

Revista **MEDIÇÕES E ENSAIOS**

www.spmet.pt

SPMet

Sociedade Portuguesa
de Metrologia



SPMet

Sociedade Portuguesa
de Metrologia**Conselho Editorial**

Eduarda Filipe

Paulo Cabral

Isabel Godinho

Olivier Pellegrino

Propriedade e Redação

Sociedade Portuguesa de Metrologia

Contactos

Estrada do Paço do Lumiar
Campus do Lumiar - Edifício D,
1.º andar, 1649-038 Lisboa
Portugal
N.I.F. 506 461 696
geral@spmet.pt
www.spmet.pt

Secretariado:

spmet.contabilidade@sapo.pt
TLM: +351 965 030 950

Distribuição

Eletrónica

ISSN 2182-5424

Os artigos assinados são da res-
ponsabilidade dos seus autores.

Imagem de Capa

Gestão das vulnerabilidades

Índice

EDITORIAL 2**A METROLOGIA E A TRANSIÇÃO DIGITAL: MEDIÇÃO DA SEVERIDADE DE VULNERABILIDADES E RISCO DE EXPLORAÇÃO**M. F. Brilhante^{1,2}, D. Pestana^{2,3,4}, P. Pestana^{5,6}, M. L. Rocha^{7,8}, F. Sequeira^{2,3}¹: Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade dos Açores²: Centro de Estatística e Aplicações, Universidade de Lisboa (CEAUL)³: Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa⁴: Instituto de Investigação Científica Bento da Rocha Cabral⁵: Departamento de Ciências e Tecnologia, Universidade Aberta⁶: Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia das Artes (CITAR)⁷: Faculdade de Economia e Gestão, Universidade dos Açores⁸: Centro de Estudos de Economia Aplicada do Atlântico (CEEApIA) 3**CONTRIBUTOS METROLÓGICOS PARA A RECONSTRUÇÃO DIGITAL FOTOGRAFÉTRICA DE MATERIAIS E ESTRUTURAS EM ENGENHARIA CIVIL**

Luís F. Lages Martins, Álvaro Silva Ribeiro, Maria do Céu Almeida

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P. 35

PREPARAÇÃO DE MISTURAS GASOSAS MULTICOMPONENTES

Florbela A. Dias, Cristina Palma, Carlos Costa

Instituto Português da Qualidade, I. P. 45

VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO DE MISTURAS GASOSAS DE ETANOL EM NITROGÉNIO POR CROMATOGRAFIA GASOSA

Florbela A. Dias, Cristina Palma, Carlos Costa

Instituto Português da Qualidade, I. P. 55

METROLOGIA NO QUOTIDIANO

Luís Ribeiro

Instituto Português da Qualidade, I. P. 65

CLICKS METROLÓGICOS

Luís Ribeiro

Instituto Português da Qualidade, I. P. 66

A QUÍMICA DAS MEDIÇÕES

Ricardo Bettencourt da Silva

Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa 67

EVENTOS 70**MONOGRAFIAS** 72

Editorial

Caro/a leitor/a,

Este número 17 da Revista “Medições e Ensaio” publica trabalhos efetuados pela nossa comunidade da Metrologia, apresentados no 8.º Encontro Nacional da SPMet “A metrologia e a transição digital” realizado a 15 de novembro de 2022, na sede da RELACRE - Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal, em Lisboa. Inclui também secções diversas de notícias e pequenas notas sobre os próximos eventos, publicações de documentos de interesse para a nossa comunidade, a “Metrologia no quotidiano”, “Clicks metrológicos” e ainda “A Química das medições”.

A Comissão Redatora agradece aos autores que nos facultaram os seus trabalhos e ao Conselho Científico da SPMet que, desde sempre, tem zelado pela qualidade das nossas publicações.

Desejamos uma leitura proveitosa deste número cheio de interesse da Revista “Medições e Ensaio” e que essa leitura suscite outras contribuições para os próximos números da nossa revista.

Eduarda Filipe

Presidente do Conselho Diretivo da SPMet

FAÇA-SE SÓCIO

A SPMet tem quatro categorias de associados:

- **ASSOCIADOS HONORÁRIOS** - pessoas singulares ou coletivas às quais, pela sua categoria científica, a SPMet entenda dever conferir este testemunho de consideração.
- **ASSOCIADOS EFETIVOS** - pessoas singulares cuja atividade se processe no domínio da Metrologia ou das Ciências.
- **ASSOCIADOS INSTITUCIONAIS** - as entidades com atividade no domínio do ensino, da investigação, da indústria ou outros de algum modo relacionados com a Metrologia
- **ASSOCIADOS ESTUDANTES** - as pessoas singulares que frequentam o ensino superior e se interessam pelo estudo da Metrologia ou das Ciências afins

O número de associados de qualquer das categorias mencionadas nos números anteriores não será limitado.

Estão disponíveis no seguinte endereço http://www.spmet.pt/inscricao_1024.htm

As respetivas fichas de inscrição que, depois de devidamente preenchidas e enviadas para o secretariado de direção, serão analisadas para validação.

SPMet

Sociedade Portuguesa
de Metrologia

SPMet

ISSN 2182-5424

| n.º 17 | Novembro de

A Metrologia e a Transição Digital: Medição da Severidade de Vulnerabilidades e Risco de Exploração

(Metrology and the Digital Transition: Measuring the Severity of Vulnerabilities and Exploitation Risk)

M. F. Brilhante^{1,2}, D. Pestana^{2,3,4}, P. Pestana^{5,6},
M. L. Rocha^{7,8}, F. Sequeira^{2,3}

¹Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade dos Açores

²Centro de Estatística e Aplicações, Universidade de Lisboa (CEAUL)

³Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

⁴Instituto de Investigação Científica Bento da Rocha Cabral

⁵Departamento de Ciências e Tecnologia, Universidade Aberta

⁶Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia das Artes (CITAR)

⁷Faculdade de Economia e Gestão, Universidade dos Açores

⁸Centro de Estudos de Economia Aplicada do Atlântico (CEEApLA)

maria.fa.brilhante@uac.pt

*"the basic bricks out of which our culture is constructed
— mathematics, measure, motion, poetry."*

Lawrence Durrell,

The Revolt of Aphrodite — Numquam, Postface.

Resumo

A transição digital torna desejável normalizar a medição do risco associado às vulnerabilidades, fundamental para a priorização das necessidades de remediação ou mitigação, seja *patch* ou *workaround*, e é um desafio para a evolução da Metrologia no que se refere a meios auxiliares de medições virtuais. Torna também desejável aperfeiçoar as métricas usadas e sua utilização, nomeadamente no que se refere a reavaliação, se possível automática, da remediação do risco ao longo do tempo após descoberta e divulgação da vulnerabilidade.

O *Common Vulnerability Scoring System* (CVSS) usa métricas base, métricas temporais e métricas ambientais para calcular scores com o objetivo de priorizar as necessidades de correção das vulnerabilidades. Porém é estático, as métricas temporais, facultativas e pouco usadas, não estão preparadas para lhe conferir potencialidades dinâmicas, que são o ponto forte do *Exploit Prediction Scoring System* (EPSS) que surgiu em 2021. Fazemos uma avaliação crítica da evolução da versão 2 para a versão

3.1 do CVSS e de propostas de alteração das suas métricas temporais no desiderato de tornar o sistema dinâmico. O enquadramento de variáveis do ciclo de vida de vulnerabilidades na teoria dos valores extremos, eventualmente sujeitos a filtragem geométrica, sugere modelações alternativas (Geral de Valores Extremos, Pareto Generalizada, Loglogística) ao tradicional ajustamento com Pareto ou com Lognormal na procura de metodologias racionais de alteração do cálculo de modificações da pontuação do CVSS. Por outro lado, abordamos a possibilidade de usar aprendizagem de máquina para reavaliação simples da medição da severidade ao longo do tempo.

Palavras-chave: vulnerabilidades, CVSS, métricas CVSS, EPSS, risco de exploração, ciclo de vida de vulnerabilidades, extremos e domínios de atração.

Abstract

The digital transition requires developments aimed at standardizing the protocols and tools for measuring risks incurred by vulnerabilities. This is essential for deciding priorities on the effort to patch or to mitigate vulnerabilities, and therefore it is a challenge to Metrology in what concerns auxiliary means of measuring. This implies that the metrics used for assessing and scoring the vulnerabilities severity and risk should be improved, namely in what concerns update of severity score and assessment of priority to resolve with patch or workaround.

The Common Vulnerability Scoring System (CVSS) uses Base metrics, Temporal metrics and Environmental metrics to compute scores that are a guidance in the assessment of priorities in patching. It is however static, the Temporal metrics in fact do not contribute to dynamize this scoring system, while flexibility and machine learning updating is a strong point of the Exploit Prediction Scoring System (EPSS) launched in 2021. The CVSS v.3.1 score is often greater than the v.2 score, and this complicates the task of deciding priorities in remediation efforts. We also analyze related work on the possibility of computing dynamic temporal scores. To shift from static to a dynamic score, we use variables from the lifecycle of vulnerabilities, whose larger values may come from extreme value models, eventually subject to geometric thinning; this suggests fitting models such as the General Extreme Value, the Generalized Pareto or Loglogistic distributions, although the traditional Lognormal or other heavy-tailed models with paretian-tails should also be considered. The ultimate goal is to devise methodologies, whenever possible with machine learning implementation, to alter the CVSS score dynamically.

Keywords: vulnerabilities, CVSS, CVSS metrics, EPSS, exploitation risk, vulnerabilities lifecycle, domains of attraction of extreme value laws.

1 Introdução

Vulnerabilidades são fragilidades passíveis de serem exploradas por cibercriminosos para acederem a um computador ou sistema, podendo correr código malicioso, instalar *malware* ou roubar dados (Tunggal, 2022). São, conseqüentemente, a origem de eventuais riscos de intrusão e exploração, com conseqüências económicas que podem ser extremas, veja-se Eling *et al.* (2022).

As vulnerabilidades são detetadas habitualmente pelos engenheiros de segurança das empresas de produção de *software* afetadas. Nesta situação, podem ser reportadas internamente e depois corrigidas o mais depressa possível. No entanto, há vulnerabilidades que são descobertas por terceiros (há por exemplo programas de *bug bounty* onde as empresas produtoras de *software* disponibilizam uma plataforma para os *hackers* bem intencionados poderem reportar as vulnerabilidades que descobrem e receber uma recompensa monetária). O reporte é feito a uma entidade que se encarrega de registar essas vulnerabilidades e que habitualmente se designa por *CVE Numbering Authority (CNA)*⁽¹⁾, podendo assim atribuir um identificador universal à vulnerabilidade. Depois do pedido feito, o CVE-ID fica reservado e os dados são analisados para perceber os riscos de segurança da vulnerabilidade reportada, bem como a sua reprodutibilidade em qualquer sistema. Caso isso se verifique, a vulnerabilidade é publicada e depois classificada. O processo está descrito em detalhe em <https://www.cve.org/About/Process>.

Anote-se que a concepção do ciclo de vida das vulnerabilidades se alterou muito. Frei *et al.* (2006), Figura 1a, apenas considerava três pontos — Descoberta (*Discovery*), Publicação (*Disclosure*) e Correção (*Patch*), podendo eventualmente uma exploração maliciosa (*Exploit*) ocorrer a qualquer tempo. Atualmente, Figura 1b, o ciclo de vida comporta descoberta, reporte, pedido de registo, reserva de identificador, submissão para análise, divulgação. Veja-se também a Figura 2 no que se refere à gestão das vulnerabilidades.

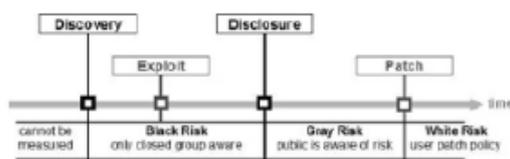
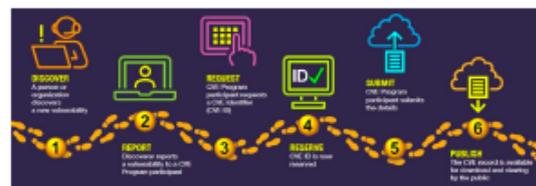
(a) Frei *et al.* (2006)(b) <https://www.cve.org/About/Process>, 2023.

Figura 1: Ciclo de vida das vulnerabilidades.



Figura 2: Gestão das vulnerabilidades.

⁽¹⁾ O programa de identificação de vulnerabilidades foi lançado em 1999. Atualmente há 240 parceiros, 48 dos quais são instituições de investigação de vulnerabilidades, em 35 países. Em Portugal, não existe nenhuma instituição associada. Informação detalhada pode ser consultada em <https://www.cve.org>, onde se pode também descarregar informação sobre vulnerabilidades publicadas desde 1999.

A necessidade de sinalizar as vulnerabilidades mais perigosas e com necessidade de correção (*patch*) urgente, ou pelo menos mitigação ou remediação, tornou necessário passar de abordagens qualitativas (*Qualys Research Report*, 2005) para sistemas de atribuição de scores.

Em fevereiro de 2005, surgiu a versão 1 do *Common Vulnerability Scoring System* (CVSS), usando métricas base, métricas temporais e métricas ambientais para calcular scores com o objetivo de priorizar as necessidades de correção das vulnerabilidades. A versão 2 foi publicada em junho de 2007, e em junho de 2015, surgiu a versão 3.0, melhorada em junho de 2019 para a atual versão 3.1, consulte-se no Apêndice A as pontuações e equações das métricas da versão 3.1.

Com o duplo objetivo de contribuir para a dinamização do CVSS e advogar o alargamento do âmbito da Metrologia a medições virtuais, o que parece natural no contexto de transição digital, organizamos este trabalho como se segue:

Na Secção 2, indicamos diversas fontes de informação sobre a severidade de vulnerabilidades e risco da sua exploração maliciosa.

Na Secção 3, traçamos uma breve panorâmica dos scores desenvolvidos para "medição" dos riscos de exploração (CVSS, EPSS, CTI e CWSS), com vista a estabelecer prioridades no esforço de correção de vulnerabilidades, ou pelo menos sua mitigação, ou remediação.

O CVSS tem sido criticado por ser estático, como se o risco de exploração das vulnerabilidades não evoluísse no tempo. Na Secção 4, descrevemos propostas de alteração das métricas temporais do CVSS, e discutimos como a modelação de tempos entre ocorrências no ciclo de vida das vulnerabilidades poderiam contribuir para dinamizar alguma versão futura deste score. Discutimos também a moda de usar leis-potência, e a racionalidade de usar modelos com caudas paretianas no contexto de domínios de atração de leis max-estáveis e de leis max-geo-estáveis.

Na Secção 5, usamos dados recolhidos em <https://www.cvedetails.com/> para modelar tempos entre data de publicação e data de atualização das vulnerabilidades, com indicação da racionalidade na escolha dos modelos. Usaremos ainda, para seleção dos modelos ajustáveis, os critérios de informação de Akaike (1987) e de Schwarz (1978), este último mais conhecido por critério de informação bayesiano, e o teste de Vuong (1989).

Na Secção 6, levantamos a questão de a Metrologia alargar o seu âmbito, ocupando-se de medições que, à falta de termo mais adequado, chamaremos "virtuais".

No Apêndice A, indicamos os valores e equações das métricas Base, Temporais e Ambientais do CVSS v.3.1. No Apêndice B, quantificamos as explorações anuais de vulnerabilidades. No Apêndice C, damos algumas informações sobre a nova versão 4.0 do CVSS, anunciada para o último trimestre de 2023.

2 Vulnerabilidades — severidade e risco de exploração

As primeiras vulnerabilidades foram registadas em 1988, apenas duas. Atualmente (2022-09-30) a *Vulnerability Database* (<https://vuldb.com/>) regista 209 886, e em 2022 foram registadas 25 227 vulnerabilidades na *National Vulnerability Database* (<https://nvd.nist.gov/general/nvd-dashboard>) gerida pelo NIST — *National Institute of Standards and Technology*. A *Exploit Database* (<https://www.exploit-db.com>) informa que até 2022-10-20

tinham sido detetadas 45 088 códigos de exploração de vulnerabilidades, de que 33 658 foram verificados. Na Figura 3, observa-se um enorme incremento, sobretudo depois de 2017.

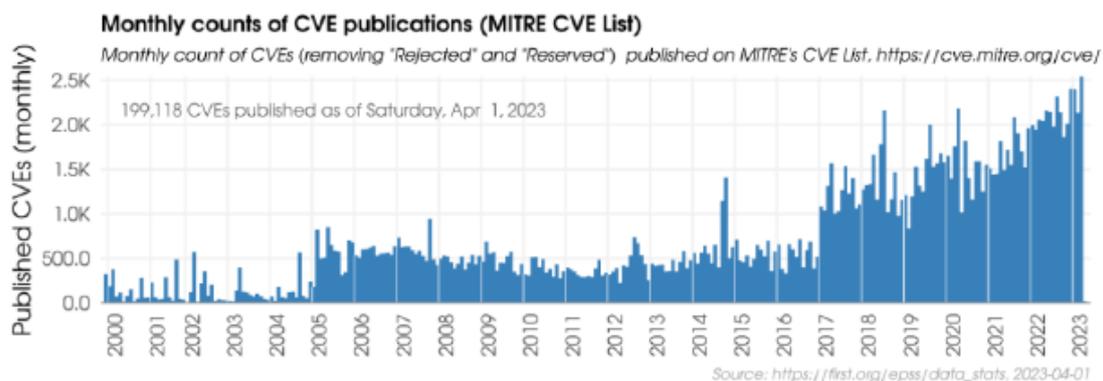


Figura 3: Registo mensal de vulnerabilidades (https://www.first.org/epss/data_stats).

A probabilidade de uma vulnerabilidade ser maliciosamente explorada e o impacto de eventuais explorações (*exploits* — verosimilhança de ocorrer intrusão) são determinantes na avaliação do risco que representa. Admite-se que mensalmente 5 % a 20 % das vulnerabilidades conhecidas são corrigidas, e que apenas 2 % a 7 % das vulnerabilidades são efetivamente exploradas⁽²⁾, e Allodi (2015) indica que, entre 2009 e 2012, 95 % dos $75,7 \times 10^6$ ataques a 374 vulnerabilidades tiveram como alvo apenas 5 % dessas vulnerabilidades, o que o levou a comentar que reações de pânico são escusadas. Como o risco associado à maior parte das vulnerabilidades é negligível, em sua opinião, a atitude tradicional "*I have a vulnerability*" → "*I must fix it*" é uma reação excessiva ao risco efetivo.

As percentagens de vulnerabilidades sujeitas a ciberataques parecem baixas, mas é preciso não esquecer que anualmente surgem mais do que 20 000 novas vulnerabilidades, e que conseqüentemente se espera que entre cerca de 400 e cerca de 1 400 delas sejam sujeitas a exploração. Eventuais prejuízos das empresas, gastos com cibersegurança, e a existência de um mercado florescente de instrumentos facilitando exploração de vulnerabilidades colocaram esta problemática entre as economicamente relevantes, possivelmente com cenários extremos (Eling *et al.*, 2022).

Por isso é imprescindível referenciar as vulnerabilidades que potencialmente representam maiores riscos, por forma a estabelecer prioridades no que se refere a providências para as remediar ou mitigar (que não são soluções conclusivas), ou idealmente corrigir.

