40	23	66	1819	-80	3069	245242	1607
03/11/2021 11:40	22	80	1753	-86	3069	212278	313
03/11/2021 10:40	21	71	1673	-85	3070	243357	554
03/11/2021 09:41	20	65	1602	-81	3069	308959	444
03/11/2021 07:41	18	90	1457	-82	3070	181467	302
03/11/2021 06:40	17	62	1367	-81	3073	386804	1551
03/11/2021 05:42	16	77	1305	-86	3074	221999	1045
03/11/2021 04:40	15	76	1228	-82	3075	170946	285
03/11/2021 03:40	14	84	1152	-84	3074	216109	1239
03/11/2021 02:42	13	88	1068	-83	3073	188788	480
03/11/2021 01:40	12	89	980	-87	3074	174713	315
03/11/2021 00:40	11	79	891	-85	3075	216203	52
02/11/2021 23:41	10	78	812	-85	3075	180673	324
02/11/2021 22:41	9	89	734	-84	3074	287618	7
02/11/2021 21:40	8	85	645	-84	3072	218151	127
02/11/2021 20:41	7	77	560	-86	3072	247760	277
02/11/2021 19:42	6	73	483	-85	3072	206646	487
02/11/2021 18:41	5	88	410	-81	3070	123459	81
02/11/2021 17:40	4	75	322	-87	3072	201405	138
02/11/2021 16:40	3	74	247	-88	3070	287799	1474
02/11/2021 15:41	2	82	173	-85	3069	229553	78
02/11/2021 14:40	1	91	91	-80	3070	269382	129
02/11/2021 13:40	23	85	1843	-83	3070	195767	1372
02/11/2021 12:39	22	68	1758	-82	3069	312834	402
02/11/2021 11:39	21	66	1690	-87	3070	251963	471
02/11/2021 10:39	20	74	1624	-85	3069	222504	837
02/11/2021 09:40	19	81	1550	-86	3069	217757	317
02/11/2021 08:40	18	79	1469	-77	3070	203348	42
02/11/2021 07:40	17	96	1390				
02/11/2021 06:39	16	78	1294	-83	3074	321402	180
02/11/2021 05:39	15	86	1216	-86	3075	179622	474
02/11/2021 04:39	14	90	1130	-83	3074	156801	393
02/11/2021 03:39	13	89	1040	-85	3075	232833	94
02/11/2021 02:39	12	75	951	-81	3075	229033	2092
02/11/2021 01:40	11	95	876	-86	3073	279139	388
02/11/2021 00:40	10	72	781	-82	3074	230149	259
01/11/2021 23:40	9	86	709	-85	3074	144647	211
01/11/2021 22:40	8	89	623	-87	3074	174088	511
01/11/2021 21:41	7	80	534				
01/11/2021 20:41	6	59	454	-86	3074	256544	310
01/11/2021 19:40	5	91	395	-87	3074	246738	554
01/11/2021 18:39	4	68	304	-88	3074	175259	583

## 5 - RESULTADO DOS ENSAIOS PARA CORPO DE PROVA DE VIDRO+ÁGUA

DATE AND TIME	UPTIME (h)	MUON RATE ( $\mu$ /h)	ACCUMULATED ( $\mu$ )	RSSI (dBm)	VCC (mV)	MAX (ms)	MIN ( $\mu$ s/ms)
13/01/2022 19:02	2	73	95	-90	3045	267108	133673
13/01/2022 13:59	21	77	1455	-92	3038	153896	1000000
13/01/2022 12:56	20	64	1378	-94	3044	234960	31608
13/01/2022 11:58	19	75	1314	-91	3042	255649	586329
13/01/2022 10:56	18	59	1239	-93	3042	271599	1000000
13/01/2022 09:56	17	68	1180	-88	3042	212846	1000000
13/01/2022 08:56	16	70	1112	-86	3048	197221	359069
13/01/2022 07:56	15	72	1042	-89	3050	223595	151807
13/01/2022 06:56	14	86	970	-89	3050	155750	691571
13/01/2022 05:56	13	88	884	-83	3051	198754	76265
13/01/2022 04:56	12	63	796	-83	3051	243182	121437
13/01/2022 03:58	11	64	733	-86	3051	193612	1000000
13/01/2022 02:56	10	75	669	-84	3051	232218	239492
13/01/2022 01:55	9	71	594				
13/01/2022 00:56	8	67	523	-91	3051	250568	420009
12/01/2022 23:57	7	77	456	-88	3050	185258	150209
12/01/2022 22:56	6	77	379	-90	3050	195759	20472
12/01/2022 17:58	1	61	61	-89	3044	262339	341533
12/01/2022 16:55	1	57	57	-89	3049	235715	577110
12/01/2022 13:52	22	63	1587	-88	3044	265237	1000000
12/01/2022 12:54	21	77	1524	-83	3048	272651	871505
12/01/2022 08:53	17	69	1239	-86	3046	253856	499893
12/01/2022 07:53	16	71	1170	-84	3050	193869	821082
12/01/2022 06:52	15	65	1099	-84	3051	184890	280741
12/01/2022 05:52	14	59	1034	-85	3051	169301	1000000
12/01/2022 04:52	13	64	975	-82	3053	169840	1000000
12/01/2022 03:52	12	93	911	-85	3053	407093	333910
12/01/2022 02:53	11	79	818	-83	3052	212224	605761
12/01/2022 01:52	10	84	739	-86	3051	305870	1000000
12/01/2022 00:52	9	81	655	-86	3053	291628	1000000
11/01/2022 23:53	8	83	574	-87	3051	149094	512933
11/01/2022 22:57	7	83	491	-86	3048	273004	432117
11/01/2022 19:56	4	77	265	-89	3048	162614	86544
11/01/2022 18:53	3	72	188	-87	3053	233122	784893
11/01/2022 17:52	2	64	116	-82	3051	286713	5760
11/01/2022 16:53	1	52	52	-85	3051	288810	1000000
11/01/2022 15:51	1	73	73	-84	3052	221359	34907
11/01/2022 14:51	24	74	1715	-88	3045	280554	27473
11/01/2022 13:51	23	77	1641	-88	3045	155308	356279
11/01/2022 12:52	22	70	1564	-89	3048	263487	1000000
11/01/2022 11:50	21	77	1494	-83	3049	217913	156355
11/01/2022 10:53	20	74	1417	-87	3046	222330	189891
11/01/2022 09:50	19	68	1343	-83	3050	345984	643689
11/01/2022 08:50	18	75	1275	-83	3050	151831	171435
11/01/2022 07:51	17	54	1200	-85	3051	252788	1000000
11/01/2022 06:50	16	75	1146	-81	3053	229509	185969
11/01/2022 05:50	15	62	1071	-82	3054	315482	753866