⁽²⁾ Usando os dados de <https://www.cvedetails.com/>, a percentagem de vulnerabilidades exploradas é apenas 1,87 %, com percentagens muito elevadas entre 2009 e 2012, ver Apêndice B. Porém aparentemente estes dados referem-se a vulnerabilidades após ser atribuído um CVE-ID, e o maior risco ocorre no período anterior à divulgação.

3 Medição da severidade das vulnerabilidades e avaliação do risco de exploração maliciosa

3.1 CVSS

O CVSS é um sistema de pontuação que disponibiliza uma calculadora cuja componente fundamental *Base Score* é de preenchimento obrigatório (Figura 4).

Figura 4: Métricas score Base (<https://nvd.nist.gov/vuln-metrics/cvss/v3-calculator>).

O utilizador escolhe um dos possíveis 2 592 retratos-robô base selecionando as opções que melhor descrevem os atributos fixos da vulnerabilidade, e o algoritmo usa os parâmetros e equações das métricas Base do CVSS v3.1 para calcular um score entre 0 e 10⁽³⁾ que "mede" a severidade da vulnerabilidade e lhe atribui uma classe de risco: *None* ↔ 0, *Low* ↔ [0,1;3,9], *Medium* ↔ [4;6,9], *High* ↔ [7;8,9], e *Critical* ↔ [9,10].

O grupo de trabalho que preparou a nova versão 3.1 da calculadora CVSS tomou as decisões sobre os valores dos parâmetros e equações com o objetivo de o algoritmo produzir scores com desvio inferior a 0,5 numa amostra representativa de vulnerabilidades reais nas diversas classes de risco. A descrição detalhada encontra-se em <https://www.first.org/cvss/v3.1/specification-document>.

O score Base e o nível de risco podem ser modificados usando métricas Temporais e métricas Ambientais, de preenchimento facultativo (Figuras 5 e 6). Há ainda a possibilidade, no contexto ambiental, de haver uma reavaliação do score e classe de risco usando parâmetros diferentes dos invocados nas métricas Base, preenchendo uma modificação das características Base (Figura 7).

⁽³⁾ O algoritmo usa um procedimento que faz arredondamento à décima não inferior e um procedimento que torna 10 o score máximo. Assim há apenas 101 scores possíveis.

Temporal Score

Exploit Code Maturity (E)

Not Defined (X) Unproven (U) Proof-of-Concept (P) Functional (F) High (H)

Remediation Level (RL)

Not Defined (X) Official Fix (O) Temporary Fix (T) Workaround (W) Unavailable (U)

Report Confidence (RC)

Not Defined (X) Unknown (U) Reasonable (R) Confirmed (C)

Figura 5: Métricas score Temporal (<https://nvd.nist.gov/vuln-metrics/cvss/v3-calculator>).

Environmental Score

Confidentiality Requirement (CR)

Not Defined (X) Low (L) Medium (M) High (H)

Integrity Requirement (IR)

Not Defined (X) Low (L) Medium (M) High (H)

Availability Requirement (AR)

Not Defined (X) Low (L) Medium (M) High (H)

Figura 6: Métricas score Ambiental (<https://nvd.nist.gov/vuln-metrics/cvss/v3-calculator>).

Modified Attack Vector (MAV)

Not Defined (X) Network Adjacent Network Local Physical

Modified Attack Complexity (MAC)

Not Defined (X) Low High

Modified Privileges Required (MPR)

Not Defined (X) None Low High

Modified User Interaction (MUI)

Not Defined (X) None Required

Modified Scope (MS)

Not Defined (X) Unchanged Changed

Modified Confidentiality (MC)

Not Defined (X) None Low High

Modified Integrity (MI)

Not Defined (X) None Low High

Modified Availability (MA)

Not Defined (X) None Low High

Figura 7: Score Base modificado (<https://www.first.org/cvss/calculator/3.1>).

O ponto forte do CVSS é a disponibilidade universal de uma calculadora de utilização simples, e de documentação detalhada sobre métricas, parâmetros e equações usados. Por outro lado, o sistema tem sido muito criticado por ser estático, como se a severidade das vulnerabilidades e o risco de exploração selvagem não evoluíssem no tempo. Não comporta também a possibilidade de fazer uma avaliação do risco combinado de um conjunto de vulnerabilidades.

Outra crítica importante é estar a evoluir de uma forma que parece contrária ao objetivo fundamental de priorizar vulnerabilidades a corrigir. De facto, estima-se que 25 % das vulnerabilidades têm um score v.3.1 superior ao score v.2, e apenas 3 % baixaram o score. Consequentemente há mais vulnerabilidades identificadas como candidatas urgentes a remediação, o que parece desajustado quando há evidência de que a percentagem de vulnerabilidades efetivamente exploradas é baixa. Os dois gráficos da Figura 8 evidenciam essa inflação de classificações de risco *High+Critical*.

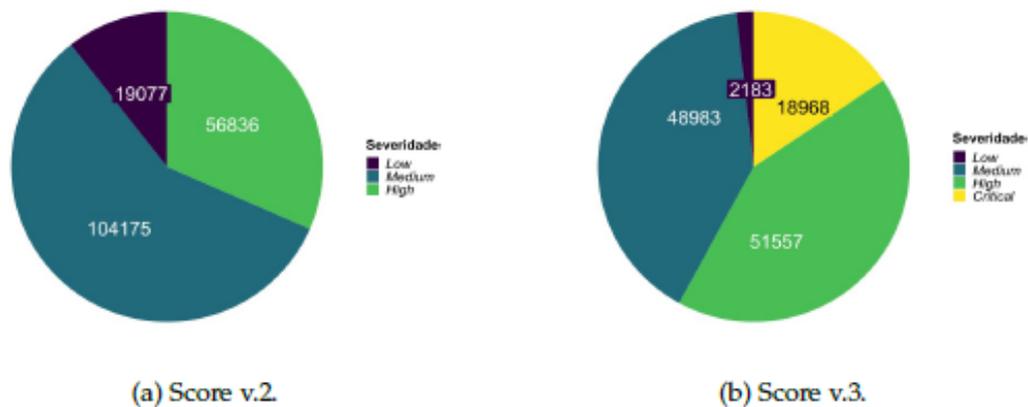


Figura 8: Distribuição do score CVSS (dados em <https://nvd.nist.gov/general/nvd-dashboard>).

Analisámos os dados do 1.º trimestre de 2022, recolhidos em <https://nvd.nist.gov/vuln/search> com a opção 'advanced'. Repare-se no resultado bizarro de o 1.º quartil dos scores v.3.1 ser superior à mediana dos scores da v.2, e a mediana da v.3.1 exceder o 3.º quartil da v.2 (ver Figura 9).

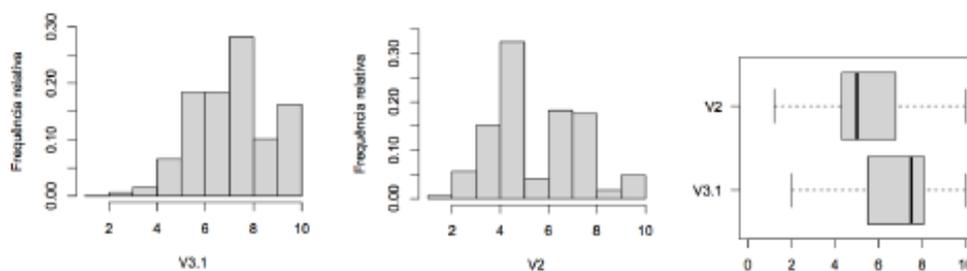


Figura 9: Comparação dos scores CVSS v.3.1 e CVSS v.2.

Na mesma linha crítica, uma vez que quanto maior é o score mais alto é o risco, não parece clarividente reduzir a 10 os resultados das equações excedendo esse valor; seria mais sensato publicar o resultado fornecido pela equação (e possivelmente também seria mais discriminante os arredondamentos não serem apenas às décimas).

Apesar das críticas a que é sujeito o CVSS, talvez por ter sido pioneiro na medição da severidade e classificação do risco com base quantitativa, continua a ser o padrão em muitas áreas, nomeadamente sendo mandatário na cibersegurança do setor bancário. É, além disso, o indicador de severidade das vulnerabilidades que é usado pela NVD, o organismo do governo dos EUA que apoia a gestão de vulnerabilidades usando o *Security Content Automation Protocol*, competindo-lhe a tarefa, entre outras, de manter a base de dados de vulnerabilidades com métricas de impacto.

3.2 EPSS

O *Exploit Prediction Scoring System* (EPSS) regista a probabilidade de uma vulnerabilidade ser explorada nos 30 dias subsequentes, com indicação suplementar do correspondente percentil.

O cálculo dessas probabilidades é realizado por um algoritmo resultante de aprendizagem de máquina (*machine learning*) usando 1164 variáveis (entre as quais o score Base do CVSS, e o número de dias que decorreram desde a sua publicação) cobrindo um largo espectro de informação, ver descrição detalhada em <https://www.first.org/epss/model>, e em Jacobs *et al.* (2021). O treino da atual versão 2 usou *Gradient Boosting* (<https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/>) e regressão de Poisson.

A probabilidade indicada pelo EPSS é um guia na identificação das vulnerabilidades que devem ter prioridade no esforço de correção. Observe-se que sendo uma probabilidade, há que contar com falsos negativos e com falsos positivos.

Os pontos fortes do EPSS são a capacidade de calcular probabilidade de risco de um conjunto de vulnerabilidades, e consequentemente a probabilidade de uma empresa estar em risco de exploração quando usa *software* sujeito a um conjunto de vulnerabilidades, e também o facto de o cálculo ser dinâmico, o que é consequência de o algoritmo ser automaticamente implementado tendo em conta nova informação. Por exemplo, a vulnerabilidade CVE-2021-44228 (score CVSS 10), publicada em 10 de dezembro de 2021, começou por ter uma probabilidade de exploração estimada pelo EPSS em 0,355 em 11 de dezembro, em 13 de dezembro passou a 0,384, em 14 de dezembro a 0,300, em 15 de dezembro aumentou para 0,633, a 17 de dezembro para 0,944, a 18 de dezembro baixou para 0,633, mas a 12 de janeiro de 2022 voltou a ser 0,944. Por outro lado, só existe para vulnerabilidades já publicadas, não há uma calculadora que possa ser usada na fase de descoberta/reserva de CVE-ID.

A comparação da eficiência do CVSS v.3.1, EPSS v.1 e EPSS v.2 com as vulnerabilidades de novembro de 2021 usou, respetivamente, scores superiores a 8,6, probabilidades maiores do que 0,066 e probabilidades excedendo 0,149, a fim de ter nos três cenários cobertura de cerca de 50 %, conforme descrito na documentação sobre o EPSS. Esses limiares levaram a assinalar para correção respetivamente 25,3 %, 9,3 % e 4,7 % das vulnerabilidades.

No que respeita o CVSS v.3.1, houve tentativas de exploração a 5 % das vulnerabilidades assinaladas, enquanto com o EPSS v.1 a eficiência foi 12,9 % e com o EPSS v.2 foi

42,5 %, como revela a Figura 10.

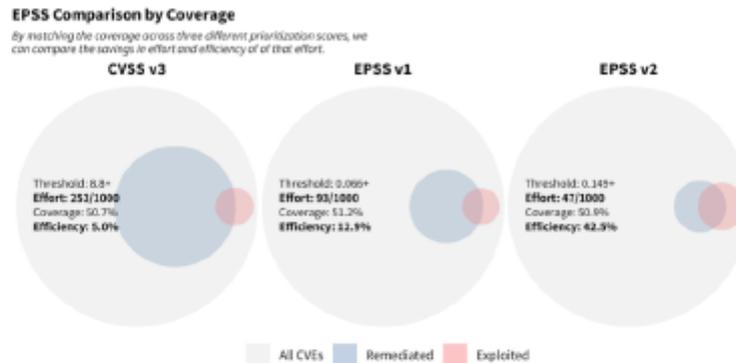


Figura 10: Eficiência do CVSS e do EPSS (<https://www.first.org/epss/model>).

Observa-se assim que o EPSS compara favoravelmente com o CVSS, e além disso teve uma evolução notável da versão 1 para a atual versão 3 (e a equipa tem a ambição de fazer atualizações trimestrais do algoritmo).

3.3 Avaliações alternativas: CTI e CWSS

Além do CVSS e do EPSS merece referência o *Cyber Threat Intelligence* (CTI), <https://fidelissecurity.com/resources/edu/cyber-threat-intelligence/>⁽⁴⁾, que é um dos índices usados na excelente base de dados <https://vuldb.com> para atualização diária do risco tendo em conta por um lado alarmes e ataques e por outro lado existência de correções. Mas não nos ocuparemos desta quantificação porque a possibilidade de consulta de informações na vuldb.com é muito limitada, quase de imediato é vedado acesso até se pagar valores muito elevados para prosseguir a utilização.

É também de referir o *Common Weakness Scoring System* (CWSS), <https://cwe.mitre.org/index.html>, com metodologia de classificação de "fragilidades" bem documentada e que será de ter em conta em qualquer projeto de normalização da avaliação de severidades de vulnerabilidades e riscos de exploração maliciosa.

4 Como tornar o CVSS dinâmico?

O êxito do CVSS deve-se em parte a disponibilizar uma calculadora de utilização simples, com documentação excelente, que inclusivamente permite às instituições que o desejem reavaliar o score usando métricas apropriadas para o seu perfil de risco. Mas essa flexibilidade tem como contraponto características estáticas, quando é evidente que seria desejável promover a variabilidade do score com o decorrer do tempo.

⁽⁴⁾ O CTI contém informação detalhada recolhida de forma planeada sobre as partes interessadas, as ameaças e as vulnerabilidades, sua análise e disseminação, contribuindo para os processos de decisão e reforço da segurança dos consumidores, e originando reconhecimento mais preciso das situações e a adoção de medidas defensivas mais adequadas.

4.1 Modificação de classificações nas métricas temporais *Exploit Code Maturity* e *Remediation Level*

Frühwirth and Männistö (2009) propuseram uma alteração da seleção de opções nas métricas temporais *Exploit Code Maturity* e *Remediation Level*. Não deixa de ser curioso que das três métricas temporais apenas proponham alteração das duas primeiras, pois só volvidos 12 anos Boechat *et al.* (2021) levantaram a questão da redundância das métricas temporais do CVSS, discutindo como se pode inferir atribuição de *Report Confidence* de *Exploit Code Maturity* e *Remediation Level*.

Temos sérias objeções à proposta de alteração de Frühwirth and Männistö (2009), que passamos a descrever:

No que se refere à métrica *Exploit Code Maturity*, consideram que a probabilidade de haver intrusão maliciosa deve ser estimada pelo ajustamento Pareto proposto por Frei *et al.* (2006)

$$P(x) = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^\alpha, \quad \alpha = 0,26, k = 0,00161,$$

onde x é o tempo decorrido após descoberta da vulnerabilidade. Este valor é comparado com um número pseudo-aleatório uniforme *rand*. Se $rand \leq P(x)$, considera-se que *Exploit Code Maturity* \leftrightarrow *High*, caso $rand > P(x)$, considera-se que *Exploit Code Maturity* \leftrightarrow *Unproven*.

Analogamente, no que se refere à métrica *Remediation Level*, a disponibilidade de *Patch* é calculada comparando um número pseudo-aleatório uniforme *rand* com o ajustamento Weibull de Frei *et al.* (2006)

$$W(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)^k, \quad \lambda = 0,209, k = 4,04.$$

Se $rand \leq W(x)$, considera-se que *Remediation Level* \leftrightarrow *Official Patch*, caso $rand > W(x)$, considera-se que *Remediation Level* \leftrightarrow *Unavailable*.

Não nos parece racional a regra de decisão por comparação do valor de funções de distribuição com um número pseudo-aleatório uniforme. Com o decorrer do tempo x teremos $F(x)$ a tomar valores próximos de 1, e portanto com grande probabilidade (o valor de $F(x)$) a opção de alterar a classificação vai ser efetiva — mas mesmo que tenha decorrido muito tempo, há a probabilidade $1 - F(x)$ de não ser feita modificação. E se o objetivo é dinamizar o CVSS, seria de comparar dia a dia com um *rand* gerado nesse dia, o que poderia levar a decisões contraditórias com o decorrer do tempo; ou se não se procedesse dessa forma, evitando situações paradoxais, estava a cair-se numa alternativa, inalterável, também ela estática. É uma das situações em que o acaso não nos parece um aliado fidedigno.

A outra grande objeção que temos a esta proposta é ela assentar nas modelações de Frei *et al.* (2006), que parte do pressuposto que os modelos adequados são ou Pareto ou Weibull — e usam uma parametrização em que a Pareto está no domínio de atração da Fréchet de máximos, e a Weibull é uma lei de extremos de mínimos, parece estranho tentarem ajustar aos mesmos dados modelos tão díspares⁽⁵⁾. E quando se observa a estimação dos

⁽⁵⁾ Observe-se, porém, que na fase inicial da gestão de vulnerabilidades as firmas produtoras tinham exploração "in the wild" pós-publicação, adiando-a enquanto possível, eventualmente para quando remediação

parâmetros nos ajustamentos Pareto, os valores têm variações anuais grandes, o que nos parecem ser um indicador forte de que a modelação feita é inadequada.

4.2 Alteração semanal do score Temporal

Santana *et al.* (2022) propõem (mas apenas para as vulnerabilidades cujo código de exploração seja desconhecido ou possua a classificação Alta) a alteração da equação

$$\text{Temporal} = \text{Roundup}(\text{Base} \times \text{ECM} \times \text{RL} \times \text{RC}),$$

em que ECM=*Exploit Code Maturity*, RL=*Remediation Level* e RC=*Report Confidence* são as métricas temporais do CVSS v.3.1, para a fórmula dinâmica

$$\text{Temporal} = \min\left(\text{Roundup}\left(\text{Base} \times \left(1 + \frac{7W}{R}\right) \times \text{ECM} \times \text{RL} \times \text{RC}\right), 10\right),$$

em que W é o número de semanas que decorreram desde a divulgação da vulnerabilidade, e R é um valor tabulado associado ao perfil de risco da organização que o aplica.

É uma alteração que obviamente tem o inconveniente de promover o incremento até ao valor máximo 10 se não ocorrer entretanto correção. Por outro lado, Santana *et al.* (2022) propõem também uma alteração da fórmula para cálculo do score Ambiental, e esse duplo objetivo leva-os a considerar um parâmetro R que contamina o score Temporal com considerações ambientais, com a consequência indesejável de o score Temporal não ter um valor único publicável.

Por outro lado, as métricas temporais são de uso facultativo, e na prática são muito pouco usadas — note-se, por exemplo, que no cálculo automático do EPSS uma das informações usadas é o score Base do CVSS, não interessa a modificação Temporal, e não teria qualquer sentido usar scores ambientais —, pelo que aparentemente o impacto desta proposta fica na prática limitado a reavaliações de scores feitas por instituições que queiram alterar o score Base para seu consumo interno.

4.3 Dinamização do CVSS tendo o tempo pós-divulgação

Apesar de discordarmos das propostas de Frühwirth and Männistö (2009), parece-nos interessante usar modelos para os dados de tempos do ciclo de vida das vulnerabilidades como base para modificar as características estáticas do CVSS.

Parece ponto assente que o risco de exploração das vulnerabilidades tende a aumentar na fase em que começam a ser conhecidas por cibercriminosos, nomeadamente se houver código de exploração publicamente disponível (*in the wild*), mas o interesse vai esmorecendo com o tempo, ou porque houve alguma forma de mitigação ou correção, ou porque entretanto surgiram outras vulnerabilidades mais apetitosas para a gula dos cibercruidores. Assim, a função de distribuição dos tempos de ciclos de vida das vulnerabilidades poderia ser usada como modificador do CVSS.

ou "patching" estivessem disponíveis; consequentemente — veja-se adiante o ciclo de vida das vulnerabilidades como considerado em Frei *et al.* (2006) — o tempo entre *discovery* e *disclosure* tenderia a ser grande, e o tempo entre *disclosure* e *patch* tenderia a ser breve, o que abona em favor da investigação de ajustamentos com modelos de máximos e de mínimos.

O nosso conhecimento é insuficiente para fazermos propostas bem fundamentadas, nomeadamente por limitações no acesso à base de dados *Vulnerability Database* (<https://vuldb.com/>) que regista de forma mais completa e fidedigna o ciclo de vida. Mas a título de exemplo, usando a duração do período que vai da divulgação à atualização, usando os registos de <https://www.cvedetails.com/>, propomos uma expressão que se inspira simultaneamente na ideia de Frühwirth and Männistö (2009) de usar o tempo decorrido e na modificação das métricas temporais de Santana *et al.* (2022).

Denotando F_D a função de distribuição do tempo entre duas ocorrências — no nosso exemplo, publicação e atualização — se admitirmos que a severidade cresce até atingir a mediana do tempo, decrescendo depois, um multiplicador simples com essas características é

$$R(x) = \begin{cases} 1 + F_D(x) & , 0 \leq F_D(x) \leq 0,5 \\ 1,5 - F_D(x) & , 0,5 < F_D(x) \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

que pode ser proposto para dinamizar a equação Temporal do CVSS:

$$\text{Temporal} = \min(\text{Roundup}(\text{Base} \times R(x) \times \text{ECM} \times \text{RL} \times \text{RC}), 10).$$

Não há qualquer razão para limitar esta forma de dinamizar o score Temporal, que é facultativo e menos usado, e por isso propomos mais genericamente a dinamização do score usando

$$\text{Base}^* = \min(\text{Roundup}(\text{Base} \times R(x)), 10).$$

Assim, se adotarmos o multiplicador definido em (1), o score vai crescendo até o tempo após publicação atingir a mediana, começando depois a decrescer, e tornando-se inferior ao score original a partir do 3.º quartil.

Sublinhamos que é apenas uma proposta exploratória, um conhecimento efetivo do fenómeno é que deve guiar quais os quantis que são adequados para o multiplicador R incrementar, e depois decrementar do score, e outras definições da sua expressão. É meramente um ensaio, cujos resultados comentaremos na Secção 5, quando passarmos à seleção mais adequada do modelo para o tempo que decorre entre publicação e atualização.

4.4 A tentação de modelar com leis-potência

I can resist anything except temptation.
Oscar Wilde, *Lady Windermere's Fan*.

No que se refere a modelação de tempos no ciclo de vida de vulnerabilidades, houve evoluções interessantes na sequência do trabalho pioneiro de Frei *et al.* (2006).

Holm (2013) considera a possibilidade de ajustamento com outros modelos de caudas pesadas, advogando como alternativa à Pareto uma lognormal (provavelmente porque a lognormal parece ter uma "assinatura" linear, veja-se adiante a discussão de leis-potência).

Allodi (2015) advoga modelos de caudas pesadas, especificamente com cauda pareti-ana, mas não estritamente Pareto, distribuições que são muitas vezes consideradas leis-potência em sentido lato.

Além disso, como anotámos na Secção 2, a partir de 2017, o número de vulnerabilidades reportadas aumentou de forma muito expressiva. E a ideia de que as empresas adiavam a divulgação para não alertarem cibercriminosos, na tentativa de a publicação ter uma data próxima da data em que se esperava haver correção, parece obsoleta.

Consequentemente, a ideia prevalente em trabalhos como os de Frei *et al.* (2006), Holm (2013) ou Allodi (2015), e referências que citam, de que a modelação deveria ser feita com caudas pesadas — nomeadamente leis-potência em sentido lato, ou pelo menos com "assinatura" como a Lognormal parcialmente exibe — ou com o modelo Weibull (a exponencial é uma Weibull de mínimos, embora nenhum desses trabalhos pareça dar-se conta disso), perdeu pertinência.

De facto, essa tendência pode decorrer da suposição que ao aproximar a data da divulgação da de correção estavam a obter dados de mínimos, levando por outro lado a mais dados de períodos entre descoberta e divulgação mais longos, ajustáveis por modelos de caudas pesadas.

Os livros de Schroeder (1991) e Sornette (2006), e artigos como o de Newman (2005) contribuíram para popularizar leis-potência, isto é, relações funcionais do tipo $f(x) = (\frac{x}{\delta})^{-\alpha}$, que aparentemente podem servir como modelos para muitos fenómenos naturais e para comportamentos humanos e suas consequências. Verificando-se $f(cx) = c^{-\alpha}f(x)$, todas as leis-potência com o mesmo parâmetro de escala α são equivalentes a menos de um fator constante.

Dado que $\ln(f(x)) = -\alpha \ln(x) + \alpha \ln(\delta)$, num referencial log-log a representação é uma reta, denominada *assinatura* da lei-potência. Mas sublinhe-se que se a representação gráfica de dados amostrais nesse referencial sugerir linearidade, tal não é condição suficiente para implicar ajustamento por uma lei-potência. É sobejamente sabido que a Lognormal, que não é uma lei-potência, pode gerar amostras que exibem esse comportamento de assinatura linear, veja-se Mitzenmacher (2004), Bee (2022) ou, num estilo antigo mas fascinante, Belevitch (1959).

O modelo Pareto (α, δ) com parâmetros $\alpha, \delta > 0$, com função densidade de probabilidade

$$f(x) = \frac{\alpha}{\delta} \left(\frac{x}{\delta}\right)^{-\alpha-1} \mathbb{I}_{[\delta, \infty)}(x),$$

é o exemplo clássico de uma lei-potência estatística, em sentido estrito. Note-se que também a cauda direita $1 - F(x) = (\frac{x}{\delta})^{-\alpha}$ é uma lei-potência. Observe-se ainda, com alguma informalidade, que se $\{X_k\}_{k=1}^{\infty}$ forem variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.), $X_k \stackrel{d}{=} X \sim \text{Pareto}(\alpha, 1)$, em que sem perda de generalidade usamos $\delta = 1$ para aligeirar as notações, e denotando por $M_n = \max(X_1, \dots, X_n)$,

$$F_{\frac{M_n}{n^{\frac{1}{\alpha}}}}(x) = F_X^n\left(n^{\frac{1}{\alpha}}x\right) = \left[1 - \frac{x^{-\alpha}}{n}\right]^n I_{[\frac{1}{n}, \infty)}(x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} e^{-x^{-\alpha}} I_{[0, \infty)}(x) = \Phi_{\alpha}(x),$$

ou seja, obtém-se a lei de máximos Fréchet(α). Dizemos que a variável [respetivamente distribuição] Pareto está no domínio de atração da variável [respetivamente distribuição] Fréchet.

Em sentido lato, em Estatística, as leis-potência — ou com mais rigor, as distribuições com cauda direita paretiana — são distribuições com cauda direita $1 - F(x) = x^{-\alpha}L(x)$,

onde $L(\cdot)$ é uma função de variação lenta no sentido de Karamata (1930), ou seja $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{L(tx)}{L(x)} = 1$, para todo $t > 0$. Obviamente esta definição implica invariância de escala assintótica, e a sua expressão analítica controla a forma e extensão da cauda esquerda da distribuição. Observe-se que as leis-potência estritas Pareto correspondem a função de variação lenta L constante e limite inferior do suporte δ .

A condição $1 - F(x) = x^{-\alpha}L(x)$, com $L(\cdot)$ uma função de variação lenta, é em geral expressa dizendo que a lei F tem cauda direita de variação regular de Karamata com expoente α . Prova-se que as distribuições com cauda direita de variação regular com expoente $\alpha > 0$ estão no domínio de atração da lei de máximos Fréchet(α). Para informação de base sobre variação regular e implicações em convergência para leis limites estáveis veja-se Feller (1971) (VIII-8 and VIII-9, pp. 275–284) e Kevei (2019). A estimação do expoente de variação regular foi tratada por Hall (1982), e Davis and Resnick (1984) abordaram de forma mais abrangente a estimação de caudas no contexto de modelação de valores extremos. Informação detalhada pode ser consultada em Bingham *et al.* (1989).

Devido à sua aparente simplicidade, as leis-potência tornaram-se ubíquas numa vasta diversidade de áreas de investigação, muito frequentemente com estimativas de α inferiores a 3, o que implica caudas pesadas. Esta invasão de modelação com leis-potência tem frequentemente racionalidade duvidosa e é abusiva, veja-se *The Econophysics Blog* (2006), Shalizi (2007), e Stumpf and Porter (2012), p. 665, linhas 12–18 da primeira coluna, que não hesitam em considerar abusivo o uso imoderado de leis-potência na modelação de dados empíricos, pois os dados disponíveis são em geral insuficientes e a racionalidade de tal escolha parcial, sendo conseqüentemente esse ajustamento cientificamente inútil.

Como já referido, Allodi (2015) advogou modelação paretiana de diversas variáveis relevantes no estudo de vulnerabilidades, adotando a metodologia de Clauset *et al.* (2009) no que se refere à estimação do limiar que delimita a assinatura da lei-potência e o seu expoente. Foi um trabalho inovador, mas a razoabilidade de usar modelos de cauda paretiana tem base meramente empírica, não é feita a ligação a comportamentos extremos.

4.5 Alguns modelos com caudas pesadas — Pareto generalizada, leis de extremos, domínios de atração de distribuições extremas, leis max-geo-estáveis e seus domínios de atração

All models are wrong but some are useful.
George E. P. Box, 1978

Na abordagem clássica de Fisher and Tippett (1928) e de Gnedenko (1943), era habitual falar de três tipos de leis de máximos, na forma centrada e reduzida:

- Fréchet(α), $\alpha > 0$:

$$\Phi_{\alpha}(x) = \begin{cases} 0 & , x < 0 \\ \exp(-x^{-\alpha}) & , x \geq 0 \end{cases};$$

- Gumbel:

$$\Lambda(x) = \exp(-e^{-x}) I_{\mathbb{R}}(x);$$

- Weibull(α), $\alpha > 0$:

$$\Psi_{\alpha}(x) = \begin{cases} \exp(-(-x)^{\alpha}) & , x < 0 \\ 1 & , x \geq 0 \end{cases}$$

Atualmente é em geral mais expedito usar uma expressão única, denominada distribuição *General Extreme Value* (GEV), definida por

$$\text{GEV}_{\xi,\lambda,\delta}(x) = \begin{cases} \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-\lambda}{\delta} \right) \right] & , \xi = 0 \\ \exp \left[-\left(1 + \xi \frac{x-\lambda}{\delta} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right] & , \xi \neq 0 \end{cases}$$

onde $\xi, \lambda \in \mathbb{R}$, $\delta > 0$ e $\xi \frac{x-\lambda}{\delta} > -1$, cujo suporte tem limiar esquerdo $\lambda - \frac{\delta}{\xi}$ se $\xi > 0$ ou limite direito $\lambda - \frac{\delta}{\xi}$ se $\xi < 0$.

Note-se que existe uma relação estrita com a distribuição generalizada de Pareto,

$$\text{GP}_{\xi,\lambda,\delta}(x) = \begin{cases} 1 - \exp \left(-\frac{x-\lambda}{\delta} \right) & , \xi = 0 \\ 1 - \left(1 + \xi \frac{x-\lambda}{\delta} \right)^{-\frac{1}{\xi}} & , \xi \neq 0 \end{cases}$$

cujo suporte tem limiar esquerdo λ se $\xi > 0$, e é $[\lambda, \lambda - \frac{\delta}{\xi}]$ se $\xi < 0$, uma vez que $\text{GEV}_{\xi,\lambda,\delta}(x) = \exp(\text{GP}_{\xi,\lambda,\delta}(x) - 1)$.

Frequentemente os dados disponíveis são "sobras" de um processo de filtragem, em que cada observação original é mantida com probabilidade p ou descartada com probabilidade $q = 1 - p$ (filtragem, ou emagrecimento (*thinning*) geométrico).

Denotando por M_N o máximo das $N \sim \text{Geométrica}(p)$ "sobras", o teorema da probabilidade total imediatamente estabelece que

$$F_{M_N}(x) = \sum_{k=1}^{\infty} F_X^k(x) p q^{k-1} = \frac{p F_X(x)}{1 - q F_X(x)} \implies F_X(x) = \frac{F_{M_N}(x)}{p + q F_{M_N}(x)}$$

Isto levou Rachev and Resnick (1991) a concluírem que as leis limites estáveis de máximos de sucessões de variáveis i.i.d. após emagrecimento geométrico, que abreviadamente denominamos leis max-geo-estáveis, se obtêm das clássicas leis estáveis de máximos usando a expressão

$$\text{TGEV}(x) = \frac{1}{1 - \ln \text{GEV}(x)}$$

(de *Thinned*). Assim, as formas padronizadas são:

- LogLogística(α), $\alpha > 0$: ${}^s\Phi_{\alpha}(x) = \frac{1}{1 - \ln \Phi_{\alpha}(x)} = \begin{cases} 0 & , x < 0 \\ \frac{1}{1 + x^{-\alpha}} & , x \geq 0 \end{cases}$;
- Logística: ${}^s\Lambda(x) = \frac{1}{1 - \ln \Lambda(x)} = \frac{1}{1 + e^{-x}} I_{\mathbb{R}}(x)$;

- RevLogLogística(α), $\alpha > 0$: $g\Psi_\alpha(x) = \frac{1}{1 - \ln \Psi_\alpha(x)} = \begin{cases} \frac{1}{1 + (-x)^\alpha} & , x < 0 \\ 1 & , x \geq 0 \end{cases}$.

A caracterização dos domínios de atração das leis max-geo-estáveis é idêntica à caracterização no que se refere a leis max-estáveis clássicas. Assim, vamos continuar a considerar o caso de distribuição parente com cauda direita paretiana, $1 - F(x) = x^{-\alpha}$ mas deixa de fazer sentido usar apenas caudas pesadas. De facto, o máximo de sucessões geometricamente filtradas é quase certamente inferior ao máximo da sucessão que a originou, ou seja as variáveis aleatórias TGEV são estocasticamente dominadas pelas variáveis GEV.

5 Modelação do número de dias entre publicação e atualização de vulnerabilidades

Nesta fase exploratória, recolhemos uma amostra (amostragem sistemática) de 2 % dos dados das 20 171 vulnerabilidades do ano 2021 (tamanho da amostra: $n = 405$) registadas em <https://www.cvedetails.com/> (opções: *Vulnerability by Date, CVE Number Ascending*).

Com base nessa amostra obtivemos o número de dias que decorreram entre a data de publicação e a data de atualização, para ajustamento de um modelo adequado. Os dois *outliers* severos foram eliminados da amostra por forma a robustecer a análise.

Começamos por registar algumas características amostrais relevantes:

Mín.	Q_1	Q_2	Média	Q_3	Máx.	Moda	Desv. padrão	Assimetria	Achatamento
1	4	8	94,67	150,5	575	6	153,92	1,55	0,99

onde Q_1 , Q_2 e Q_3 , são, respetivamente, o 1.º quartil, 2.º quartil (mediana) e 3.º quartil, e representar, após descartar os dois *outliers* severos, a caixa-com-bigodes, a função de distribuição empírica e um histograma, em que considerações de periodicidade nos levaram a escolher $h = 7$ dias para amplitude de classe (Figura 11).

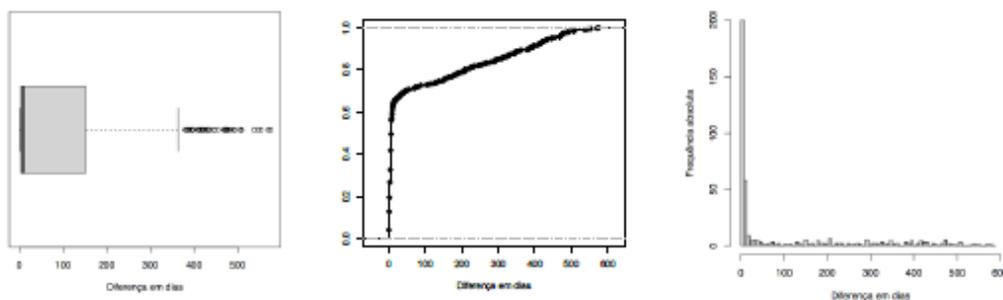


Figura 11: Representações gráficas para os dados.

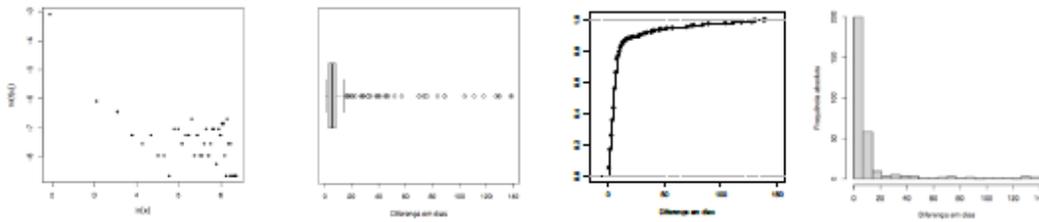


Figura 12: Representações gráficas para os dados censurados.

5.1 Lognormal e modelos com cauda direita paretiana

Na sequência das observações feitas nas Subsecções 4.4 e 4.5, analisámos o ajustamento com Pareto (Par), Lognormal (LN), Loglogística (LLog), Geral de Valores Extremos (GEV), Pareto Generalizada (GP) e lei-potência (PL). A estimação dos parâmetros foi feita sempre que possível por verosimilhança máxima, e nos casos excecionais usando as recomendações em Clauset *et al.* (2009) ou em Fedotenkov (2020), Hall (1982) e Davis and Resnick (1984).

No que se refere ao ajustamento com uma lei-potência há que chamar a atenção para alguma alteração na análise dos dados, justificada pela assinatura linear censurando a amostra à direita de 148, que passamos a descrever:

Num referencial log-log, observa-se uma "assinatura" quando $0 < \ln x < 5$, ou seja, quando $1 < x < 148,4$, existindo uma mancha aleatória de pontos para a direita de $\ln 5$. Isso levou-nos a considerar a subamostra dos $n = 301$ valores inferiores ou iguais a 148. Recalculando algumas características amostrais, obtemos

Mín.	Q_1	Q_2 =Moda	Média	Q_3	Máx.	Desv. padrão
1	3	6	12,79	8	139	23,41

e onde na Figura 12 se exibem as alterações observadas.