11/01/2022 04:50	14	68	1009	-83	3053	311587	130827
11/01/2022 03:50	13	89	941	-82	3053	242840	254105
11/01/2022 02:50	12	61	852	-84	3053	320629	1000000
11/01/2022 01:50	11	62	791	-82	3052	179372	1000000
11/01/2022 00:50	10	81	729	-87	3053	309718	236687
10/01/2022 23:50	9	87	648	-84	3052	135978	374497
10/01/2022 22:52	8	75	561	-86	3052	214793	1000000
10/01/2022 21:53	7	58	486	-87	3051	276249	1000000
10/01/2022 20:50	6	81	428	-90	3052	172743	712670
10/01/2022 19:52	5	60	347	-85	3051	282886	107591
10/01/2022 18:50	4	77	287	-87	3050	290721	690241
10/01/2022 17:51	3	68	210	-89	3051	227845	52427
10/01/2022 16:51	2	75	142	-88	3050	199402	41322
10/01/2022 15:50	1	67	67	-87	3050	236069	1000000
12/12/2021 06:05	21	74	1559	-77	3053	170435	197261
12/12/2021 05:05	20	73	1485	-78	3051	239366	319108
12/12/2021 04:04	19	74	1412	-76	3054	267220	480704
12/12/2021 03:06	18	72	1338	-78	3051	349970	385935
12/12/2021 02:06	17	81	1266	-77	3052	233981	126609
12/12/2021 01:04	16	64	1185	-82	3051	281588	241565
12/12/2021 00:04	15	88	1121	-79	3045	165233	342608
11/12/2021 23:04	14	77	1033	-78	3053	334692	110602
11/12/2021 22:04	13	82	956	-79	3051	212919	597404
11/12/2021 21:04	12	77	874	-79	3052	360158	149409
11/12/2021 20:04	11	96	797	-80	3051	193489	261028
11/12/2021 19:04	10	67	701	-78	3050	207979	1000000
11/12/2021 18:05	9	66	634	-79	3052	190195	1000000
11/12/2021 17:05	8	69	568	-81	3049	196114	112223

11/12/2021 16:04	7	85	499	-80	3050	209051	1000000
11/12/2021 15:04	6	65	414				
11/12/2021 14:04	5	72	349	-85	3046	250836	1000000
11/12/2021 13:05	4	66	277	-79	3049	253008	385898
11/12/2021 12:04	3	69	211	-81	3048	249594	974033
11/12/2021 11:04	2	72	142	-82	3046	183607	182922
11/12/2021 10:06	1	70	70	-77	3049	210481	419892
11/12/2021 09:03	24	65	1804	-80	3048	289015	118787
11/12/2021 08:02	23	75	1739	-80	3050	227658	351482
11/12/2021 07:05	22	84	1664	-83	3054	194806	139582
11/12/2021 06:02	21	79	1580	-81	3053	174674	88710
11/12/2021 05:02	20	86	1501	-79	3054	197372	1000000
11/12/2021 04:02	19	86	1415	-83	3052	162192	448637
11/12/2021 03:02	18	73	1329	-80	3053	263862	851140
11/12/2021 02:02	17	76	1256	-77	3054	206585	210871
11/12/2021 01:02	16	74	1180	-80	3045	171727	917748
11/12/2021 00:02	15	62	1106	-79	3054	249677	619430
10/12/2021 23:04	14	80	1044	-85	3052	301268	235775
10/12/2021 22:02	13	73	964	-83	3052	215304	390878
10/12/2021 21:04	12	85	891	-83	3052	236399	215802
10/12/2021 20:02	11	74	806	-78	3051	220450	677983
10/12/2021 19:02	10	80	732	-81	3052	139315	223868
10/12/2021 18:02	9	77	652	-80	3050	217831	43553
10/12/2021 17:02	8	63	575	-80	3051	255256	1000000
10/12/2021 16:02	7	75	512	-80	3050	233977	145988
10/12/2021 15:04	6	78	437	-85	3049	172568	419966
10/12/2021 14:02	5	94	359	-80	3048	284302	529233
10/12/2021 13:02	4	64	265	-84	3046	214311	1000000
10/12/2021 12:04	3	67	201	-82	3050	294289	1000000
10/12/2021 11:02	2	69	134	-83	3050	197862	1000000
10/12/2021 10:02	1	65	65	-82	3049	268630	155565
10/12/2021 09:00	24	81	1821	-81	3052	227235	253191
10/12/2021 08:00	23	73	1740	-77	3054	183557	600000
10/12/2021 07:00	22	71	1667	-78	3052	236700	237995
10/12/2021 06:00	21	66	1596	-79	3057	350969	600000
10/12/2021 05:00	20	83	1530	-83	3058	216596	600000
10/12/2021 04:00	19	73	1447	-80	3054	210276	600000
10/12/2021 03:03	18	87	1374	-80	3054	236142	262399
10/12/2021 02:00	17	65	1287	-78	3053	264418	143417
10/12/2021 00:59	16	67	1222	-76	3056	286144	154792
10/12/2021 00:00	15	89	1155	-81	3053	169006	276349
09/12/2021 23:03	14	68	1066	-80	3056	307585	381235
09/12/2021 22:00	13	94	998	-85	3055	191519	57265
09/12/2021 21:00	12	81	904	-82	3054	265124	600000
09/12/2021 20:00	11	70	823	-82	3055	229317	600000
09/12/2021 19:02	10	82	753	-79	3054	231913	551289
09/12/2021 18:01	9	73	671	-80	3054	285961	92320
09/12/2021 17:00	8	68	598	-84	3053	206492	541381
09/12/2021 16:00	7	72	530	-81	3053	207731	513217
09/12/2021 15:01	6	68	458	-80	3051	190491	600000
09/12/2021 14:01	5	79	390	-79	3051	235519	495116
09/12/2021 13:00	4	71	311	-79	3053	201748	600000
09/12/2021 12:00	3	75	240	-83	3046	297457	600000
09/12/2021 11:01	2	73	165	-80	3051	214809	600000
09/12/2021 09:59	1	92	92	-79	3052	146172	600000

## 6 - RESULTADO DOS ENSAIOS PARA CORPO DE PROVA DE AÇO+AR

DATE AND TIME	UPTIME (h)	MUON RATE ( $\mu$ /h)	ACCUMULATED ( $\mu$ )	RSSI (dBm)	VCC (mV)	MAX (ms)	MIN (ms)
02/01/2022 00:38	5	63	341	-86	3054	218142	275714
01/01/2022 23:38	4	69	278	-87	3051	263582	279980
01/01/2022 22:38	3	62	209	-84	3050	239040	913986
01/01/2022 21:39	2	69	147	-85	3050	228963	1000000