Observe-se que a existência de algumas classes com frequência absoluta nula com $h = 7$ nos levou a considerar neste contexto classes com $h = 14$, reduzindo desta forma o número de classes com frequência nula para dois, que foram depois agrupadas com uma classe adjacente. Assim sendo, no primeiro gráfico da Figura 12, x representa o ponto médio da classe e $f(x)$ o quociente entre a frequência relativa e a amplitude da classe, por forma a que o histograma correspondente tenha uma área igual a 1.

A admissibilidade do ajustamento foi feita com os testes de Kolmogorov-Smirnov (KS), Anderson-Darling (AD) e Cramér-von Mises (CvM). Os critérios de informação de Akaike (AIC) e bayesiano (BIC) são a base de comparação para escolher o ajustamento mais adequado. Pode parecer redundante usar estes três testes, que podem ter (e têm efetivamente em alguns casos) resultados discordantes. No entanto, um aspeto positivo do teste AD é dar também peso às observações extremas, ao contrário do teste KS, enquanto o teste CvM, pondera mais os valores centrais. De um modo geral, o teste KS é o mais utilizado, mas

Quadro 1: Resultados dos testes de KS, AD e CvM, modelos com cauda direita "pesada".

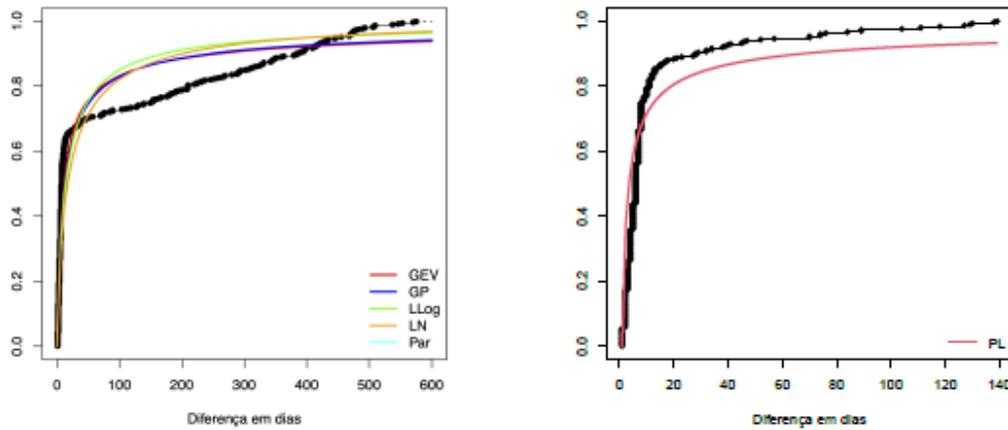
	KS	AD	CvM	AIC	BIC
Pareto					
$\hat{\alpha} = 0,35 (0,018)$ $\hat{\delta} = 1$	— ($D_n = 0,193$)	0,001 ($A_n^2 = \infty$)	0,556 ($\omega_n^2 = 3,404$)	3926,3	3930,3
Lognormal					
$\hat{\lambda} = 2,83 (0,096)^*$ $\hat{\delta} = 1,93 (0,069)^*$	0,0002 ($D_n = 0,212$)	0,007 ($A_n^2 = 22,144$)	0,084 ($\omega_n^2 = 4,007$)	3958,9	3966,9
Loglogística					
$\hat{\lambda} = 1$ $\hat{\delta} = 11,53 (1,418)$ $\hat{\alpha} = 0,70 (0,029)$	— ($D_n = 0,147$)	0,096 ($A_n^2 = 4,515$)	0,289 ($\omega_n^2 = 0,640$)	3849,9	3857,9
GEV — General Extreme Value					
$\hat{\lambda} = 6,20 (0,525)$ $\hat{\delta} = 9,54 (1,037)$ $\hat{\xi} = 1,70 (0,089)$	— ($D_n = 0,133^*$)	0,295 ($A_n^2 = 9,979$)	0,039 ($\omega_n^2 = 1,562$)	3878,9	3890,9
GP — Generalized Pareto					
$\hat{\lambda} = 1$ $\hat{\delta} = 8,64 (0,951)$ $\hat{\xi} = 1,76 (0,132)$	— ($D_n = 0,165$)	0,001 ($A_n^2 = \infty$)	0,024 ($\omega_n^2 = 1,090$)	<u>3798,0</u>	<u>3810,0</u>
PL — Power Law					
$\hat{\alpha} = 1,54 (0,031)$ $x_{\min} = 1$	— ($D_n = 0,277$)	0,001 ($A_n^2 = \infty$)	0,015 ($\omega_n^2 = 1,141$)	2077,5	2081,2

* Estimativas para os parâmetros do logaritmo da variável aleatória.

uma vez que os parâmetros são estimados os valores de prova p a usar devem ser os da modificação de Lilliefors, quando exista. Porém, na inexistência do valor p com a modificação de Lilliefors, o valor observado da estatística de teste KS (D_n) pode ser encarado como um rudimento de comparação entre modelos.

No Quadro 1, apresentamos os resultados obtidos, indicado o valor p com a modificação de Lilliefors para o teste KS apenas quando existir. Nas Figuras 13a e 13b, apresentamos as funções de distribuição empíricas, cotejando com os ajustamentos que investigamos.

Repare-se que com a aplicação de ambos os testes de AD e CvM se obtém evidência a favor do ajustamento com a Loglogística, apesar de não se ter obtido com este ajustamento os menores valores de AIC e BIC. Os menores valores são atingidos com a Pareto generalizada, mas como o seu ajustamento não passa no crivo de nenhum teste, não deve ser considerada. A evidência a favor de um melhor ajustamento com a GEV também é de



(a) Ajustamentos GEV, GP, LLog, LN e Par.

(b) Ajustamento lei-potência.

Figura 13: Função de distribuição empírica (linha a preto) e ajustamentos.

certa forma suportada (apenas com o teste de AD), observando-se valores de AIC e BIC ligeiramente superiores aos da Loglogística. No entanto, é com a GEV que se observa um menor valor na estatística de teste de KS, que mede a distância máxima entre as funções de distribuição empírica e teórica, embora os valores p do teste na sua modificação de Lilliefors não tenham sido obtidos (exceto para a Lognormal).

Por outro lado, o facto do índice extremal ξ da GEV ajustada apresentar uma estimativa positiva ($\hat{\xi} = 1,70$), consequentemente Fréchet, onde $\alpha = 1/\xi$ ($\hat{\alpha} = 0,59$), está em jogo uma lei de caudas pesadas. Além disso, a Loglogística que aparenta ter melhor ajustamento aos dados, com estimativa para o parâmetro de forma $\hat{\alpha} = 0,70$, está no domínio da atração da GEV, onde $\hat{\xi} = 1/\hat{\alpha} = 1,42$. Observe-se também que o ajustamento com a lei-potência, onde foram seguidos para o efeito os procedimentos indicados em Clauset *et al.* (2009) e Holm (2013), mostra-se inadequado.

Para fortalecer os argumentos a favor de selecionar a Loglogística, usamos o teste de Vuong para a seleção de modelos estritamente "não aninhados" (*non-nested*), em oposição à GEV, que de todos os modelos ajustados é o que apresenta menor valor na estatística de KS, para além de ter os segundos valores mais baixos de AIC e BIC de entre os modelos que passam num teste. Começamos por dar indicações breves sobre este teste que foi adaptado ao nosso contexto.

Sejam $F_{\theta} = \{f(\cdot; \theta) : \theta \in \Theta\}$ e $G_{\gamma} = \{g(\cdot; \gamma) : \gamma \in \Gamma\}$ dois modelos concorrentes não aninhados, isto é, $F_{\theta} \cap G_{\gamma} = \emptyset$. Para uma realização (x_1, \dots, x_n) de uma amostra aleatória (X_1, \dots, X_n) , a estatística do teste de Vuong baseia-se na razão de verosimilhanças

$$LR_n = LR_n(\hat{\theta}, \hat{\gamma}) = L_n^f(\hat{\theta}) - L_n^g(\hat{\gamma}) = \sum_{i=1}^n \ln \frac{f(x_i; \hat{\theta})}{g(x_i; \hat{\gamma})}.$$

Sob a hipótese nula de os dois modelos F_θ e G_γ serem equivalentes,

$$n^{-1/2}LR_n(\hat{\theta}, \hat{\gamma})/\hat{\omega}_n \xrightarrow{d} N(0, 1),$$

onde $\hat{\omega}_n$ é

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\ln \frac{f(x_i; \hat{\theta})}{g(x_i; \hat{\gamma})} \right]^2 - \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{f(x_i; \hat{\theta})}{g(x_i; \hat{\gamma})} \right]^2.$$

Consequentemente, valores positivos elevados para a estatística LR_n mostram evidência a favor de F_θ , enquanto valores negativos baixos a favor de G_γ .

Comparando os modelos Loglogística (F_θ) e GEV (G_γ) ajustados com o teste de Vuong, obtemos $LR_n = 13,210$ ($\hat{\omega}_n = 0,270$), com valor $p = 0,007$. Logo, há evidência a favor do modelo Loglogística ser o melhor.

5.2 Modelo hiperexponencial

Os numerosos *outliers* da amostra que usamos podem indicar que há um grupo maioritário de vulnerabilidades em que o período que decorre entre publicação e atualização é curto (em geral inferior a 30, se atendermos aos valores da moda=mediana=6 e do desvio padrão=23,41 da amostra censurada, muito assimétrica, que usámos para ajustamento com lei-potência), e um conjunto menos expressivo de vulnerabilidades em que o referido período é longo. Isso é bem visível na função de distribuição empírica, que indicia que temos de facto um modelo de mistura, e é decerto a razão fundamental para que os modelos tradicionais, usados na Subsecção 5.1, serem inadequados.

Feldman and Whitt (1998) mostraram que o modelo de misturas de exponenciais, que denotamos genericamente por Hiperexponencial $(\pi_1, \dots, \pi_m; \theta_1, \dots, \theta_m)$, pode ser um ajustamento alternativo quando a cauda direita proporciona abundância de valores muito afastados de moda, mediana e média. Uma variável aleatória X tem distribuição hiperexponencial com parâmetros $\pi_1, \dots, \pi_m, \theta_1, \dots, \theta_m$ se tiver função de distribuição

$$F_X(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ \sum_{i=1}^m \pi_i (1 - e^{-\theta_i x}) & x > 0 \end{cases}$$

onde $\pi_i, \theta_i > 0, i = 1, \dots, m$, e $\sum_{i=1}^m \pi_i = 1$; ou seja, X é uma mistura convexa de m distribuições exponenciais.

Sendo aparentemente o caso aqui, investigámos a mistura de duas e de três exponenciais, obtendo as estimativas registadas no Quadro 2 através do algoritmo EM.

Observa-se que no caso $m = 3$ as aproximações às milésimas das estimativas $\hat{\theta}_1$ e $\hat{\theta}_2$ são indistinguíveis, e além disso, os AIC e BIC são superiores aos correspondentes valores para $m = 2$. O melhor ajustamento é com uma mistura de duas componentes, representado na Figura 14, que supera em termos de critérios de informação os ajustamentos "clássicos" ensaiados na Subsecção 5.1 com os mesmos dados.

Quadro 2: Resultados dos testes de KS, AD e CvM, ajustamentos hiperexponenciais.

	KS	AD	CvM	AIC	BIC
$m = 2$					
$\hat{\pi}_1 = 0,649$	—	0,772	0,197	3761,7	3777,6
$\hat{\pi}_2 = 0,351$	$(D_n = 0,141)$	$(A_n^2 = 2,209)$	$(\omega_n^2 = 0,715)$		
$\hat{\theta}_1 = 0,163$					
$\hat{\theta}_2 = 0,004$					
$m = 3$					
$\hat{\pi}_1 = 0,638$	—	0,263	0,706	3765,6	3789,6
$\hat{\pi}_2 = 0,011$	$(D_n = 0,141)$	$(A_n^2 = 3,532)$	$(\omega_n^2 = 0,430)$		
$\hat{\pi}_3 = 0,351$					
$\hat{\theta}_1 = 0,163$					
$\hat{\theta}_2 = 0,163$					
$\hat{\theta}_3 = 0,004$					

5.3 Ajustamento hiperexponencial e dinamização do CVSS

Vulnerabilidades e sua exploração são fenómenos cada vez mais frequentes, e por isso optámos por modelar o tempo entre publicação e atualização com uma amostra de dados de CVE atualizadas em 2021 para estudar o efeito nos scores atribuídos em 2022 (na base de dados CVE *Details* só estão disponibilizados, na data em que este estudo foi realizado, scores e datas de atualização até 15 de julho de 2022).

Optando pelo ajustamento mais adequado, hiperexponencial, observa-se que enquanto o valor médio e o desvio padrão da componente predominante é 6,15 (≈ 1 semana), o valor médio da mistura é 94,67 (≈ 3 meses) e o desvio padrão 194,58 ($\approx 6,5$ meses).

Conjugando isto com o que já observámos, no início da Subsecção 5.1, sobre a subamostra de 403 elementos obtida quando descartámos *outliers*, em vez do multiplicador \mathcal{R} definido em (1) podemos considerar que a modificação temporal do score deve crescer durante o mês após publicação (por exemplo $1 + F(x)$), crescer mais lentamente entre 1 mês e 2 meses (por exemplo $1 + c_1(x)F^2(x)$, em que $c(x)$ tem a função de dar continuidade a \mathcal{R}), e decrescer dos 2 meses até aos 195 dias (por exemplo $1 + c_2(x)[F(90) - F(x)]$, de tal forma que ao fim de três meses estaríamos com o score inicial, e a partir daí tornar-se-ia inferior ao score inicial), mantendo-se finalmente constante a partir de $x = 195$.

Eventualmente mais adequado é usar os quantis da distribuição ajustada (idealmente com dados dos CVE atualizados por exemplo no trimestre anterior, em vez de uma amostra sistemática como a que usámos). Um possível exemplo de multiplicador, que levaria a crescer até à mediana decrescendo depois entre a mediana e o 3.º quartil, mantendo-se

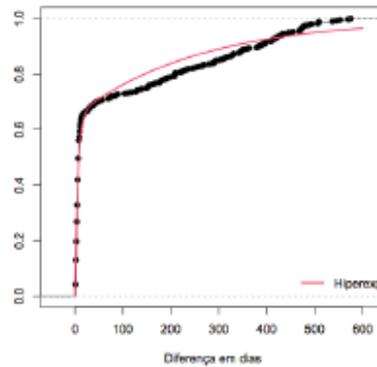


Figura 14: Função de distribuição empírica e ajustamento hiperexponencial.

depois constante (e com o efeito de atribuir um score inferior ao original), é

$$R^*(x) = \begin{cases} 0 & , 0 < x \\ 1 + F^2(x) & , 0 \leq x < Q_1 \\ 1 + F^2(Q_1) + \sqrt{[F(x) - F(Q_1)]F(x)} & , Q_1 \leq x < Q_2 \\ R^*(Q_2) + [F(x) - F(Q_2)][F(Q_2) - F(x)] & , Q_2 \leq x < Q_3 \\ R^*(Q_3) & , Q_3 \leq x < \omega_F \end{cases}$$

onde ω_F representa o limite superior do suporte de F .

O passo seguinte será comparar multiplicadores, o que poderá ser feito em termos do número de mudanças de *Medium* para *High*, de *High* para *Critical*, e o no sentido inverso, e concomitantemente os intervalos em que essas mudanças ocorrem. São um indicadores informais da eficácia dos multiplicadores R na dinamização do CVSS. É trabalho ainda em fase exploratória.

6 Conclusões

Embora o intuito inicial da nossa investigação seja alterar o estatuto estático do CVSS, o desenvolvimento do trabalho levou-nos a algumas reflexões sobre a evolução passada e esperada do conceito de medição.

Tal como a lei dos grandes números e o teorema limite central se tornaram meios auxiliares de medição não físicos, e a regressão viabilizou medir uma variável para avaliar outra⁽⁶⁾, temos a convicção de que a transição digital levará a Metrologia a evoluir no sentido de englobar outros meios auxiliares não físicos de medição, como as métricas e os índices CVSS e algoritmos de aprendizagem de máquina como os que avaliam o EPSS.

⁽⁶⁾ Um de nós teve um instrumento para medir diariamente o teor de glucose, e ao ler a descrição técnica do aparelho que usava, descobriu que este media efetivamente o ângulo de refração da luz no sangue depositado na tira, e transformava essa medição na avaliação do teor de glucose.

No caso de avaliação da severidade de vulnerabilidades ou probabilidade de risco de exploração, vai implicar trabalho árduo de harmonização e eventualmente uma desejável evolução para normalização. Estamos longe de uma situação satisfatória, por exemplo com um ficheiro (que é uma coleção de dados, não uma amostra aleatória), contendo as vulnerabilidades que em abril de 2021 a março de 2022 tiveram classificação *Functional* ou *High* no que respeita à métrica *Exploit Code Maturity*, pesquisando o CVE-ID noutras bases de dados para obter CTI e EPSS, tivemos a ingrata surpresa de constatar que as correlações empíricas eram $\text{corr}(\text{CVSS}, \text{CTI}) = -0,12$, $\text{corr}(\text{CTI}, \text{EPSS}) = -0,01$ e $\text{corr}(\text{CVSS}, \text{EPSS}) = 0,14$, indicando que são scores não correlacionados. Assim, como guias de priorização na urgência de remendar vulnerabilidades, embora sejam frequentemente concordantes, não oferecem uma confortável sensação de segurança a que uma área tão sensível economicamente aspira.

Referências

- [1] Akaike, H. (1987). Factor Analysis and AIC. *Psychometrika*, 52, 317–332.
- [2] Allodi L. (2015). The Heavy Tails of Vulnerability Exploitation. In Piessens F., Caballero J., Bielova N. (Eds.), *Engineering Secure Software and Systems. ESSoS 2015*. Lecture Notes in Computer Science (Vol. 8978). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15618-7_11
- [3] Bee, M. (2022). On Discriminating between Lognormal and Pareto Tail: an Unsupervised Mixture-Based Approach. *Advances in Data Analysis and Classification*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11634-022-00497-4>
- [4] Belevitch, V. (1959). On the Statistical Laws of Linguistic Distributions. *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, Ser. I*, 73, 310–326. <http://www.csl.sri.com/users/neumann/belevitch.pdf>
- [5] Bingham, N. H., Goldie, C. M., and Teugels, J. L. (1989). *Regular Variation*. Cambridge University Press.
- [6] Boechat, F., Ribas, G., Senos, L., Bicudo, M., Nogueira, M., Aguiar, L., and Menasché, D. (2021). Is Vulnerability Report Confidence Redundant? Pitfalls using Temporal Risk Scores. *IEEE Security and Privacy Magazine*, 19(4), 44–53.
- [7] Box, G. E. P. (1979). Robustness in the strategy of scientific model building. In Launer, R.L. and Wilkinson, G.N. (Eds.), *Robustness in Statistics*, Academic Press, pp. 201–236.
- [8] Clauset, A., Shalizi, C. R., and Newman, M. E. J. (2009). Power-Law Distributions in Empirical Data. *SIAM Review*, 51(4), 661–703. Companion implementation of the methods in <https://aaronclauset.github.io/powerlaws/>.
- [9] CVSS — *Common Vulnerability Scoring System* version 3.1: Specification Document: <https://www.first.org/cvss/specification-document>; User Guide: <https://www>.