01/01/2022 20:38	1	78	78	-85	3051	220772	182263
01/01/2022 19:37	24	69	1707	-89	3050	348669	455374
01/01/2022 18:37	23	72	1638	-86	3048	368337	213983
01/01/2022 17:36	22	58	1566	-87	3049	371001	1000000
01/01/2022 16:37	21	66	1508	-86	3043	151844	1000000
01/01/2022 15:37	20	73	1442	-86	3043	220423	105686
01/01/2022 14:38	19	79	1369	-86	3041	228784	101132
01/01/2022 13:37	18	65	1290	-84	3046	316183	56545
01/01/2022 12:36	17	74	1225	-88	3046	201211	80162
01/01/2022 11:35	16	66	1151	-82	3050	212790	387818
01/01/2022 10:37	15	69	1085	-83	3050	231595	1000000
01/01/2022 09:37	14	81	1016	-84	3050	202753	509712
01/01/2022 08:36	13	62	935	-82	3051	431251	1000000
01/01/2022 07:35	12	73	873	-81	3054	234320	1000000
01/01/2022 06:36	11	69	800	-82	3053	335592	83053
01/01/2022 05:36	10	90	731	-79	3054	274844	463273
01/01/2022 04:36	9	64	641	-80	3051	224040	986699
01/01/2022 03:37	8	82	577	-83	3053	155584	67
01/01/2022 02:36	7	71	495	-84	3054	177189	323343
01/01/2022 01:39	6	75	424	-84	3053	265232	35285
01/01/2022 00:36	5	57	349	-83	3050	190216	251343
31/12/2021 23:36	4	70	292	-83	3053	264742	1000000
31/12/2021 22:35	3	67	222	-79	3053	183338	96381
31/12/2021 21:36	2	83	155	-80	3054	231705	807168
31/12/2021 20:37	1	72	72	-80	3053	328840	1000000
31/12/2021 19:35	24	53	1669	-79	3048	299457	732613
31/12/2021 18:34	23	70	1616	-78	3051	232686	1000000
31/12/2021 17:34	22	66	1546	-87	3051	271262	219490
31/12/2021 16:36	21	84	1480	-87	3051	190814	1000000
31/12/2021 15:35	20	73	1396	-86	3050	205942	553463
31/12/2021 14:34	19	67	1323	-84	3050	218823	532785
31/12/2021 13:35	18	52	1256	-83	3050	282946	81708
31/12/2021 12:35	17	69	1204	-86	3050	337242	634109
31/12/2021 11:35	16	80	1135	-77	3051	222153	1000000
31/12/2021 10:34	15	60	1055	-80	3051	270989	1000000
31/12/2021 09:34	14	82	995	-82	3051	166591	350388
31/12/2021 08:34	13	74	913	-79	3051	214130	88
31/12/2021 07:33	12	69	839	-80	3051	200589	458183
31/12/2021 06:35	11	67	770	-79	3054	269800	886285
31/12/2021 05:33	10	71	703	-82	3052	199386	992803
31/12/2021 04:34	9	77	632	-80	3053	157232	389335
31/12/2021 03:34	8	79	555	-81	3052	213037	300473
31/12/2021 02:35	7	71	476	-77	3054	243595	84740
31/12/2021 01:33	6	66	405	-79	3052	190787	90392
31/12/2021 00:34	5	63	339	-82	3051	252371	1000000
30/12/2021 23:35	4	73	276	-79	3053	190994	153581
30/12/2021 22:34	3	62	203	-78	3051	196427	655914
30/12/2021 21:34	2	73	141	-85	3051	200481	21178
30/12/2021 20:34	1	68	68	-80	3053	173296	1000000
30/12/2021 19:33	24	71	1766	-81	3052	257526	262532
30/12/2021 18:33	23	66	1695	-80	3051	253361	1000000
30/12/2021 17:33	22	72	1629	-78	3050	185181	1000000
30/12/2021 16:32	21	95	1557	-78	3050	321786	578292
30/12/2021 15:34	20	69	1462	-83	3050	230157	625500
30/12/2021 14:32	19	55	1393	-80	3050	322604	1000000
30/12/2021 13:32	18	82	1338	-83	3044	182699	424353
30/12/2021 12:33	17	71	1256	-83	3043	340854	86651
30/12/2021 11:33	16	72	1185	-85	3043	213226	583116
30/12/2021 10:33	15	70	1113	-76	3044	204208	845752
30/12/2021 09:34	14	81	1043	-78	3046	252525	446915
30/12/2021 08:32	13	54	962	-76	3050	356913	8815
30/12/2021 07:33	12	88	908	-79	3051	183891	16493
30/12/2021 06:32	11	64	820	-81	3053	274999	242240
30/12/2021 05:32	10	75	756	-78	3053	265210	63906
30/12/2021 04:32	9	79	681	-76	3054	194444	30862
30/12/2021 03:33	8	85	602	-77	3050	193678	121649
30/12/2021 02:33	7	78	517	-80	3054	191581	464029
30/12/2021 01:32	6	75	439	-75	3051	247873	381860
30/12/2021 00:32	5	67	364	-80	3053	275558	944531

29/12/2021 23:33	4	75	297	-78	3054	172173	697947
29/12/2021 22:32	3	72	222	-80	3053	242981	1000000
29/12/2021 21:32	2	63	150	-77	3051	275073	1000000
29/12/2021 20:33	1	87	87	-82	3049	242056	21784
18/11/2021 12:09	18	69	1332	-88	3065	250392	660
18/11/2021 11:08	17	77	1263	-91	3065	225800	148
18/11/2021 10:08	16	77	1186	-86	3066	145199	330
18/11/2021 09:08	15	81	1109	-83	3069	199728	240
18/11/2021 08:08	14	81	1028	-85	3069	190824	619
18/11/2021 07:08	13	77	947	-85	3069	278360	2
18/11/2021 06:07	12	76	870	-81	3070	198457	599
18/11/2021 05:08	11	55	794	-84	3075	262536	235
18/11/2021 04:08	10	71	739	-84	3070	195954	730
18/11/2021 03:09	9	76	668	-85	3072	252915	752
18/11/2021 02:08	8	70	592	-86	3072	248646	1154
18/11/2021 01:07	7	70	522	-85	3069	234143	620
18/11/2021 00:09	6	87	452	-85	3070	149853	206
17/11/2021 23:08	5	62	365	-88	3069	197822	342
17/11/2021 22:08	4	75	303	-91	3069	229863	1014
17/11/2021 21:08	3	74	228	-85	3069	169378	1568
17/11/2021 20:11	2	73	154	-86	3069	246646	418