- first.org/cvss/user-guide; Examples Document: <http://www.first.org/cvss/examples>; Calculator: <https://www.first.org/cvss/calculator/3.1>.
- [10] Davis, R., and Resnick, S. (1984). Tail Estimates Motivated by Extreme Value Theory. *Annals of Statistics*, 12, 1467–1487.
- [11] Eling, M., Elvedi, M., and Falco, G. (2022). The Economic Impact of Extreme Cyber Risk Scenarios. *North American Actuarial Journal*, 1–15. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10920277.2022.2034507>
- [12] Fedotenkov, I. (2020). A Review of More than One Hundred Pareto-Tail Index Estimators. *Statistica*, 80(3), 245–299. <https://doi.org/10.6092/issn.1973-2201/9533>
Codes in <http://ifedotenkov.com/estimators.txt>
- [13] Feldmann, A., and Whitt, W. (1998). Fitting Mixtures of Exponentials to Long-tail Distributions to Analyze Network Performance Models. *Performance Evaluation*, 31(3-4), 245–279. <http://www.columbia.edu/~ww2040/FittingMixturesPerfEval98.pdf>
- [14] Feller, W. (1971). *An Introduction to Probability Theory and its Applications*. Vol. II (2nd ed.). Wiley, New York.
- [15] Fisher, R.A., and Tippett, L.H.C. (1928). Limiting Forms of the Frequency Distribution of the Largest or Smallest Members of a Sample. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 24, 180–190. <http://dx.doi.org/10.1017/S0305004100015681>
- [16] Frei, S., May, M., Fiedler, U., and Plattner, B. (2006). Large-Scale Vulnerability Analysis. *Proceedings of the 2006 SIG-COMM Workshop on Large-Scale Attack Defense*, ACM, 131–138.
- [17] Frühwirth, C., and Männistö, T. (2009). Improving CVSS-Based Vulnerability Prioritization and Response with Context Information. *3rd International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement*, 535–544. IEEE.
- [18] Gnedenko, B. V. (1943). Sur la Distribution Limite du Terme Maximum d’une Série Aléatoire. *Annals of Mathematics*, 44(3), 423–453. doi : 10.2307/1968974, JSTOR1968974
- [19] Hall, P. (1982). On Some Simple Estimates of an Exponent of Regular Variation. *Journal of the Royal Statistical Society, B*, 44(1), 37–42.
- [20] Holm, H. (2013). A large-Scale Study of the Time Required to Compromise a Computer System. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 11(1), 2–15. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:651157/FULLTEXT02.pdf>
- [21] Jacobs, J., Romanosky, S., Edwards, B., Roytman, M., and Adjerid, I. (2021). Exploit Prediction Scoring System. *Digital Threats Research and Practice*, 2(3), 1–17. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3436242>
- [22] Karamata, J. (1930). Sur un Mode de Croissance Régulière des Fonctions. *Mathematica (Cluj)*, 4, 38–53.

-
- [23] Kevei, P. (2019). Regularly Varying Functions. http://www.math.u-szeged.hu/~kevei/tanitas/1819regvar/RegVar_notes.pdf
- [24] Mitzenmacher, M. (2004). A Brief History of Generative Models for Power Law and Lognormal Distributions. *Internet Mathematics*, 1(2), 226–251. <http://www.eecs.harvard.edu/~michaelm/postscripts/im2004a.pdf>
- [25] Newman, M.E.J. (2005). Power Laws, Pareto Distributions and Zipf’s Law. *Contemporary Physics*, 46(5), 323–351.
- [26] Qualys Research Report (2005). Laws of Vulnerabilities. <http://www.qualys.com/docs/Laws-Report.pdf>
- [27] Rachev, S. T., and Resnick, S. (1991). Max-Geometric Infinite Divisibility and Stability. *Stochastic Models*, 7, 191–218. <https://doi.org/10.1080/15326349108807184>
- [28] Santana, M., Oliveira de Sá, A., and Silva, P. (2022). SecScore — Priorização de Vulnerabilidades de Nova Geração. *INForum, Atas do 13º Simpósio de Informática*, Instituto Politécnico da Guarda, 357–368.
- [29] Schroeder, M. (1991). *Fractals, Chaos, Power Laws: Minutes from an Infinite Paradise*. Freeman, reedition Dover 2009.
- [30] Schwarz, G. E. (1978). Estimating the Dimension of a Model. *Annals of Statistics*, 6(2), 461–464.
- [31] Shalizi, C. R. (2007). So You Think You Have a Power Law? Well Isn’t That Special? bactra.org/weblog/491.html
- [32] Sornette, D. (2006). *Critical Phenomena in Natural Sciences: Chaos, Fractals, Self-organization and Disorder: Concepts and Tools*. Springer Series in Synergetics (2nd ed.). Heidelberg: Springer.
- [33] Stumpf, M. P. H., and Porter, M. A. (2012). Critical Truths about Power Laws. *Science*, 335(6069), 665–666.
- [34] The Econophysics Blog (2006). Tyranny of the Power Law (and Why We Should Become Eclectic). <http://econophysics.blogspot.com/2006/07/tyranny-of-power-law-and-why-we-should.html>
- [35] Tunggal, A. T. (2022). What is a Vulnerability? Definition + Examples, <https://www.upguard.com/blog/vulnerability>
- [36] Vuong, Q. H. (1989). Likelihood Ratio Tests for Model Selection and Non-Nested Hypotheses. *Econometrica*, 57, 307–333.
-

Análise estatística

O *software* estatístico usado foi o R: *A language and environment for statistical computing* (R Core Team, 2022), recorrendo também aos pacotes que se seguem:

e1071 (v. 1.7–11): *Misc Functions of the Department of Statistics, Probability Theory Group authors*. Autores: David Meyer, Evgenia Dimitriadou, Kurt Hornik, Andreas Weingessel, Friedrich Leisch, Chih-Chung Chang e Chih-Chen Lin.

gofest (v. 1.2–3): *Classical Goodness-of-Fit Tests for Univariate Distributions*. Autores: Julian Faraway, George Marsaglia, John Marsaglia e Adrian Baddeley.

evd (v. 2.3–6.1): *Functions for Extreme Value Distributions*. Autores: Alec Stephenson e Chris Ferro.

fitdistrplus (v. 1.1–8): *Help to Fit of a Parametric Distribution to Non-Censored or Censored Data*. Autores: Marie-Laure Delignette-Muller, Christophe Dutang, Regis Pouillot, Jean-Baptiste Denis e Aurelie Siberchicot.

mixtools (v. 1.2.0): *Tools for Analyzing Finite Mixture Models*. Autores: Derek Young, Tatiana Benaglia, Didier Chauveau, David Hunter, Ryan Elmore, Thomas Hettmansperger, Hoben Thomas e Fengjuan Xuan.

Financiamento: Investigação parcialmente financiada por Fundos Nacionais via FCT — Fundação para a Ciência e Tecnologia, projeto UIDB/00006/2020 (CEAUL).

Agradecimento: Os autores agradecem ao Professor S. Frei pela permissão para reproduzir a imagem da Figura 1a, à CVE para reproduzir a imagem da Figura 1b, à FIRST para reproduzir as imagens das Figuras 3, 4, 5, 6, 7 e 10, e ao Dr. D. Dugal para reproduzir as imagens das Figuras 15, 16 e 17.

Apêndice A — Métricas CVSS v.3.1

Métricas Base

Valores Base	{	$\mathbf{AV} - \textit{Attack Vector} = \begin{cases} \text{Network} & 0.85 \\ \text{Adjacent} & 0.62 \\ \text{Local} & 0.55 \\ \text{Physical} & 0.2 \end{cases}$
		$\mathbf{AC} - \textit{Attack Complexity} = \begin{cases} \text{Low} & 0.77 \\ \text{High} & 0.44 \end{cases}$
		$\mathbf{PR} - \textit{Privileges Required} = \begin{cases} \text{None} & 0.85 \\ \text{Low} & 0.62 \text{ (0.68)} \\ \text{High} & 0.27 \text{ (0.5)} \end{cases}$
		$\mathbf{UI} - \textit{User Interaction} = \begin{cases} \text{None} & 0.85 \\ \text{Required} & 0.62 \end{cases}$
		$\mathbf{S} - \textit{Scope} = \begin{cases} \text{Unchanged} \\ \text{Changed} \end{cases}$
		$\mathbf{C} - \textit{Confidentiality} = \begin{cases} \text{None} & 0 \\ \text{Low} & 0.22 \\ \text{High} & 0.56 \end{cases}$
		$\mathbf{I} - \textit{Integrity} = \begin{cases} \text{None} & 0 \\ \text{Low} & 0.22 \\ \text{High} & 0.56 \end{cases}$
		$\mathbf{A} - \textit{Availability} = \begin{cases} \text{None} & 0 \\ \text{Low} & 0.22 \\ \text{High} & 0.56 \end{cases}$

Equações das Métricas Base

ISS - Impact Sub-Score; **Imp** - Impact; **ExpI** - Exploitability; **BS** - BaseScore

$$\mathbf{ISS} = 1 - [(1 - \mathbf{C}) \times (1 - \mathbf{I}) \times (1 - \mathbf{A})]$$

$$\mathbf{Imp} = \begin{cases} 6.42 \times \mathbf{ISS} & \text{se } \mathbf{S} = \text{Unchanged} \\ 7.52 \times (\mathbf{ISS} - 0.029) - 3.25(\mathbf{ISS} - 0.02)^{15} & \text{se } \mathbf{S} = \text{Changed} \end{cases}$$

$$\mathbf{ExpI} = 8.22 \times \mathbf{AV} \times \mathbf{AC} \times \mathbf{PR} \times \mathbf{UI}$$

ScoreBase **BS** (RU_p — RoundUp):

$$\mathbf{BS} = \begin{cases} 0 & \text{se } \mathbf{Imp} = 0 \\ \text{RU}_p(\min(\mathbf{Imp} + \mathbf{ExpI}, 10)) & \text{se } \mathbf{S} = \text{Unchanged} \\ \text{RU}_p(\min(1.08 \times (\mathbf{Imp} + \mathbf{ExpI}), 10)) & \text{se } \mathbf{S} = \text{Changed} \end{cases}$$

Métricas Temporais

Valores Temporais	{	ECM – <i>Exploit Code Maturity</i> =	<table border="0"> <tr><td>Not Defined</td><td>1</td></tr> <tr><td>Unproven</td><td>0.91</td></tr> <tr><td>Proof-of-Concept</td><td>0.94</td></tr> <tr><td>Functional</td><td>0.97</td></tr> <tr><td>High</td><td>1</td></tr> </table>	Not Defined	1	Unproven	0.91	Proof-of-Concept	0.94	Functional	0.97	High	1
		Not Defined	1										
		Unproven	0.91										
Proof-of-Concept	0.94												
Functional	0.97												
High	1												
RL – <i>Remediation Level</i> =	<table border="0"> <tr><td>Not Defined</td><td>1</td></tr> <tr><td>Official Fix</td><td>0.95</td></tr> <tr><td>Temporary Fix</td><td>0.96</td></tr> <tr><td>Workaround</td><td>0.97</td></tr> <tr><td>Unavailable</td><td>1</td></tr> </table>	Not Defined	1	Official Fix	0.95	Temporary Fix	0.96	Workaround	0.97	Unavailable	1		
Not Defined	1												
Official Fix	0.95												
Temporary Fix	0.96												
Workaround	0.97												
Unavailable	1												
RC – <i>Report Confidence</i> =	<table border="0"> <tr><td>Not Defined</td><td>1</td></tr> <tr><td>Unknown</td><td>0.92</td></tr> <tr><td>Reasonable</td><td>0.96</td></tr> <tr><td>Confirmed</td><td>1</td></tr> </table>	Not Defined	1	Unknown	0.92	Reasonable	0.96	Confirmed	1				
Not Defined	1												
Unknown	0.92												
Reasonable	0.96												
Confirmed	1												

Equações das Métricas Temporais — Temporal Score — TS:

$$TS = RUp (BS \times ECM \times RL \times RC)$$

Métricas Ambientais

Valores Ambientais	{	CR – <i>Confidentiality Report</i> =	<table border="0"> <tr><td>Not Defined</td><td>1</td></tr> <tr><td>Low</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Medium</td><td>1</td></tr> <tr><td>High</td><td>1.5</td></tr> </table>	Not Defined	1	Low	0.5	Medium	1	High	1.5
		Not Defined	1								
		Low	0.5								
Medium	1										
High	1.5										
IR – <i>Integrity Requirement</i> =	<table border="0"> <tr><td>Not Defined</td><td>1</td></tr> <tr><td>Low</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Medium</td><td>1</td></tr> <tr><td>High</td><td>1.5</td></tr> </table>	Not Defined	1	Low	0.5	Medium	1	High	1.5		
Not Defined	1										
Low	0.5										
Medium	1										
High	1.5										
AR – <i>Availability Requirement</i> =	<table border="0"> <tr><td>Not Defined</td><td>1</td></tr> <tr><td>Low</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Medium</td><td>1</td></tr> <tr><td>High</td><td>1.5</td></tr> </table>	Not Defined	1	Low	0.5	Medium	1	High	1.5		
Not Defined	1										
Low	0.5										
Medium	1										
High	1.5										

Métricas Base Modificadas: **MAV** - Modified Attack Vector; **MAC** - Modified Attack Complexity; **MPR** - Modified Privileges Required; **MUI** - Modified Userinteraction; **MS** - Modified Scope; **MC** - Modified Confidentiality; **MI** - Modified Integrity; **MA** - Modified Availability.

MISS — Modified Impact Sub-Score; **MI** — Modified Impact; **ME** — Modified Exploitability

$$MISS = \min(1 - [(1 - CR \times MC) \times (1 - IR \times MI)] \times (1 - AR \times MA), 0.915)$$

$$MI = \begin{cases} 6.42 \times MISS & \text{se MS = Unchanged} \\ 7.52 \times (MISS - 0.029) - 3.25(MISS \times 0.9731 - 0.02)^{13} & \text{se MS = Changed} \end{cases}$$

$$ME = 8.22 \times MAV \times MAC \times MPR \times MUI$$

Equações das Métricas Ambientais — Environmental Score — ES:

$$ES = \begin{cases} 0 & \text{MI} = 0 \\ \text{RUP} \{ \text{RUP} [\min(\text{MI} + \text{ME}, 10)] \times \text{ECM} \times \text{RL} \times \text{RC} \} & \text{MS} = \text{Unchanged} \\ \text{RUP} \{ \text{RUP} [\min(1.08 \times (\text{MI} + \text{ME}), 10)] \times \text{ECM} \times \text{RL} \times \text{RC} \} & \text{MS} = \text{Changed} \end{cases}$$

Apêndice B

Vulnerabilidades "oficialmente" exploradas, dados recolhidos em <https://www.cvedetails.com/>. Aparentemente regista apenas explorações pós-divulgação da vulnerabilidade, não contabilizando as explorações "0-day", isto é pré-divulgação da vulnerabilidade, que é o período de maior risco.

Ano	N.º de vul.	N.º de exploits					Total	% de exploits
		1	2	3	4	5		
1999	894	2	0	0	0	0	2	0.22
2000	1020	0	0	0	0	0	0	0
2001	1677	2	0	0	0	0	2	0.12
2002	2156	1	0	0	0	0	1	0.05
2003	1527	5	0	0	0	0	5	0.33
2004	2451	5	0	0	0	0	5	0.2
2005	4935	12	1	0	0	0	13	0.26
2006	6610	26	2	0	0	0	28	0.42
2007	6520	43	1	0	0	0	44	0.67
2008	5632	66	3	0	1	0	70	1.24
2009	5736	430	48	4	0	0	482	8.4
2010	4653	685	390	8	3	0	1086	23.34
2011	4155	312	117	1	2	0	432	10.4
2012	5297	493	58	2	2	0	555	10.48
2013	5191	176	12	2	0	0	190	3.66
2014	7939	336	23	4	1	1	365	4.6
2015	6504	116	6	0	0	0	122	1.88
2016	6454	1	0	0	0	0	1	0.02
2017	14714	4	1	0	0	0	5	0.03
2018	16557	4	0	0	0	0	4	0.02
2019	17344	13	0	0	0	0	13	0.07
2020	18325	50	7	0	0	0	57	0.31
2021	20171	0	0	0	0	0	0	0
2022	19500	0	0	0	0	0	0	0
Total	185962	2782	669	21	9	1	3482	1.87

Nota: Nos Apêndices, os valores numéricos são escritos usando o ponto como símbolo do separador decimal.

Apêndice C — CVSS v.4.0

Fonte: <https://www.first.org/cvss/v4.0/specification-document>.

Está previsto o lançamento da nova versão 4.0 do CVSS até ao final de 2023. A incorporação de novas métricas amplia significativamente a capacidade discriminante de 101 para 271 possíveis scores, e sublinha-se que o CVSS não é apenas o score Base, propondo a nova nomenclatura:

- CVSS-B: CVSS Base Score
- CVSS-BT: CVSS Base + Threat Score
- CVSS-BE: CVSS Base + Environmental Score
- CVSS-BTE: CVSS Base + Threat + Environmental Score

Reproduzimos figuras com o detalhe das métricas Base, e com a indicação das novas formulações das métricas Base e Ameaça e das métricas Ambientais e Supletivas.

CVSSv4.0: The Calculator

Base Metrics [†]

Exploitability Metrics

Attack Vector (AV): Network (N) Adjacent (A) Local (L) Physical (P)

Attack Complexity (AC): Low (L) High (H)

Attack Requirements (AR): None (N) Present (P)

Privileges Required (PR): None (N) Low (L) High (H)

User Interaction (UI): None (N) Passive (P) Active (A)

Vulnerable System Impact Metrics

Confidentiality (VC): High (H) Low (L) None (N)

Integrity (VI): High (H) Low (L) None (N)

Availability (VA): High (H) Low (L) None (N)

Subsequent System Impact Metrics

Confidentiality (SC): High (H) Low (L) None (N)

Integrity (SI): High (H) Low (L) None (N)

Availability (SA): High (H) Low (L) None (N)

Supplemental Metrics [†]

Safety (S): Not Defined (X) Negligible (N) Present (P)

Automatable (AU): Not Defined (X) No (N) Yes (Y)

Recovery (R): Not Defined (X) Automatic (A) User (U) Irrecoverable (I)

Value Density (V): Not Defined (X) Diffuse (D) Concentrated (C)

Vulnerability Response Effort (RE): Not Defined (X) Low (L) Moderate (M) High (H)

Provider Urgency (U): Not Defined (X) Clear Green Amber Red

Figura 15: CVSS v.4.0 — calculadora das métricas Base.