17/11/2021 19:15	1	81	81				
17/11/2021 17:09	22	65	1521	-84	3067	184769	1937
17/11/2021 16:07	21	85	1456				
17/11/2021 15:07	20	76	1371	-91	3067	196536	608
17/11/2021 14:08	19	79	1295	-91	3065	147106	900
17/11/2021 13:07	18	68	1216	-88	3067	214147	525
17/11/2021 12:07	17	78	1148	-90	3068	218849	1029
17/11/2021 11:06	16	81	1070	-86	3065	174613	77
17/11/2021 10:06	15	62	989	-83	3068	276331	509
17/11/2021 09:07	14	65	927	-88	3070	443301	194
17/11/2021 08:09	13	83	862	-85	3069	240476	282
17/11/2021 07:06	12	56	779	-86	3074	338470	811
17/11/2021 06:07	11	65	723	-82	3045	374048	127
17/11/2021 05:06	10	58	658	-84	3074	324846	1191
17/11/2021 04:06	9	64	600	-83	3074	208687	382
17/11/2021 03:08	8	46	536	-82	3074	326129	2341
17/11/2021 02:06	7	66	490	-82	3073	204017	326
17/11/2021 01:06	6	64	424	-84	3073	161092	438
17/11/2021 00:07	5	68	360	-84	3072	241115	279
16/11/2021 23:06	4	67	292	-83	3072	255701	348
16/11/2021 22:07	3	82	225	-86	3070	198124	178
16/11/2021 21:07	2	72	143	-92	3069	189226	1903
16/11/2021 20:07	1	71	71	-88	3070	208141	216
16/11/2021 19:06	23	64	1570	-85	3069	160260	92
16/11/2021 19:06	18	0	1506				
16/11/2021 18:06	22	69	1506	-90	3069	157609	2220
16/11/2021 15:06	19	72	1295	-85	3069	282852	42
16/11/2021 13:06	17	76	1142	-92	3066	188309	148
16/11/2021 12:06	16	66	1066	-93	3061	259593	1072
16/11/2021 11:06	15	58	1000	-87	3069	219649	1519
16/11/2021 10:06	14	57	942	-85	3069	217049	216
16/11/2021 09:07	13	71	885	-86	3069	238051	93
16/11/2021 08:06	12	61	814	-90	3068	222417	1543
16/11/2021 07:08	11	76	753	-87	3075	332630	589
16/11/2021 06:06	10	59	677	-90	3072	229646	1383
16/11/2021 05:06	9	66	618	-82	3070	182943	586
16/11/2021 04:08	8	72	552	-83	3074	196212	485
16/11/2021 03:06	7	68	480	-84	3074	297950	1844
16/11/2021 02:06	6	59	412	-91	3074	244751	1393
16/11/2021 01:07	5	65	353	-84	3074	270580	119
16/11/2021 00:06	4	77	288	-82	3074	245973	892
15/11/2021 23:06	3	80	211	-83	3070	135520	559
15/11/2021 22:07	2	63	131	-90	3074	298553	1098
15/11/2021 21:06	1	68	68	-85	3074	211236	771
09/11/2021 11:55	17	84	1205	-81	3069	143857	565
09/11/2021 10:55	16	56	1121	-84	3069	257149	2768
09/11/2021 09:56	15	76	1065	-84	3069	277788	890
09/11/2021 08:55	14	64	989	-84	3070	201493	454
09/11/2021 07:55	13	65	925	-79	3070	436233	243
09/11/2021 06:57	12	66	860	-82	3075	218497	3115
09/11/2021 05:55	11	72	794	-84	3074	185377	5
09/11/2021 04:55	10	85	722	-86	3073	251062	265
09/11/2021 03:55	9	78	637	-80	3074	157078	1416
09/11/2021 02:55	8	62	559	-83	3073	176108	1745
09/11/2021 01:55	7	75	497	-82	3074	256621	2452
09/11/2021 00:55	6	64	422	-84	3073	228848	2430

08/11/2021 23:55	5	73	358	-85	3072	273401	1871
08/11/2021 22:55	4	74	285	-84	3074	250924	53
08/11/2021 21:56	3	67	211	-83	3074	203817	99
08/11/2021 20:56	2	79	144	-86	3072	251725	0
08/11/2021 19:56	1	65	65	-83	3074	323450	873
08/11/2021 18:55	23	64	1599	-84	3074	237465	888
08/11/2021 15:52	20	72	1397	-80	3070	225039	140
08/11/2021 14:57	19	93	1325	-82	3068	249959	513
08/11/2021 09:54	14	68	957	-86	3070	217150	48
08/11/2021 08:53	13	73	889	-84	3041	314268	610
08/11/2021 07:55	12	54	816	-87	3073	280271	194
08/11/2021 06:52	11	60	762	-81	3074	331679	123
08/11/2021 05:56	10	75	702	-84	3073	266083	1370
08/11/2021 04:53	9	56	627	-82	3074	192725	176
08/11/2021 03:53	8	64	571	-84	3074	308721	413
08/11/2021 02:53	7	84	507	-85	3074	262227	588
08/11/2021 01:53	6	73	423	-82	3074	195262	93
08/11/2021 00:53	5	58	350	-81	3073	211723	1496
07/11/2021 23:53	4	73	292				
07/11/2021 22:54	3	68	219	-86	3075	198954	524
07/11/2021 21:53	2	81	151	-87	3074	218622	479
07/11/2021 20:53	1	70	70	-86	3074	303777	617
07/11/2021 19:52	23	80	1609	-85	3073	168064	1004
07/11/2021 18:59	22	63	1529	-85	3073	223891	734
07/11/2021 17:52	21	68	1466	-85	3074	181239	1035
07/11/2021 16:51	20	57	1398	-82	3073	208535	2979
07/11/2021 15:51	19	72	1341				
07/11/2021 14:52	18	68	1269	-87	3073	240661	863
07/11/2021 13:52	17	61	1201				
07/11/2021 12:52	16	79	1140	-87	3069	255516	54
07/11/2021 11:52	15	75	1061				
07/11/2021 10:53	14	90	986	-86	3069	240237	817
07/11/2021 09:51	13	75	896	-84	3069	211680	69
07/11/2021 08:51	12	66	821	-83	3070	280800	1033
07/11/2021 07:51	11	62	755	-84	3070	286324	306
07/11/2021 06:54	10	68	693	-82	3073	346867	267
07/11/2021 05:52	9	83	625	-80	3074	198002	789
07/11/2021 04:51	8	70	542	-86	3074	437643	519
07/11/2021 03:53	7	57	472	-81	3074	208576	924
07/11/2021 02:53	6	68	415	-83	3074	193714	217
07/11/2021 01:54	5	64	347	-80	3076	306516	2295
07/11/2021 00:52	4	69	283	-87	3074	193247	1201
06/11/2021 23:54	3	70	214	-86	3075	308520	1440
06/11/2021 22:52	2	72	144	-84	3073	210408	506
06/11/2021 21:50	1	72	72				
06/11/2021 20:51	23	75	1413	-85	3074	183119	43
06/11/2021 19:52	22	71	1338	-87	3073	218741	1367
06/11/2021 18:07	20	6	1216	-81	3070	98031	2587
06/11/2021 14:51	17	63	1070	-94	3070	237770	117
06/11/2021 05:51	8	72	543	-85	3074	370550	1403
06/11/2021 04:51	7	64	471	-86	3074	280019	4106
06/11/2021 03:51	6	90	407	-86	3075	207067	758
06/11/2021 02:51	5	56	317	-86	3074	219262	5
06/11/2021 01:52	4	65	261	-85	3075	349928	1259
06/11/2021 00:52	3	66	196	-87	3075	337933	1067
05/11/2021 23:52	2	58	130	-88	3073	196178	752
05/11/2021 22:52	1	72	72				

## 7 - RESULTADO DOS ENSAIOS PARA CORPO DE PROVA DE AÇO+PARAFINA

DATE AND TIME	UPTIME (h)	MUON RATE ( $\mu$ /h)	ACCUMULATED ( $\mu$ )	RSSI (dBm)	VCC (mV)	MAX (ms)	MIN (ms)
29/12/2021 01:03	5	74	334	-78	3052	397475	297517
29/12/2021 00:03	4	74	260	-83	3053	245660	623421
28/12/2021 23:03	3	63	186	-84	3050	256523	43312
28/12/2021 22:03	2	58	123	-80	3051	350616	817382
28/12/2021 21:03	1	65	65	-79	3053	229726	719488
28/12/2021 20:02	24	66	1608	-81	3050	203450	68266
28/12/2021 19:02	23	66	1542	-80	3050	285937	119732
28/12/2021 18:06	22	69	1476	-80	3051	356684	441433
28/12/2021 17:02	21	65	1407	-82	3050	214620	433477
28/12/2021 16:02	20	71	1342	-84	3050	279145	398677
28/12/2021 15:02	19	65	1271	-80	3050	223402	5480
28/12/2021 14:04	18	65	1206	-81	3046	272943	181637
28/12/2021 13:02	17	71	1141	-80	3045	241217	411766
28/12/2021 12:02	16	76	1070	-81	3048	169034	404048
28/12/2021 11:01	15	82	994	-84	3046	210272	629969
28/12/2021 10:02	14	71	912	-78	3048	231462	188387
28/12/2021 09:02	13	70	841	-75	3050	302230	26365
28/12/2021 08:04	12	62	771	-78	3050	451577	1000000
28/12/2021 07:02	11	57	709	-79	3050	376478	1000000
28/12/2021 06:02	10	59	652	-76	3054	321053	1000000
28/12/2021 05:02	9	60	593	-77	3054	475511	1000000
28/12/2021 04:01	8	74	533	-77	3054	286255	148289
28/12/2021 03:02	7	64	459	-77	3055	240112	1000000
28/12/2021 02:02	6	71	395	-76	3054	311542	47789
28/12/2021 01:02	5	56	324	-83	3054	365501	1000000
28/12/2021 00:02	4	64	268	-78	3054	248366	981576
27/12/2021 23:02	3	66	204	-81	3052	213132	296378
27/12/2021 22:02	2	70	138	-77	3054	167782	36928
27/12/2021 21:02	1	68	68	-83	3053	247162	172232
27/12/2021 20:01	24	78	1680	-79	3054	143296	45447
27/12/2021 19:00	23	61	1602	-77	3054	243733	1000000
27/12/2021 17:59	22	62	1541	-79	3054	253337	483373
27/12/2021 16:59	21	75	1479	-77	3054	288673	281203
27/12/2021 16:00	20	60	1404	-78	3050	277072	300525
27/12/2021 15:00	19	81	1344	-85	3050	284407	773748
27/12/2021 13:59	18	57	1263	-81	3050	315354	1000000
27/12/2021 13:00	17	69	1206	-81	3049	199476	1000000
27/12/2021 12:00	16	75	1137	-88	3049	169023	599232
27/12/2021 10:59	15	68	1062	-81	3048	183069	1000000
27/12/2021 10:00	14	55	994	-79	3045	254915	1000000
27/12/2021 08:59	13	85	939	-79	3050	166997	1000000
27/12/2021 07:59	12	65	854	-84	3051	267435	452649
27/12/2021 06:59	11	76	789	-84	3051	197334	583743
27/12/2021 06:00	10	58	713	-83	3051	275883	789202
27/12/2021 04:59	9	64	655	-79	3054	321695	95431
27/12/2021 04:01	8	67	591	-80	3053	218301	4482
27/12/2021 02:59	7	73	524	-80	3053	258243	1000000
27/12/2021 02:04	6	71	451	-80	3051	345636	1000000
27/12/2021 00:59	5	71	380	-79	3053	178741	1000000
26/12/2021 23:59	4	75	309	-82	3052	174304	204708
26/12/2021 23:00	3	85	234	-80	3051	348209	852777
26/12/2021 22:00	2	72	149	-79	3052	211263	194247
26/12/2021 21:00	1	77	77	-80	3051	211281	226554
26/12/2021 19:59	24	58	1611	-81	3050	244864	898833
26/12/2021 18:59	23	73	1553	-84	3051	190189	1000000
26/12/2021 17:59	22	55	1480	-80	3050	218019	1000000
26/12/2021 17:00	21	74	1425	-80	3050	268812	241284
26/12/2021 15:59	20	72	1351	-80	3048	185982	363408
26/12/2021 14:59	19	58	1279	-83	3049	263189	257800
26/12/2021 13:59	18	62	1221	-85	3048	199641	995925
26/12/2021 13:01	17	83	1159	-80	3049	214186	86038
26/12/2021 11:59	16	67	1076	-84	3050	352710	628424
26/12/2021 10:59	15	58	1009	-81	3044	201208	1000000
26/12/2021 09:59	14	59	951	-79	3050	291708	1000000
26/12/2021 08:59	13	60	892	-79	3051	166638	1000000
26/12/2021 07:59	12	71	832	-85	3053	314533	224036
26/12/2021 06:59	11	67	761	-78	3054	174452	1000000
26/12/2021 05:59	10	69	694	-82	3054	446322	930160
26/12/2021 04:59	9	71	625	-78	3054	207567	808384
26/12/2021 03:59	8	76	554	-83	3054	245901	956368
26/12/2021 02:59	7	64	478	-78	3051	162203	741369
26/12/2021 02:02	6	63	414	-81	3053	219821	297010