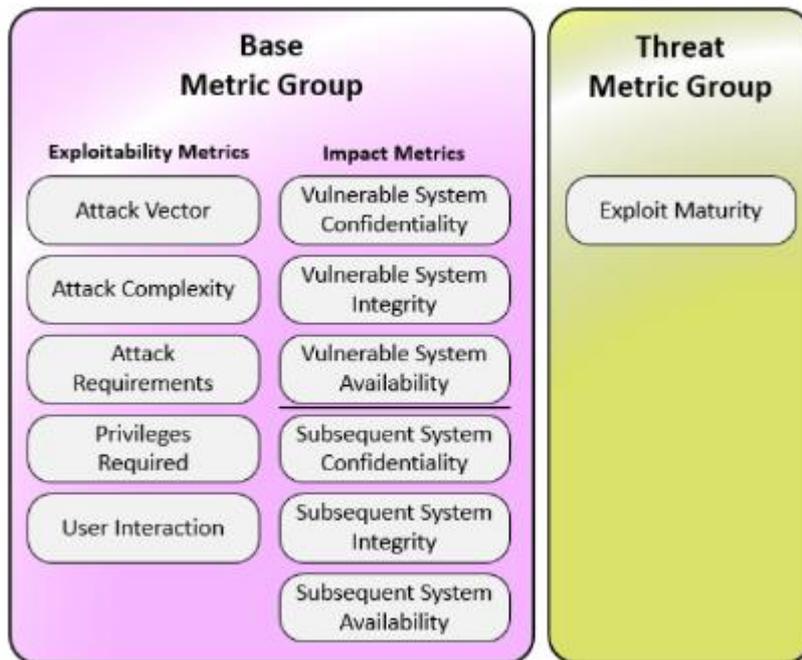


Figura 16: CVSS v.4.0 métricas Base e Ameaça.

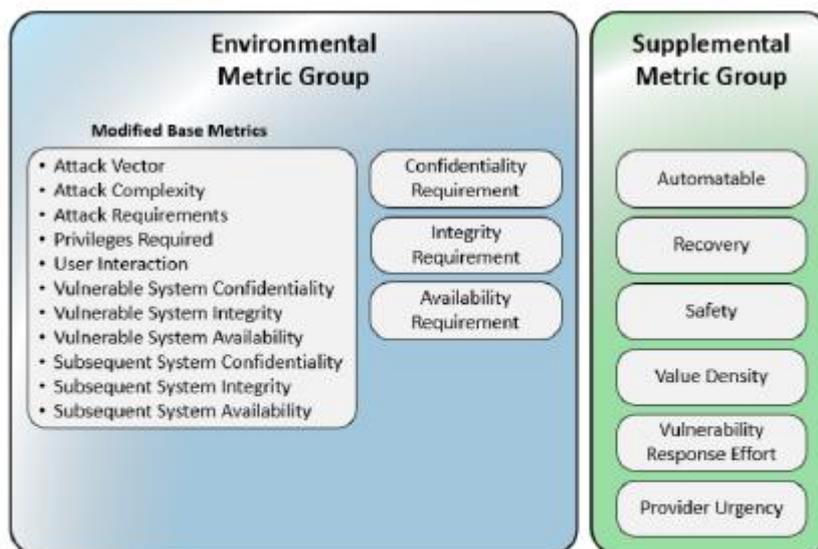


Figura 17: CVSS v.4.0 métricas Ambientais e Supletivas.

Contributos Metrológicos para a Reconstrução Digital Fotogramétrica de Materiais e Estruturas em Engenharia Civil

(Metrological Contributions to the Digital Photogrammetric Reconstruction of Materials and Structures in Civil Engineering)

Luís F. Lages Martins, Álvaro Silva Ribeiro, Maria do Céu Almeida

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

lfmartins@lnec.pt

Resumo

Esta comunicação descreve, sob uma perspetiva metrológica, a temática da reconstrução digital fotogramétrica, tendo em vista a avaliação do nível de exatidão das medições suportadas em modelos computacionais de materiais e estruturas de interesse para a Engenharia Civil. Em acréscimo à descrição sumária dos fundamentos teóricos associados a este processo de medição, a comunicação apresenta o procedimento experimental e de geração computacional de um modelo digital de cenário de observação controlado, e os resultados obtidos no que respeita às nuvens e às malhas de pontos geradas, a determinação da estimativa e da incerteza de medição do coeficiente de escala utilizado para a comparação entre valores lidos digitais e de referência no cenário em questão. Os resultados obtidos permitiram avaliar a potencial aplicação deste método de medição a um cenário real de observação de grandes coletores da cidade de Lisboa.

Palavras-chave: fotogrametria; reconstrução digital; metrologia

Abstract

This paper describes, from a metrological perspective, the photogrammetric digital reconstruction theme, aiming the evaluation of the accuracy level of the measurements supported by computational models of materials and structures in the Civil Engineering context. In addition to the brief description of the theoretical background related to this measurement process, the paper presents the experimental procedure and the computational generation of a digital model of a controlled observation scenario, and the obtained results related to the generated point clouds and meshes, the determination of the scale coefficient estimate and measurement uncertainty used in the comparison between digital readings and reference values in the studied scenario. The obtained results allowed assessing the potential application of this measurement method to a real scenario related to the observation of large collectors in the city of Lisbon.

Keywords: photogrammetry; digital reconstruction; metrology

1 Introdução

A transição digital atualmente em curso na nossa sociedade não se manifesta exclusivamente numa vertente socioeconómica, mas tem igualmente um significativo impacto em setores diversificados de atividade ligados à Ciência e à Engenharia. No contexto particular da Engenharia Civil, a reconstrução digital de materiais e estruturas de interesse constitui uma abordagem cada vez mais frequente em estudos de investigação relacionados, por exemplo, com o património edificado, a observação de barragens por Berberan, A. *et al.*, obras geotécnicas e hidráulicas por Mendes, S. *et al.*, e Rodríguez, R. F. and Cardoso, R., vias de comunicação e materiais de construção por Paixão, A. *et al.*

Na última década foi possível assistir a uma crescente utilização da fotogrametria na reconstrução digital de objetos de interesse, motivada pela recente evolução tecnológica dos meios e dos algoritmos computacionais, bem como dos dispositivos de aquisição digital de imagem. Comparativamente com outras abordagens tecnológicas alternativas para a reconstrução digital como, por exemplo, o varrimento laser, segundo Berberan, A. *et al.*, a fotogrametria é caracterizada por uma maior acessibilidade da comunidade científica e técnica, atendendo ao menor custo económico dos recursos materiais envolvidos na sua concretização experimental.

Apesar dos modelos digitais gerados por reconstrução fotogramétrica serem frequentemente utilizados, em determinados contextos observacionais, na realização de medições dimensionais, constata-se um reduzido enquadramento metrológico deste tipo de abordagem, sem o qual não é possível evidenciar o nível de exatidão obtido e, conseqüentemente, a confirmação da sua adequação no que respeita ao rigor e à confiança nas medições pretendidas.

Esta comunicação descreve os estudos metrológicos preliminares efetuados no LNEC sobre a reconstrução digital fotogramétrica, suportada em algoritmos de geração de nuvem de pontos, segundo Wu, C. *et al.* e Furukawa, Y. *et al.*, e aplicação computacional de processamento e edição de malhas de pontos tridimensionais segundo Cignoni, P. *et al.* Em acréscimo à descrição sumária da abordagem de reconstrução digital fotogramétrica utilizada, é promovida a discussão sobre a geração de um modelo digital de cenário de observação controlado, contendo medidas materializadas rastreadas ao Sistema Internacional de Unidades (SI).

Neste âmbito é efetuada a determinação dos desvios sistemáticos obtidos entre as dimensões de referência de medidas materializadas e as obtidas por via de modelo digital, tendo em vista a sua potencial aplicação em cenário real de observação de grandes coletores da cidade de Lisboa. Estes resultados são de particular interesse no enquadramento da gestão patrimonial de infraestruturas e apoio à decisão relativamente às atividades de inspeção e ao planeamento da reabilitação destas infraestruturas.

2 Reconstrução digital fotogramétrica

A fotogrametria consiste num método de medição dimensional de coordenadas tridimensionais de pontos num objeto de interesse mediante o recurso a imagens bidimensionais desse objeto, e cuja origem remonta à segunda metade do século XIX, sendo nesta época utilizado no registo arquitetónico do património edificado ou na produção cartográfica de cadeias montanhosas e glaciares. O desenvolvimento dos meios e algoritmos computacionais e dos dispositivos digitais de aquisição de imagem nos anos 90 do século XX abriu o leque de aplicações deste método de medição que assim, para além dos domínios arquitetónico e geográfico, passou a abranger domínios diversificados das Engenharias, nomeadamente, na Engenharia

Civil. Este tipo de abordagem foi considerado uma solução alternativa à medição geodésica, caracterizada por uma execução operacional mais morosa, e à medição por contacto, limitada a um número restrito de pontos de medição e dependente de acesso e espaço para a instalação de sensores.

Uma das técnicas mais utilizadas na fotogrametria corresponde à triangulação por feixes perspetivos (*bundle adjustment*, na terminologia anglo-saxónica), onde não existe necessidade da aquisição de imagens estereoscópicas de um mesmo objeto, ao contrário do que acontece noutras técnicas fotogramétricas. A sua designação resulta do facto de se considerarem vários raios perspetivos com origem num ponto genérico no objeto, que passam por vários centros de projeção, e interseccionam vários planos nos pontos respetivos em cada uma das imagens onde esse ponto do objeto é visível. Numa perspetiva matemática, o objetivo da triangulação por feixes perspetivos consiste na determinação de soluções para as coordenadas tridimensionais de pontos e dos parâmetros intrínsecos (distância focal, coordenadas do centro de projeção, coeficientes de distorção) e extrínsecos (posição e orientação) das câmaras utilizadas na aquisição das imagens, com base na correspondência existente entre pontos objeto e pontos imagem, procurando minimizar o erro de reprojeção. Em regra, recorre-se ao Método dos Mínimos Quadrados para a resolução de um elevado número de equações não lineares de colinearidade, suportado no algoritmo de Levenberg-Marquardt. Deste modo, a reconstrução digital fotogramétrica baseada na triangulação por feixes perspetivos é um processo de cálculo computacional com elevada dimensão.

A recente evolução dos meios de computação paralela, suportada no aparecimento e na disseminação de unidades de processamento central e unidades de processamento gráfico com múltiplos núcleos, permitiu ultrapassar as limitações de memória e largura de banda que se faziam sentir anteriormente nos processos de cálculo associados à reconstrução digital fotogramétrica, os quais eram extremamente morosos e numericamente instáveis. Neste contexto, é possível destacar os algoritmos e as aplicações desenvolvidas por Wu, C. *et al.*, caracterizados pela sua eficiência e menor tempo de execução.

Neste estudo, foi utilizada a aplicação VisualSFM – *A Visual Structure from Motion System* (versão 0.5.26), na qual estão implementados e validados os algoritmos de processamento multinúcleo. Em acréscimo, foi adicionada a esta aplicação o algoritmo CMVS – *Clustering Views for Multi-view Stereo* segundo Furukawa, Y. *et al.*, o qual efetua a decomposição das imagens adquiridas num conjunto de clusters com dimensão adequada para processamento paralelo e independente de cada cluster, sem perda de detalhe na união das diversas reconstruções efetuadas, com maior detalhe e com uma significativa redução do tempo de execução computacional. Nesta aplicação, os dados de entrada correspondem às imagens adquiridas do cenário de observação, de múltiplas vistas (posições e orientações da câmara), tendo como dados de saída, a nuvem de pontos esparsa (com menor detalhe) associada apenas à

execução do algoritmo de triangulação por feixes perspetivos com processamento multinúcleo, e a malha de pontos densa (com maior detalhe), resultante da execução do algoritmo CMVS.

O processamento e a edição da nuvem e da malha dos pontos tridimensionais gerados pela aplicação VisualSFM, foi efetuado com recurso à aplicação Meshlab (versão 2022.02) segundo Cignoni, P. *et al.*, em que se promoveram operações gráficas de remoção de pontos sem interesse, simplificação de malha e geração de superfície e textura do modelo digital pretendido. Nesta aplicação destaca-se, igualmente, o recurso a ferramenta dedicada para a realização de medições dimensionais, suportadas em modelo ortográfico com escalonamento uniforme com respetivo coeficiente (expresso em milímetro por valor digital).

3 Procedimento experimental e de geração computacional de modelo digital

O cenário de observação considerado neste estudo correspondeu a um ambiente controlado, composto por um artefacto cerâmico (bloco retangular com dimensões nominais de 65 mm × 45 mm × 18 mm, possuindo rasgos lineares e orifícios) e uma régua de fissuras (com dimensões globais nominais de 86 mm × 56 mm e marcações com largura variável compreendida entre 0,04 mm e 5 mm), conforme se mostra na Figura 1.



Figura 1 – Régua de fissuras e artefacto cerâmico no cenário de observação.

Estes dois objetos de interesse foram colocados sobre uma superfície plana em madeira, tendo-se procedido à aquisição de 86 imagens com um número de pixéis individual de 6016 × 4016, em diferentes posições e orientações da câmara no cenário de observação (*vide* Figura 2), considerando uma distância de observação em torno de 500 mm.

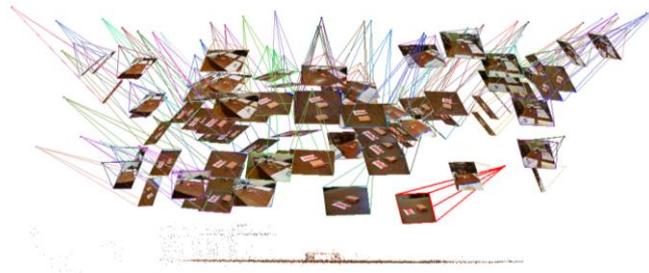


Figura 2 – Posições e orientações da câmara na aquisição de imagens dos objetos de interesse

A aquisição das imagens foi suportada numa câmara digital (marca Nikon, modelo D750, número de série 8561694), com uma objetiva (NIKON Nano Crystal Coat SWM VE ED IF Aspherical, número de série 62574713) com distância focal compreendida entre 24 mm e 120 mm e filtro (marca Hoya, modelo Fusion One).

As imagens recolhidas do cenário de observação foram introduzidas na aplicação VisualSFM tendo sido executados, de forma sequencial, os algoritmos de reconstrução esparsa segundo Wu, C. *et al.* e densa segundo Furukawa, Y. *et al.* A nuvem e a malha de pontos geradas foram em seguida utilizadas na aplicação de processamento e edição de malhas de pontos tridimensionais segundo Cignoni, P. *et al.* e sujeitas a operação de remoção de pontos sem interesse para a reconstrução digital dos objetos de interesse, de modo a reduzir o esforço computacional e a probabilidade de ocorrência de erros numéricos. No caso particular da malha de pontos, foi promovida a sua simplificação com recurso ao algoritmo *Quadric Edge Collapse Decimation*, de acordo com Garland, M., and Heckbert, P., seguida da geração da superfície, recorrendo ao algoritmo *Screened Poisson Surface Reconstruction*, segundo Kazhdan, M. *et al.*, com uma profundidade igual a 12. Após a remoção das superfícies sem interesse para o estudo realizado, foi promovida a geração de textura no modelo digital gerado (com dimensão igual 8192), de modo a facilitar a identificação visual de pontos de interesse para as medições pretendidas.

O coeficiente de escalonamento uniforme, obtido com base no quociente entre o valor métrico (largura de referência na régua de fissuras, com rastreabilidade ao SI através de medição em laboratório com máquina de medição óptica) e o respetivo valor digital, foi introduzido no modelo gerado através da ferramenta *Transform: Scale, Normalize* disponível em Cignoni, P. *et al.*, para a geração de uma matriz de transformação.

4 Resultados obtidos

Nas Figuras 3 e 4, é possível observar, respetivamente, a nuvem de pontos resultante do processo de reconstrução esparsa segundo Wu, C. *et al.* e a malha de pontos associada à reconstrução densa segundo Furukawa, Y. *et al.*, após a conclusão das operações de processamento e edição descritas na Secção 3.

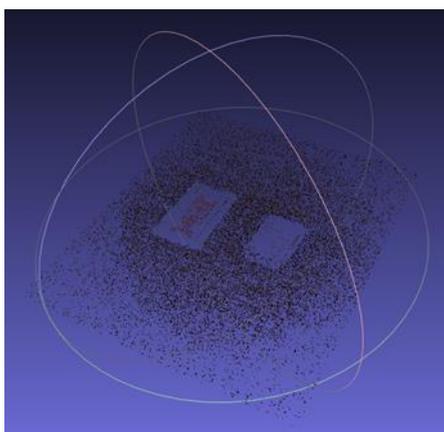


Figura 3 – Nuvem de pontos

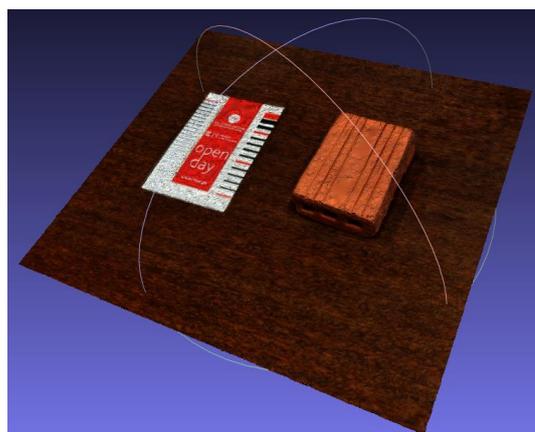


Figura 4 – Malha de pontos

Por sua vez, o Quadro 1 apresenta a evolução do número de elementos característicos (pontos, vértices e faces) com a realização das operações de processamento e edição efetuadas.

Quadro 1 – Número de elementos característicos da nuvem e da malha de pontos

Sequência de operações	Nuvem de pontos	Malha de pontos
Original (sem remoção de elementos)	50 829 pontos	4 801 263 vértices
Após remoção de elementos sem interesse	36 496 pontos	2 455 708 vértices
Superfície original	Não aplicável	11 016 034 faces
Após remoção de elementos sem interesse	Não aplicável	10 358 762 faces
Após simplificação	Não aplicável	4 999 563 faces
Após remoção de elementos sem interesse	Não aplicável	4 998 547 faces
Após adição de textura	Não aplicável	4 998 547 faces

Na Figura 5, é possível observar o modelo digital associado à régua de fissuras, em particular, das marcações com diferentes larguras, compreendidas entre 0,04 mm e 5 mm.



Figura 5 – Modelo digital da régua de fissuras

A observação da Figura 5 permite afirmar que a resolução espacial é próxima de 0,1 mm, visto que as marcações com largura inferiores a este valor apresentam uma visibilidade bastante reduzida e mutuamente indiferenciadas, ou seja, apresentam uma dimensão digital próxima. Nota-se, igualmente, uma distorção geométrica de cada marcação individual, o que necessariamente se traduz num acréscimo da incerteza de medição associada à variação da largura observada ao longo de cada marcação.

A determinação do coeficiente de escalonamento uniforme foi suportada na visualização, no modelo digital da régua de fissuras, da marcação com valor nominal de largura igual a 1,5 mm, conforme se mostra na Figura 6

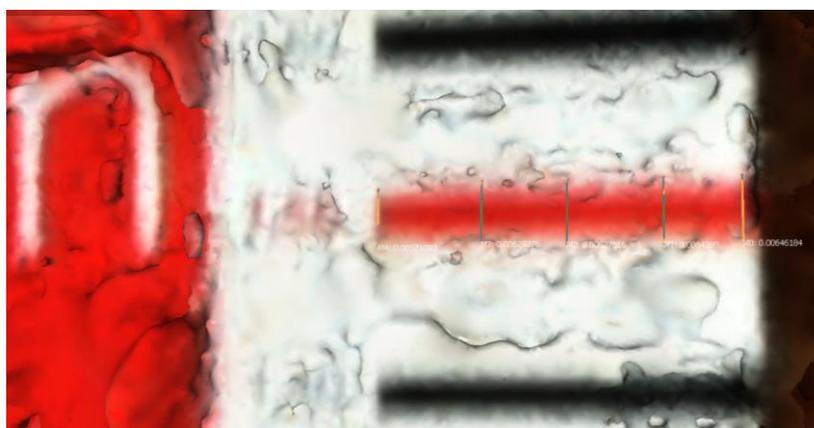


Figura 6 – Visualização da marcação com largura igual a 1,5 mm

No Quadro 2, os respetivos resultados obtidos são apresentados.

Quadro 2 – Determinação do coeficiente de escalonamento uniforme

Localização da medição de largura na marcação	Esquerda	Intermédia à esquerda	Centro	Intermédia à direita	Direita
Valor digital lido no modelo	0,005 711	0,006 293	0,006 276	0,006 437	0,006 462
Estimativa e incerteza expandida (95 %) do valor de referência da largura, em mm	1,484 3 ± 0,006 2				
Coeficiente de escalonamento uniforme, em mm por valor digital	260	236	237	231	230

O valor médio do coeficiente de escalonamento uniforme correspondeu a 239 mm por valor digital, considerando uma amostra experimental de medições com uma dimensão igual a cinco e um desvio padrão experimental da amostra igual a 12 mm por valor digital. A estimativa obtida foi introduzida no modelo digital, tendo permitido determinar os desvios sistemáticos observados entre os valores métricos lidos em cada marcação com os respetivos valores de referência, conforme se mostra na Figura 7.

Na Figura 7 é possível constatar que os desvios sistemáticos obtidos estão compreendidos entre 0,4 mm e -0,6 mm, notando-se uma maior dispersão dos desvios ao nível das marcações com maior largura nominal, evidenciando uma distorção geométrica mais acentuada. No caso das marcações com menor largura nominal, a dispersão obtida apresenta uma menor magnitude dada a proximidade à resolução espacial obtida (próxima de 0,1 mm).

Considerando a adoção de uma distribuição de probabilidade uniforme como representativa da dispersão dos desvios sistemáticos obtidos, com uma semi-amplitude majorada igual a 0,6 mm, esta componente de incerteza de medição do modelo digital corresponde a uma incerteza padrão de medição igual a 0,35 mm, com 50 graus de liberdade.

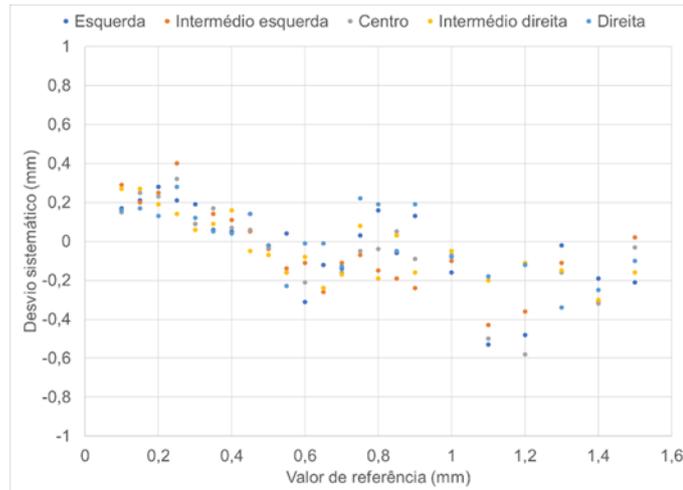


Figura 7 – Desvios sistemáticos

5 Conclusão

Os estudos preliminares efetuados em ambiente controlado permitiram concluir que, a componente de incerteza de medição associada aos desvios sistemáticos apresenta uma magnitude sub-milimétrica (0,35 mm), o que constitui um resultado promissor no que respeita à aplicação desta técnica ao cenário real de observação de grandes coletores da cidade de Lisboa. Salienta-se que o referido cenário é caracterizado por um ambiente agressivo à realização manual de medições dimensionais, o que consequentemente se traduz num reduzido nível de exatidão.

No caso particular estudado, foi possível gerar um modelo digital de um artefacto cerâmico com uma resolução espacial suficiente para a observação e a medição de elementos de interesse, nomeadamente, as dimensões globais e dos rasgos lineares e orifícios.

Este estudo evidenciou a influência do operador na seleção de pontos de interesse na determinação do coeficiente de escalonamento e na realização das medições dimensionais pretendidas, pelo que deve ser considerada como uma componente de incerteza no balanço das incertezas de medição dimensional.

Como trabalhos futuros mencionam-se o estudo do impacto do recurso a escalonamento não uniforme e da parametrização dos algoritmos computacionais utilizados na reconstrução digital fotogramétrica.

Referências

- [1] Berberan, A., Ferreira, I., Portela, E., Oliveira, S., and Batista B. "Overview on terrestrial laser scanning as a tool for dam surveillance", Proceedings of the 6th International Conference on Dam Engineering, Lisboa, Portugal (2011).
- [2] Cignoni, P., Corsini, M., and Ranzuglia, G., "MeshLab: an Open-Source 3D Mesh Processing System", ERCIM News, (2008).
- [3] Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S. M., and Szeliski, R., "Towards internet-scale multi-view stereo", 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1434-1441 (2010), doi: 10.1109/CVPR.2010.5539802.
- [4] Garland, M., and Heckbert, P., "Surface Simplification Using Quadratic Error Metrics", SIGGRAPH 97: Proceedings of the 24th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM – Association for Computing Machinery, pp. 209-216 (1997), ISBN 0897919211; doi: 10.1145/258734.258849.
- [5] Kazhdan, M., Bolitho, M., and Hoppe, H., "Poisson Surface Reconstruction", SGP '06: Proceedings of the 4th Eurographics Symposium on Geometry Processing, Eurographics Association, pp. 61-70 (2006), ISBN 3905673363; doi: 10.5555/1281957.1281965.
- [6] Mendes, S., Amaral, S. Alvarez, T., Aleixo, R., Viseu, T., and Ferreira, R., "Técnicas de análise de imagem aplicadas a ensaios de rotura de aterros – geometria 3D e campo de velocidades", TEST&E 2022 – Smart Technologies, Caparica (2022).
- [7] Paixão, A., Resende, R., and Fortunato, E., "Photogrammetry for digital reconstruction of railway ballast particles – a cost-efficient method", Construction and Building Materials, 191, pp. 963-976, (2018).
- [8] Rodríguez, R. F., and Cardoso, R., "SFM photogrammetry as a tool to monitor slope erosion and evaluate bio-stabilization treatment", TEST&E 2022 – Smart Technologies, Caparica (2022).
- [9] Wu, C., Agarwal, S., Curless, B., and Seitz, S. M., "Multicore bundle adjustment," CVPR 2011, pp. 3057-3064 (2011), doi: 10.1109/CVPR.2011.5995552.

Preparação de Misturas Gasosas Multicomponentes

(Preparation of Multicomponent Gas Mixtures)

Florbela A. Dias, Cristina Palma, Carlos Costa

Departamento de Metrologia, Instituto Português da Qualidade

florbelad@ipq.pt

Resumo

O Laboratório de Gás de Referência (LGR), do IPQ, é responsável pela produção, manutenção e desenvolvimento das misturas gasosas de padrões primários nacionais. O LGR está a preparar misturas gasosas multicomponentes por forma a contribuir para a melhoria e desenvolvimento da monitorização ambiental. Estas misturas conseguem simular melhor o ar real, ou seja, o ar com poluentes gasosos, que podemos encontrar perto de fontes emissoras ou até mesmo nas grandes cidades. Estas misturas são fundamentais como padrões de controlo das medições de poluentes atmosféricos com rastreabilidade metrológica. Este artigo pretende descrever o trabalho realizado no LGR, no que diz respeito à preparação e certificação de misturas gasosas multicomponentes de CO, CO₂ e NO em nitrogénio, com estudos de interferentes e de estabilidade.

Palavras-chave: misturas multicomponentes, método gravimétrico, certificação, incerteza de medição

Abstract

The Reference Gas Laboratory (LGR), at IPQ, is responsible for the production, maintenance, and development of gas mixtures for national primary standards. The LGR is preparing multicomponent gas mixtures in order to contribute to the improvement and development of environmental monitoring. These mixtures manage to better simulate the real air, that is, the air with gas pollutants, which we can find near emission sources or even in big cities. These mixtures are essential as standards for controlling measurements of atmospheric pollutants with metrological traceability. This article intends to describe the work carried out at LGR, regarding the preparation and certification of multicomponent gas mixtures of CO, CO₂ and NO in nitrogen, with interference and stability studies.

Keywords: multicomponent mixtures, gravimetric method, certification, measurement uncertainty

1 Introdução

Nas últimas décadas, as preocupações relacionadas com as alterações climáticas originaram um crescimento exponencial da monitorização ambiental, aumentando a necessidade de medições com rastreabilidade, por forma a garantir a confiança dos dados e reduzir as incertezas de medição.

O Laboratório de Gás de Referência (LGR), do IPQ, é responsável pela produção, manutenção e desenvolvimento das misturas gasosas de padrões primários nacionais de acordo com a norma NP EN ISO 17034. Estas misturas são preparadas gravimetricamente, de acordo com procedimento interno baseado na norma internacional ISO 6142-1, garantindo assim, o mais alto nível de exatidão. A certificação de misturas gasosas é realizada de acordo com a norma internacional

ISO 6143, com utilização de métodos analíticos, nomeadamente, cromatografia gasosa (GC), momento paramagnético, espectroscopia de infravermelho não dispersivo (NDIR) e espectroscopia de ultravioleta não dispersivo (NDUV).

O controlo da qualidade das medições é suportado pela participação em projetos e comparações internacionais. Também é demonstrado pela aceitação e inclusão na base de dados do *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) de capacidades de medição e calibração (CMC).

O LGR está a preparar misturas gasosas multicomponente por forma a contribuir para a melhoria e desenvolvimento da monitorização ambiental.

Este projeto foi iniciado com misturas multicomponente de CO (350×10^{-6} mol/mol), CO₂ (10×10^{-2} mol/mol) e NO (200×10^{-6} mol/mol) em matriz de nitrogénio. Com este tipo de misturas é possível ter uma amostra de gás que simula melhor o ar poluído, pois um cilindro pode conter vários gases poluentes. Este estudo permitiu caracterizar três gases poluentes dentro de um cilindro à pressão de cerca de 100 bar e fazer a análise dos interferentes e o estudo de estabilidade, segundo a norma internacional ISO 13528:2022.

2 Preparação de misturas gasosas

Como foi dito anteriormente, as misturas gasosas de referência são preparadas de acordo com um procedimento interno baseado no método gravimétrico descrito na norma internacional ISO 6142-1:2015.

Esta parte da norma internacional ISO 6142-1:2015 é aplicável somente a misturas de componentes gasosos ou totalmente vaporizados, que podem ser introduzidos no cilindro no estado gasoso ou líquido. As misturas a preparar podem ser bicomponente ou multicomponente.

Este método descreve o cálculo da incerteza associada à fração molar de cada componente. Este cálculo de incerteza requer a avaliação das contribuições para a incerteza devido a fatores como o processo de pesagem, a pureza dos componentes, a estabilidade da mistura e a verificação da mistura final.

Na preparação das misturas gasosas são usados cilindros de alumínio, com revestimento especial, para prevenir a adsorção dos componentes da mistura nas paredes internas.

Após a escolha do cilindro é feita uma limpeza rigorosa de forma a garantir que quaisquer eventuais resíduos existentes no seu interior não tenham impacto na incerteza da composição da mistura final. Este é um passo especialmente importante quando se preparam misturas de concentração muito baixa.

Outro passo crítico do processo de enchimento é a transferência dos gases do cilindro mãe, de cada componente, para o cilindro onde se está a preparar a mistura. A adição de cada gás é realizada numa estação de enchimento constituída por tubos

polidos eletronicamente, válvulas, medidores de vácuo e de pressão e bombas de vácuo turbo molecular isentas de óleo. A quantidade de gás adicionada no cilindro é controlada por uma balança (Figura 1).



Figura 1 – Instalação de enchimento e balança comparadora.

A massa exata de cada componente gasoso adicionado ao cilindro, é dada por um comparador mássico, usando massas calibradas e rastreadas ao padrão nacional.

A rastreabilidade da composição do gás ao sistema internacional de unidades (SI) é garantida pelo uso de instrumentação calibrada.

Usando os resultados dos certificados de análise da pureza dos gases iniciais e os dados encontrados através do processo de pesagem, pode ser calculada a composição exata da mistura e as incertezas associadas (relativas às várias frações molares obtidas).

O IPQ preparou uma mistura gasosa multicomponente, em matriz de nitrogénio, pelo método gravimétrico com as seguintes frações molares nominais: CO (350×10^{-6} mol/mol); CO₂ (10×10^{-2} mol/mol); NO (200×10^{-6} mol/mol).

Depois de preparada, a mistura gasosa foi sujeita a um processo de homogeneização. O cilindro que contém a mistura foi colocado num sistema de rolamento, durante cerca de uma hora (Figura 2).



Figura 2 – Sistema de rolamento de cilindros.

3 Certificação de misturas gasosas

A composição da mistura gasosa é determinada por uma análise individual da fração molar de cada componente. O Procedimento de determinação da fração molar

é descrito na norma internacional ISO 6143:2001. O método analítico é um método comparativo pois usa os padrões primários de referência para estabelecer a curva de calibração. O método analítico utilizado foi a espectroscopia de infravermelho não dispersivo (NDIR). Os resultados finais estão expressos em conjunto com as respetivas incertezas de acordo com o JCGM 100:2008. *Guide to the expression of uncertainty of measurement*.

As misturas gasosas produzidas são certificadas recorrendo a analisadores específicos de CO, CO₂ e NO. Todos eles utilizam o método analítico NDIR. Em cada certificação, a fração molar de cada componente na mistura preparada é determinada através da comparação da resposta do equipamento face aos padrões utilizados, em conformidade com o gás em análise, nos intervalos de medição apropriados.

O processo de certificação decorre com a utilização de um sistema de amostragem automático multicanal, ao qual estão ligados todos os cilindros a analisar (Figura 3).



Figura 3 – Instalação de certificação de misturas gasosas.

Durante a análise, os cilindros são selecionados automaticamente, permitindo a circulação do gás individualmente pelo analisador. Este sistema utiliza o *software IPQAnalyseQui*, desenvolvido para o efeito, que controla a amostragem e regista todas as medições realizadas no analisador. No final, todos os dados obtidos, os registos das análises dos padrões e das amostras, são inseridos numa folha de cálculo e corrigidos com os valores de zero e pressão medidos.

A determinação da função de calibração é efetuada recorrendo ao programa XGENLINE desenvolvido pelo NPL – *National Physical Laboratory*. Este *software* permite calcular a função de calibração polinomial de baixo grau (1, 2, 3 ou 4) mais adequada para um conjunto de dados de medição (X , Y), levando em consideração as incertezas e covariâncias associadas aos dados. Assim, a função de calibração determinada é usada para obter estimativas dos valores das frações molares das amostras em análise e das correspondentes incertezas associadas.

4 Estudo de interferentes

O estudo dos interferentes foi realizado com a utilização de três materiais de referência certificados (MRC) (Quadro 1).

Quadro 1 – MRC utilizados para o estudo dos interferentes.

Gás interferente	MRC
CO	CRM044942: (508 ± 5) µmol/mol
CO ₂	CRM044969: (10,01 ± 0,07) cmol/mol
NO	CRM054938: (102 ± 2) µmol/mol

4.1 Analisador de CO₂

Foram realizadas medições no analisador de CO₂ dos padrões de NO, CO e CO₂. Os resultados obtidos durante os ensaios no analisador de CO₂ são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Resultados dos interferentes no analisador de CO₂.

Cilindro	Fração molar, x / (mol/mol)	Zero, Z / mV	Leitura, L / mV	S / mV
CRM054938 (NO)	0,000 102	2041,2	2040,8	0,102
CRM044942 (CO)	0,000 508	2040,6	2040,5	0,031
CRM044969 (CO ₂)	0,100 1	2040,4	5263,0	0,147

Podemos observar que para os gases NO e CO, o Zero da tabela é semelhante à Leitura, isto significa que estes gases não interferem na leitura do gás CO₂, no analisador de CO₂.

4.2 Analisador de CO

Foram analisados no analisador de CO os padrões de NO, CO e CO₂. Os resultados obtidos durante os ensaios no analisador de CO são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Resultados dos interferentes no analisador de CO.

Cilindro	Fração molar, x / (mol/mol)	Zero, Z / mV	Leitura, L / mV	S / mV
CRM054938 (NO)	0,000 102	2033,7	2033,6	0,179
CRM044942 (CO)	0,000 508	2033,5	3921,5	0,179
CRM044969 (CO ₂)	0,100 1	2033,7	2032,6	0,168

O Quadro 3 mostra que para os gases NO e CO₂ o *Zero* da tabela é semelhante à *Leitura*, isto significa que estes gases não interferem na leitura do gás CO, no analisador de CO.

4.3 Analisador de NO

Os padrões de NO, CO e CO₂ foram analisados no analisador de NO. Os resultados obtidos durante os ensaios no analisador de NO são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Resultados dos interferentes no analisador de NO.

Cilindro	Fração molar, x / (mol/mol)	Zero, Z / mV	Leitura, L / mV	S / mV
CRM054938 (NO)	0,000102	-44,355	1880,25	8,659
CRM044942 (CO)	0,000508	-41,028	-91,715	8,919
CRM044969 (CO ₂)	0,1001	-60,528	27,233	11,23

Observa-se que, para os gases CO e CO₂, o *Zero* da tabela é diferente da *Leitura*, isto significa que estes gases interferem na leitura do gás NO, no analisador de NO. Nesta situação, temos de fazer a correção do sinal aquando da determinação da fração molar relativa ao componente NO.

5 Resultados

Foi preparada uma mistura multicomponente em matriz de nitrogénio, CRM208338, com os poluentes CO, CO₂ e NO nas frações molares referidas anteriormente. Este estudo permitiu caracterizar estes três gases dentro de um cilindro à pressão de cerca de 100 bar.

5.1 Resultados para o componente CO

A mistura multicomponente CRM208338 foi certificada no analisador de CO com os padrões apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Padrões utilizados na certificação do componente CO.

Padrões utilizados	x / (mol/mol)	U / (mol/mol)
NPL1728	$1,000\ 0 \times 10^{-4}$	$6,3 \times 10^{-7}$
PSM208337	$1,999\ 2 \times 10^{-4}$	$2,1 \times 10^{-6}$
PSM402577	$5,002\ 0 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-6}$
PSM212539	$5,562\ 0 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-6}$
NMI8622	$7,0050 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-6}$

A análise ao componente CO foi repetida em três ensaios independentes (Quadro 6) com resultados semelhantes.

Quadro 6 – Resultados de três ensaios independentes do componente CO na mistura multicomponente CRM208338.