26/12/2021 00:59	5	75	351	-82	3052	170191	327861
26/12/2021 00:01	4	62	276	-84	3054	316505	1000000
25/12/2021 22:59	3	56	214	-82	3054	294678	91839
25/12/2021 22:02	2	85	158	-80	3052	249019	122761
25/12/2021 21:00	1	73	73	-85	3054	235058	1000000
24/11/2021 04:12	18	77	1241	-82	3074	256607	667
24/11/2021 03:12	17	80	1164	-84	3074	177915	470
24/11/2021 02:12	16	71	1084	-83	3074	203134	775
24/11/2021 01:13	15	63	1013	-84	3074	218590	353
24/11/2021 00:12	14	70	950	-82	3074	295570	515
23/11/2021 23:12	13	81	880	-88	3074	194293	961
23/11/2021 22:15	12	80	799	-82	3074	177571	577
23/11/2021 21:14	11	65	719	-88	3072	315944	380
23/11/2021 20:12	10	67	654	-87	3074	370736	406
23/11/2021 19:12	9	55	587	-87	3070	364217	1732
23/11/2021 18:12	8	71	532				
23/11/2021 17:15	7	75	461	-87	3069	236917	83
23/11/2021 16:13	6	43	386	-87	3069	409962	1842
23/11/2021 15:13	5	71	343	-87	3070	229792	2505
23/11/2021 12:12	2	63	131	-80	3068	219207	2984
23/11/2021 11:15	1	68	68	-83	3069	318474	125
23/11/2021 10:12	23	78	1304	-84	3069	275424	850
23/11/2021 09:11	22	66	1226	-83	3074	258259	241
23/11/2021 08:13	21	79	1160	-87	3073	357817	422
23/11/2021 07:12	20	68	1081	-87	3074	297087	279
23/11/2021 06:12	19	2	1013	-85	3073	278387	3843
23/11/2021 06:07	18	1	1011	-84	3074	13597156	600000
23/11/2021 00:13	13	61	893	-81	3074	245324	907
22/11/2021 23:13	12	77	832				
22/11/2021 22:13	11	57	755	-89	3074	198044	917
22/11/2021 21:13	10	64	698				
22/11/2021 20:13	9	72	634	-88	3074	189473	1317
22/11/2021 19:12	8	71	562	-85	3074	217298	1798
22/11/2021 18:12	7	80	491	-89	3072	221412	81
22/11/2021 17:14	6	64	411	-88	3074	193885	955
22/11/2021 16:11	5	70	347	-90	3068	251503	2021
22/11/2021 15:11	4	71	277	-89	3072	198142	2723
22/11/2021 14:11	3	72	206	-87	3069	194463	423
22/11/2021 13:12	2	73	134				
22/11/2021 12:12	1	61	61	-82	3069	258722	470
22/11/2021 11:11	23	67	556	-90	3069	304789	1456
22/11/2021 10:08	22	77	489	-91	3068	186161	709
22/11/2021 09:07	21	49	412	-84	3069	186426	472
22/11/2021 08:07	20	65	363				
22/11/2021 07:08	19	86	298	-86	3072	330261	79
22/11/2021 06:08	18	80	212	-85	3074	204510	1144
22/11/2021 05:08	17	82	132	-83	3074	186925	397
22/11/2021 04:09	16	49	50	-76	3074	407727	1387
22/11/2021 03:21	15	1	1	-80	3075	54705948	600000
14/11/2021 10:05	19	76	1268	-90	3072	365598	1679
14/11/2021 09:04	18	73	1192	-87	3070	289788	350
14/11/2021 06:08	15	65	1000	-86	3075	338382	383
14/11/2021 05:05	14	62	935	-85	3075	551838	1040
14/11/2021 04:04	13	67	873	-82	3074	349041	201
14/11/2021 03:04	12	75	806	-85	3075	171289	93
14/11/2021 02:04	11	71	731	-85	3074	221313	1056
14/11/2021 01:04	10	61	660	-81	3074	209817	1332
14/11/2021 00:04	9	60	599	-85	3074	383028	508
13/11/2021 23:04	8	73	539	-85	3075	208780	786
13/11/2021 22:06	7	69	466	-80	3076	161257	155
13/11/2021 21:07	6	75	397	-87	3074	296241	431
13/11/2021 20:04	5	66	322	-87	3074	215683	1281
13/11/2021 19:06	4	61	256	-87	3075	327264	519
13/11/2021 18:04	3	90	195	-81	3074	186149	143
13/11/2021 17:05	2	52	105	-86	3073	243613	544
13/11/2021 16:06	1	53	53	-85	3073	326715	523
13/11/2021 15:04	23	67	1607	-88	3070	153694	248
13/11/2021 14:04	22	70	1540	-84	3069	237191	907
13/11/2021 13:05	21	62	1470	-88	3070	311853	1463
13/11/2021 12:03	20	62	1408	-86	3068	190320	553
13/11/2021 11:04	19	74	1346	-89	3069	194307	818
13/11/2021 10:03	18	70	1272	-83	3070	208904	1165
13/11/2021 09:03	17	64	1202	-83	3073	236247	1074
13/11/2021 08:03	16	73	1138	-82	3072	201466	172
13/11/2021 07:03	15	63	1065	-84	3075	288427	284
13/11/2021 06:03	14	61	1002	-83	3076	217775	163

13/11/2021 05:06	13	74	941	-85	3075	240161	749
13/11/2021 04:03	12	70	867	-91	3076	274713	852
13/11/2021 03:04	11	81	797	-91	3074	261081	826
13/11/2021 02:03	10	75	716	-85	3075	321634	992
13/11/2021 01:03	9	74	641	-89	3074	172258	494
13/11/2021 00:03	8	70	567	-89	3075	231565	280
12/11/2021 23:04	7	69	497	-89	3074	289624	241
12/11/2021 22:04	6	72	428				
12/11/2021 21:03	5	73	356	-87	3074	239464	65
12/11/2021 20:05	4	66	283	-90	3073	237725	3436
12/11/2021 19:05	3	68	217				
12/11/2021 18:03	2	71	149	-88	3074	244013	453
12/11/2021 17:04	1	78	78	-84	3075	171620	835
12/11/2021 16:03	23	76	1581	-83	3073	229180	683
12/11/2021 15:03	22	77	1505	-87	3070	246988	133
12/11/2021 14:02	21	81	1428	-84	3070	216203	147
12/11/2021 13:02	20	72	1347	-83	3070	276317	417
12/11/2021 12:01	19	64	1275	-88	3072	225829	1138
12/11/2021 11:01	18	69	1211	-88	3074	262454	469
12/11/2021 10:02	17	71	1142	-82	3073	247109	825
12/11/2021 09:02	16	51	1071	-83	3073	265227	737
12/11/2021 08:02	15	66	1020	-85	3074	181728	1952
12/11/2021 07:02	14	83	954	-83	3074	150790	681
12/11/2021 06:02	13	77	871	-82	3073	197128	717
12/11/2021 05:02	12	66	794	-83	3075	265245	174
12/11/2021 04:01	11	71	728	-81	3075	181373	1545
12/11/2021 03:02	10	66	657	-80	3075	227431	181
12/11/2021 02:04	9	74	591	-82	3074	200466	86
12/11/2021 01:04	8	70	517	-85	3074	247407	36
12/11/2021 00:02	7	69	447	-85	3074	316471	352
11/11/2021 23:03	6	63	378	-80	3074	263572	1266
11/11/2021 22:05	5	75	315	-82	3020	214639	425
11/11/2021 21:03	4	69	240	-79	3074	225266	1018
11/11/2021 21:03	1	171	171				
11/11/2021 20:01	3	52	171	-77	3074	256727	1346
11/11/2021 19:02	2	57	119	-80	3074	311664	352
11/11/2021 17:01	23	64	1591	-78	3074	308209	730
11/11/2021 14:01	20	67	1391	-84	3074	254785	61
11/11/2021 13:00	19	83	1324	-84	3072	208854	12
11/11/2021 12:00	18	74	1241	-88	3070	180821	695
11/11/2021 11:00	17	71	1167	-85	3072	197922	13
11/11/2021 10:02	16	79	1096	-90	3072	232819	389
11/11/2021 09:00	15	72	1017	-88	3074	157724	252
11/11/2021 08:00	14	69	945				
11/11/2021 07:00	13	69	876	-84	3074	351982	1647
11/11/2021 06:02	12	64	807	-84	3073	206262	422
11/11/2021 05:05	11	66	743				
11/11/2021 04:01	10	65	677	-83	3074	215827	594
11/11/2021 03:00	9	73	612	-90	3045	265951	140
11/11/2021 02:00	8	66	539	-85	3073	282802	837
11/11/2021 01:01	7	65	473	-86	3074	175277	688
11/11/2021 00:01	6	72	408	-85	3075	272093	306
10/11/2021 23:02	5	71	336	-87	3074	310835	480
10/11/2021 22:01	4	65	265	-85	3074	408399	1595
10/11/2021 21:00	3	70	200	-90	3074	167197	345
10/11/2021 20:06	2	59	130	-85	3073	229992	685
10/11/2021 19:12	1	71	71				

## 8 - RESULTADO DOS ENSAIOS PARA CORPO DE PROVA DE AÇO+ASFALTO

DATE AND TIME	UPTIME (h)	MUON RATE ( $\mu$ /h)	ACCUMULATED ( $\mu$ )	RSSI (dBm)	VCC (mV)	MAX (ms)	MIN ( $\mu$ s)
09/01/2022 15:11	1	63	63	-86	3052	247068	1000000
09/01/2022 14:10	1	60	60	-85	3050	266925	46176
09/01/2022 13:08	24	77	1599	-86	3048	218841	720550
09/01/2022 12:10	23	59	1522	-86	3048	218968	1000000
09/01/2022 11:11	22	67	1463	-85	3050	298239	382268
09/01/2022 13:08	21	59	1396				
09/01/2022 09:08	20	75	1337	-84	3050	211397	383391
09/01/2022 08:09	19	66	1262	-83	3052	298143	429476
09/01/2022 07:08	18	57	1196	-83	3052	233232	1000000
09/01/2022 06:09	17	62	1139	-84	3054	292556	224004
09/01/2022 05:09	16	80	1077	-85	3054	215371	536545
09/01/2022 04:08	15	75	997	-84	3054	254717	230491
09/01/2022 03:08	14	42	922	-83	3054	454946	274522
09/01/2022 02:08	13	74	880	-84	3054	208421	1000000
09/01/2022 01:10	12	65	806	-83	3053	241745	1000000
09/01/2022 00:09	11	71	741	-84	3054	302249	317548
08/01/2022 23:08	10	61	670	-86	3054	259739	1000000
08/01/2022 22:10	9	62	609	-86	3053	192401	67049
08/01/2022 21:12	8	73	547				
08/01/2022 20:09	7	79	474	-84	3053	183125	1000000
08/01/2022 19:09	6	77	395	-85	3054	201373	382630
08/01/2022 18:09	5	56	318	-84	3052	317788	1000000
08/01/2022 17:09	4	68	262	-87	3051	262775	118626
08/01/2022 16:09	3	69	194	-87	3051	216138	658378
08/01/2022 15:08	2	60	125	-84	3051	213714	411742
08/01/2022 14:09	1	65	65	-82	3051	260216	1000000
08/01/2022 13:07	1	56	56	-86	3050	284941	890186
08/01/2022 12:06	24	61	1655	-84	3046	246900	865295
08/01/2022 11:06	23	70	1594				
08/01/2022 10:07	22	71	1524	-82	3048	169279	792175
08/01/2022 09:06	21	72	1453	-83	3052	237795	526187
08/01/2022 08:06	20	74	1381	-81	3053	198873	477499
08/01/2022 07:09	19	84	1307	-80	3053	286260	137296
08/01/2022 06:07	18	75	1223	-83	3053	233849	416189
08/01/2022 05:08	17	66	1148	-80	3053	306035	655157
08/01/2022 04:06	16	71	1082	-82	3054	194783	176737
08/01/2022 03:06	15	79	1011	-78	3053	196406	409210
08/01/2022 02:06	14	76	932	-80	3053	189270	324151
08/01/2022 01:07	13	65	856	-84	3054	366567	59455
08/01/2022 00:06	12	75	791	-85	3054	239274	22120
07/01/2022 23:05	11	64	716	-83	3053	282931	270824
07/01/2022 22:06	10	48	652	-84	3052	262324	562996
07/01/2022 21:07	9	68	604	-81	3051	213103	1000000
07/01/2022 20:05	8	72	536	-84	3051	234494	134388
07/01/2022 19:05	7	67	464	-80	3051	201869	228279
07/01/2022 18:05	6	61	397	-81	3050	377982	497659
07/01/2022 17:07	5	75	336	-84	3050	187285	36471
07/01/2022 16:06	4	61	261	-81	3050	336210	375165
07/01/2022 15:05	3	59	200	-85	3048	240080	1000000
07/01/2022 14:06	2	69	141	-81	3050	327063	330177
07/01/2022 13:06	1	72	72	-82	3050	234419	440486
07/01/2022 02:28	17	60	1133	-89	3050	229269	2284
06/01/2022 17:27	8	49	509	-93	3050	263725	333144
06/01/2022 16:27	7	58	460				
06/01/2022 15:28	6	67	402	-92	3042	275941	881389
06/01/2022 14:27	5	76	335	-92	3042	221744	984027
06/01/2022 13:27	4	68	259	-93	3041	218466	228146
06/01/2022 12:28	3	65	191	-88	3046	315642	644552
06/01/2022 11:27	2	66	126	-87	3046	300176	554552
06/01/2022 10:27	1	60	60	-87	3049	202282	496320
05/01/2022 23:10	5	51	268	-72	3050	362433	1000000
05/01/2022 22:11	4	58	217	-74	3050	224353	1000000
05/01/2022 21:14	3	43	159	-70	3049	443510	1000000
05/01/2022 20:09	2	64	116	-71	3050	219582	120060
05/01/2022 19:10	1	52	52	-77	3050	334373	85937
05/01/2022 18:09	24	53	1189	-74	3050	278361	200229
25/12/2021 00:10	6	67	392	-82	3054	239366	602425
24/12/2021 23:10	5	70	325	-79	3054	174734	1000000
24/12/2021 22:09	4	63	255	-80	3054	295323	479385
24/12/2021 21:08	3	61	192	-81	3054	233048	24490
24/12/2021 20:08	2	68	131	-79	3054	308517	676116
24/12/2021 19:09	1	63	63	-79	3052	167413	546561
24/12/2021 18:07	24	68	1678	-79	3051	300886	14854

24/12/2021 17:10	23	69	1610	-84	3052	320560	191720
24/12/2021 16:08	22	62	1541	-79	3048	216662	573730
24/12/2021 15:08	21	66	1479	-80	3050	276564	133310
24/12/2021 14:07	20	68	1413	-78	3049	266865	365143
24/12/2021 13:07	19	60	1345	-79	3050	286759	798907
24/12/2021 12:09	18	76	1285	-78	3050	189604	713617
24/12/2021 11:08	17	72	1209	-81	3050	250409	438284
24/12/2021 10:08	16	68	1137	-77	3050	221495	152936
24/12/2021 09:08	15	69	1069	-77	3050	233507	1000000
24/12/2021 08:08	14	74	1000	-83	3052	352915	395571
24/12/2021 07:08	13	72	926	-79	3054	278105	101830
24/12/2021 06:08	12	73	854	-84	3053	211951	79779
24/12/2021 05:08	11	82	781	-79	3053	233264	633819
24/12/2021 04:09	10	76	699	-84	3054	185343	688629
24/12/2021 03:07	9	83	623	-79	3054	305471	1000000
24/12/2021 02:08	8	67	540	-78	3052	205593	974914
24/12/2021 01:09	7	74	473	-80	3052	302911	612158
24/12/2021 00:08	6	68	399	-78	3054	277932	394364
23/12/2021 23:08	5	66	331	-81	3054	241429	599222
23/12/2021 22:07	4	59	265	-82	3054	240928	1000000
23/12/2021 21:08	3	77	206	-79	3051	284718	1000000
23/12/2021 20:08	2	61	129	-78	3054	268975	44454
23/12/2021 19:09	1	68	68	-78	3054	248288	74240
23/12/2021 18:07	24	60	1752	-79	3053	235357	108821
23/12/2021 17:06	23	75	1692	-80	3050	223432	1000000
23/12/2021 16:06	22	76	1617	-78	3048	176901	310287
23/12/2021 15:07	21	62	1541	-80	3050	344718	298105
23/12/2021 14:06	20	59	1479	-85	3051	400124	235146
23/12/2021 13:07	19	59	1420	-79	3052	363643	1000000
23/12/2021 12:07	18	66	1361	-84	3051	245042	276957
23/12/2021 11:06	17	80	1295	-78	3050	232843	195590
23/12/2021 10:06	16	67	1215	-80	3054	258202	1000000
23/12/2021 09:06	15	73	1148	-81	3052	183936	198594
23/12/2021 08:06	14	80	1075	-81	3052	192589	869605
23/12/2021 07:06	13	76	995	-79	3052	260585	567118
23/12/2021 06:06	12	77	919	-82	3053	217297	38951
23/12/2021 05:07	11	78	842	-83	3054	386687	267673
23/12/2021 04:06	10	65	764	-81	3053	196632	790871
23/12/2021 03:06	9	73	699	-82	3053	280901	380113
23/12/2021 02:06	8	92	626	-83	3053	161192	607410
23/12/2021 01:07	7	78	534	-82	3053	354036	365157
23/12/2021 00:06	6	82	456	-85	3052	187605	766992
22/12/2021 23:08	5	85	374	-81	3051	235889	1000000
22/12/2021 22:06	4	74	289	-83	3051	192918	690338
22/12/2021 21:07	3	70	215	-86	3050	227707	53138
22/12/2021 20:06	2	79	145	-83	3048	200098	280709
22/12/2021 19:06	1	66	66	-79	3050	291916	1000000
22/12/2021 18:05	24	55	1649	-82	3050	267993	1000000
22/12/2021 17:03	23	83	1594	-82	3041	159678	673534
22/12/2021 16:04	22	83	1511	-85	3042	216619	107650
22/12/2021 15:03	21	77	1428	-85	3041	290998	72
22/12/2021 14:03	20	62	1351	-82	3041	205713	1000000
22/12/2021 13:03	19	59	1289	-82	3041	233932	453369
22/12/2021 12:05	18	81	1230	-86	3041	193710	612212
22/12/2021 11:06	17	66	1149	-85	3041	329051	473879
22/12/2021 10:05	16	64	1083	-85	3043	206310	8163
22/12/2021 09:03	15	69	1019	-85	3048	298304	1000000
22/12/2021 08:04	14	59	950	-82	3051	265160	809973
22/12/2021 07:04	13	68	891	-82	3051	255781	236429
22/12/2021 06:02	12	70	823	-84	3052	232849	1000000
22/12/2021 05:02	11	78	753	-81	3052	237510	317669
22/12/2021 04:04	10	63	675	-80	3053	435405	1000000
22/12/2021 03:03	9	68	612	-81	3051	216230	261292
22/12/2021 02:03	8	64	544	-83	3048	187480	198948
22/12/2021 01:03	7	61	480	-80	3051	260393	1000000
22/12/2021 00:02	6	62	419	-81	3051	214069	12570
21/12/2021 23:03	5	66	357	-85	3050	212278	1000000
21/12/2021 22:02	4	63	291	-82	3050	192563	763290
21/12/2021 21:04	3	81	228	-85	3050	179106	1000000
21/12/2021 20:04	2	81	147	-84	3048	166527	412263
21/12/2021 19:03	1	66	66	-86	3050	243986	244065