Data	x / ($\mu\text{mol/mol}$)	U / ($\mu\text{mol/mol}$)
2022-11-02	360	2
2022-11-08	360	2
2022-11-08	360	2

5.2 Resultados para o componente CO₂

A mistura multicomponente CRM208338 foi certificada no analisador de CO₂ com os padrões apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 – Padrões utilizados na certificação do componente CO₂.

Padrões utilizados	x / (mol/mol)	U / (mol/mol)
PSM202579	$5,0040 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-4}$
NMI3642	$7,0040 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-4}$
NMI3643	$8,5060 \times 10^{-2}$	$8,7 \times 10^{-4}$
PSM105551	$1,0006 \times 10^{-1}$	$9,4 \times 10^{-4}$
PSM302752	$1,7492 \times 10^{-1}$	$3,4 \times 10^{-4}$

A análise ao componente CO₂ foi repetida em três ensaios independentes (Quadro 8) com resultados semelhantes.

Quadro 8 – Resultados de três ensaios independentes do componente CO₂ na mistura multicomponente CRM208338

Data	x / (µmol/mol)	U / (µmol/mol)
2022-11-03	12,15	0,04
2022-11-08	12,15	0,04
2022-11-08	12,15	0,04

5.3 Resultados para o componente NO

A mistura multicomponente CRM208338 foi certificada no analisador de NO com os padrões apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 – Padrões utilizados na certificação do componente NO.

Padrões utilizados	x / (mol/mol)	U / (mol/mol)
NMI9181	$4,8100 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-6}$
PRM603392	$7,4800 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-6}$
PRM302778	$4,9200 \times 10^{-4}$	$4,5 \times 10^{-6}$

A análise ao componente CO₂ foi repetida em três ensaios independentes (Quadro 10) com resultados semelhantes. Com base no estudo de interferentes realizado, a fração molar do componente NO foi calculada com correção e sem correção do sinal obtido no analisador de NO. Podemos observar pelo Quadro 10 que os resultados são idênticos dentro das incertezas associadas.

Quadro 10 – Resultados de três ensaios independentes do componente NO na mistura multicomponente CRM208338.

Data	$x_{\text{sem correção}}$ / (µmol/mol)	$x_{\text{com correção}}$ / (µmol/mol)	U / (µmol/mol)
2022-11-04	206	206	3
2022-11-07	206	206	3
2022-11-07	206	206	3

5.4 Composição da mistura preparada

Os resultados das frações molares da mistura multicomponente CO+CO₂+NO em nitrogénio são apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 – Frações molares da mistura multicomponente CO+CO₂+NO em nitrogénio, CRM208338, a 2022-11-08.

Componente em matriz de nitrogénio	$x / (\text{mol/mol})$	$U / (\text{mol/mol})$
CO	360×10^{-6}	2×10^{-6}
CO ₂	$12,15 \times 10^{-2}$	$0,04 \times 10^{-2}$
NO	206×10^{-6}	3×10^{-6}

6 Estudo de estabilidade

Foi realizado um estudo de estabilidade durante cerca de um mês, onde foram realizados três ensaios em três dias diferentes. Este estudo foi avaliado de acordo com o modelo estatístico Erro Normalizado (E_n) [5].

Quadro 12 – Resultados do Estudo de Estabilidade com base no método estatístico E_n , na mistura multicomponente CRM208338, em três dias diferentes.

Gás	2022-11-08		2022-11-21			2022-11-28		
	$x / (\text{mol/mol})$	$U / (\text{mol/mol})$	$x / (\text{mol/mol})$	$U / (\text{mol/mol})$	E_{n1}	$x / (\text{mol/mol})$	$U / (\text{mol/mol})$	E_{n2}
CO	360×10^{-6}	2×10^{-6}	361×10^{-6}	2×10^{-6}	0,4	360×10^{-6}	2×10^{-6}	0,0
CO ₂	$12,15 \times 10^{-2}$	$0,04 \times 10^{-2}$	$12,14 \times 10^{-2}$	$0,03 \times 10^{-2}$	-0,2	$12,14 \times 10^{-2}$	$0,03 \times 10^{-2}$	-0,2
NO	206×10^{-6}	3×10^{-6}	207×10^{-6}	3×10^{-6}	0,2	211×10^{-6}	4×10^{-6}	1,0

7 Conclusão

Podemos concluir que os gases CO e NO não são interferentes no analisador de CO₂, assim como os gases CO₂ e NO não são interferentes no analisador de CO. Os gases CO e CO₂ são interferentes no analisador de NO. No entanto, a interferência é desprezável dentro da incerteza de medição.

Relativamente ao estudo de estabilidade, podemos concluir que a mistura multicomponente é estável para o período estudado, dentro das incertezas associadas. Pois, o Erro Normalizado (E_n) foi sempre menor ou igual a um.

Foi preparada uma mistura multicomponente de CO+CO₂+NO em N₂, com incertezas dentro do esperado.

Futuramente, pretendemos alargar este estudo a misturas com mais componentes e com matrizes diferentes.

Referências

- [1] ISO 6142-1:2015 – Gas analysis – Preparation of calibration gas mixtures – Part 1: Gravimetric method for Class I mixtures.
- [2] ISO 6143:2001 – Gas analysis – Comparison methods for determining and checking the composition of calibration gas mixtures.
- [3] ISO 13528:2022 – Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons.
- [4] JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections).
- [5] <https://www.bipm.org/kcdb/>.
- [6] NP EN ISO 17034:2020 – Requisitos gerais para a competência dos produtores de materiais de referência.

Validação do Método de Calibração de Misturas Gasosas de Etanol em Nitrogénio por Cromatografia Gasosa

(Validation of the calibration method of gas mixtures of ethanol in nitrogen by gas chromatography)

Florbelá A. Dias, Cristina Palma, Carlos Costa

Departamento de Metrologia, Instituto Português da Qualidade

florbelad@ipq.pt

Resumo

O Laboratório de Gases de Referência do IPQ desenvolveu o método de análise de misturas gasosas de etanol em nitrogénio, por cromatografia gasosa, com detetor de ionização de chama (GC-FID). De acordo com a norma NP EN ISO/IEC 17025:2018, os métodos desenvolvidos pelo laboratório devem ser validados. A validação deve ser tão completa quanto possível, de modo a termos confiança nas medições realizadas.

Nesta comunicação vamos apresentar os resultados da análise das várias misturas gasosas e a validação do método, utilizando a ferramenta de avaliação estatística Erro Normalizado (E_n). Os resultados obtidos pelo método GC-FID foram comparados com os resultados obtidos pelo método analítico de referência de espectroscopia de infravermelho não dispersivo NDIR.

Palavras-chave: validação de método, CRM, GC-FID

Abstract

The IPQ Reference Gas Laboratory developed the method for analysing reference gas mixtures of ethanol in nitrogen (CRM), by gas chromatography, with a flame ionization detector (GC-FID). According to the NP EN ISO/IEC 17025:2018 standard, the methods developed by the laboratory must be validated. Validation should be as complete as possible so that we have confidence in the measurements taken.

In this article we will present the results of the analysis of the various gas mixtures and the validation of the method, using the statistical evaluation tool Normalized Error (E_n). The results obtained by the GC-FID method were compared with the results obtained by the analytical reference method of non-dispersive infrared NDIR spectroscopy.

Keywords: method validation, CRM, GC-FID

1 Introdução

A produção de Materiais de Referência Certificados (MRC), segundo a norma NP EN ISO 17034:2020, tem vindo a desempenhar um papel cada vez mais relevante nas atividades de medição. Os MRC são um importante meio de disseminação das unidades de grandezas do SI e são também um suporte na credibilidade e confiança de uma medição ou de um laboratório. Têm aplicação na calibração de equipamentos, validação de métodos analíticos e controle da qualidade de medições. O uso de MRC é desta forma um importante meio de validar um método e avaliar a exatidão e a precisão das medições efetuadas, estabelecendo a rastreabilidade metrológica dos resultados obtidos.

O Laboratório de Gases de Referência (LGR) do IPQ é responsável pela produção de vários tipos de MRC, nomeadamente de padrões de misturas gasosas de etanol em nitrogénio (C_2H_5OH/N_2), pelo método gravimétrico de acordo com um procedimento interno, baseado na norma internacional ISO 6142-1:2015, e certificação por espectroscopia de infravermelho não dispersivo (NDIR), de acordo com a norma ISO 6143:2001.

O LGR desenvolveu um método de análise de MRC de misturas gasosas de etanol em nitrogénio, por cromatografia gasosa, com detetor de ionização de chama (GC-FID). Um dos requisitos da norma NP EN ISO/IEC 17025:2018 determina que os métodos desenvolvidos pelo laboratório devem ser validados e que a validação deva ser tão extensiva quanto o necessário, de modo a cumprir com as necessidades de uma dada aplicação, ou campo de aplicação, de modo a termos confiança nos resultados obtidos.

Neste trabalho, são apresentados os resultados da análise das várias misturas gasosas e a utilização da ferramenta de avaliação estatística Erro Normalizado (E_n) na validação do método, segundo a norma internacional ISO 13528:2022. Os resultados obtidos pelos métodos GC-FID e NDIR foram comparados e utilizados como ferramenta de validação do novo método relativamente ao de referência. Esta validação só foi possível com a utilização de MRC.

As medições neste estudo foram realizadas em condições de repetibilidade e de reprodutibilidade. Os ensaios incidiram sobre dois MRC, misturas de C_2H_5OH/N_2 com frações molares entre 50×10^{-6} mol/mol e 500×10^{-6} mol/mol.

2 Preparação de misturas gasosas de etanol em nitrogénio

A produção dos padrões de misturas gasosas de etanol em nitrogénio (C_2H_5OH/N_2), é realizada pelo método gravimétrico, de acordo com um procedimento interno, baseado na norma internacional ISO 6142-1:2015 e de acordo com a norma NP EN ISO 17034:2020.



Figura 1 – Balança comparadora com massas rastreadas ao padrão nacional e seringa utilizada para medir e para introduzir o etanol.

O etanol usado na preparação das misturas gasosas é etanol absoluto seco com pureza superior a 99,7 %. Por ser muito higroscópico, a transferência do etanol do frasco comercial para os *vials* é realizada numa câmara de luvas, com atmosfera controlada. Aquando da preparação das misturas gasosas o etanol é retirado dos *vials* usando uma seringa. A massa exata do etanol que está na seringa, é dada por um comparador mássico, usando massas calibradas e rastreadas ao padrão nacional. (Figura 1).

No processo de produção das misturas gasosas de etanol em nitrogénio, o etanol e o nitrogénio são adicionados individualmente num cilindro, em quantidades previamente calculadas, que permitem obter as frações molares desejadas (Figura 2). A pressão de enchimento é limitada pela condição de garantir que todo o etanol, na mistura final, se irá encontrar em fase gasosa, sem que ocorra a sua condensação.



Figura 2 – Estação de enchimento.

3 Certificação de misturas gasosas por NDIR

As misturas gasosas de etanol produzidas são certificadas de acordo com a norma internacional ISO 6143:2001, recorrendo a um analisador de etanol, com o método analítico por espectroscopia de infravermelho não dispersivo (NDIR). Em cada certificação, a fração molar da mistura preparada é determinada através da comparação da resposta do equipamento a padrões nacionais e internacionais, que permitem garantir a rastreabilidade metrológica das medições efetuadas.

O processo de certificação decorre com a utilização de um sistema de amostragem automático multicanal, ao qual estão ligados todos os cilindros a analisar (Figura 3). Durante a análise, os cilindros são selecionados individualmente e o gás circula pelo analisador. No final, todos os dados obtidos, os registos das análises dos padrões e das amostras são inseridos numa folha de cálculo e corrigidos com os valores de zero e pressão medidos.



Figura 3 – Instalação de certificação de misturas gasosas por NDIR com sistema de amostragem automático.

4 Certificação de misturas gasosas por GC-FID

O LGR desenvolveu um novo método de análise de MRC de misturas gasosas de etanol em nitrogénio, por cromatografia gasosa, com detetor de ionização de chama (GC-FID), com utilização do cromatógrafo gasoso Agilent 6890N. O processo de certificação decorre, à semelhança com o utilizado no NDIR, com a utilização de um sistema de amostragem automático multicanal, ao qual estão ligados todos os cilindros a analisar (Figura 4).



Figura 4 – Instalação de certificação de misturas gasosas por GC-FID.

O referido cromatógrafo está configurado e foi parametrizado de acordo com os dados indicados no Quadro 1.

Quadro 1 – Características da configuração do GC-FID.

Coluna capilar	Elite-WAX ETR Capillary Column (30 m × 0,53 mm I.D. × 2,00 µm)
Detetor	Detetor de ionização de chama (FID)
Válvulas	Sistema de duas válvulas
Introdução das amostras	Válvulas de amostragem de gás de múltipla posição
Temperatura do forno	150 °C (etanol em nitrogénio)
Gás de arraste	Nitrogénio
Amostragem e aquisição de dados	Software Clarity V.8.7.1.19

O equipamento e sistema de amostragem foi controlado com o *software Clarity*, que também permite a aquisição de dados e apresenta-os em forma de cromatograma. Estes dados são colocados numa folha de *Excel* e são depois tratados no programa *XGENLINE* desenvolvido pelo NPL – *National Physical Laboratory*, onde é determinada a curva de calibração. Este *software* permite calcular a função de calibração polinomial de baixo grau (1, 2, 3 ou 4), mais adequada para um conjunto de dados de medição (X, Y), levando em consideração as incertezas e covariâncias associadas aos dados. Assim, a função de calibração determinada é usada para obter estimativas dos valores das frações molares das amostras em análise e das correspondentes incertezas associadas.

5 Validação do método

5.1 Padrões utilizados

De acordo com a norma NP EN ISO/IEC 17025:2018, os métodos desenvolvidos pelo laboratório devem ser validados. A validação deve ser realizada de modo a termos confiança nas medições efetuadas. Para esta validação foram usados os padrões de misturas gasosas que constam no Quadro 2. Os cilindros das misturas têm na referência as letras PRM que significam *Primary Reference Material*.

Quadro 2 – Fração molar e incerteza expandida dos padrões utilizados.

Cilindro	Fração molar, x / (mol/mol)	Incerteza expandida, U / (mol/mol)
PRM102531	$4,218 \times 10^{-5}$	$8,7 \times 10^{-7}$
PRM502588	$2,024 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-6}$
PRM208603	$3,298 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-6}$
PRM200215	$4,897 \times 10^{-4}$	$5,2 \times 10^{-6}$

Na Figura 5, podemos observar um exemplo dos cromatogramas referentes à análise de várias amostras e padrões de misturas de etanol em nitrogénio realizadas num *run*.

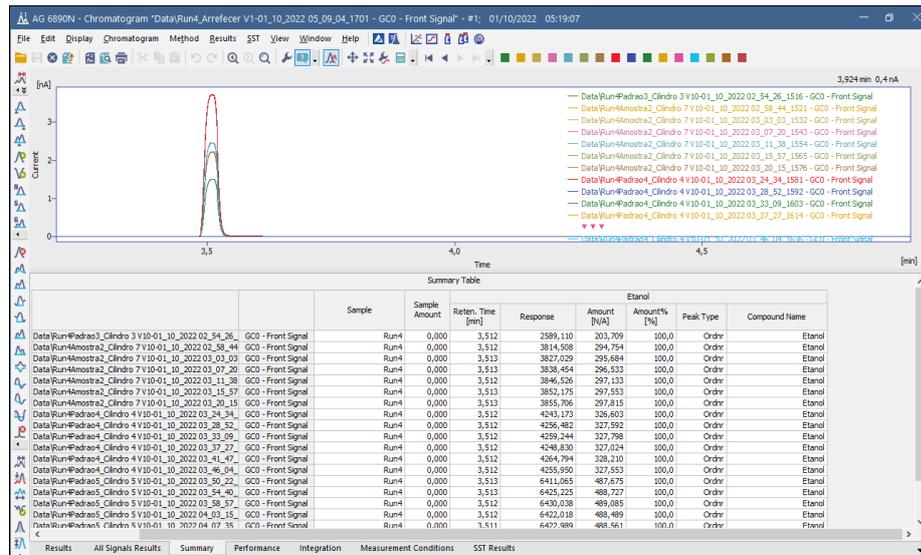


Figura 5 – Cromatograma com a análise das amostras e padrões no run4.

5.2 Resultados

Os resultados das misturas gasosas analisadas e a validação do método, utilizando a ferramenta de avaliação estatística, o Erro Normalizado (E_n), segundo a norma internacional ISO 13528:2022, são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Resultados dos erros normalizados obtidos em três dias de ensaio.

2022-09-28	GC-FID	NDIR 2022-09-15	GC-FID	NDIR 2022-09-15	
CRM	Fr. molar, $x /$ (mol/mol)	Fr. molar, $x /$ (mol/mol)	Incerteza expandida, $U /$ (mol/mol)	Incerteza expandida, $U /$ (mol/mol)	E_n (1)
CRM010391	$1,21 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-4}$	3×10^{-6}	2×10^{-6}	0,0
CRM089492	$2,96 \times 10^{-4}$	$2,96 \times 10^{-4}$	4×10^{-6}	3×10^{-6}	0,1

2022-09-30	GC-FID	NDIR 2022-09-15	GC-FID	NDIR 2022-09-15	
CRM	Fr. molar, $x /$ (mol/mol)	Fr. molar, $x /$ (mol/mol)	Incerteza expandida, $U /$ (mol/mol)	Incerteza expandida, $U /$ (mol/mol)	E_n (2)
CRM010391	$1,21 \times 10^{-4}$	$1,21 \times 10^{-4}$	3×10^{-6}	2×10^{-6}	0,1
CRM089492	$2,97 \times 10^{-4}$	$2,96 \times 10^{-4}$	4×10^{-6}	3×10^{-6}	0,2

2022-10-03	GC-FID	NDIR 2022-09-15	GC-FID	NDIR 2022-09-15	
CRM	Fr. molar, $x /$ (mol/mol)	Fr. molar, $x /$ (mol/mol)	Incerteza expandida, $U /$ (mol/mol)	Incerteza expandida, $U /$ (mol/mol)	E_n (3)
CRM010391	$1,22 \times 10^{-4}$	$1,21 \times 10^{-4}$	2×10^{-6}	2×10^{-6}	0,5
CRM089492	$2,97 \times 10^{-4}$	$2,96 \times 10^{-4}$	4×10^{-6}	3×10^{-6}	0,3

Com base nos resultados dos ensaios de repetibilidade, podemos observar que o módulo do erro normalizado foi sempre menor do que um, nos três dias de ensaio, i.e. $|E_n| \leq 1$, por comparação do método analítico GC-FID com o método analítico de referência NDIR, o que demonstra haver compatibilidade metrológica entre os valores medidos pelos diferentes métodos.

Uma vez que as análises foram repetidas em três dias independentes, os cálculos da fração molar final e da incerteza expandida foram realizados para os dois CRM, contabilizando as incertezas devidas à reprodutibilidade, repetibilidade e calibração (Quadros 4 e 5).

Quadro 4 – Valores finais do CRM010391 contabilizando as incertezas devidas à reprodutibilidade, repetibilidade e calibração.

Data	Fração molar (mol/mol)	Média	Reprodutibilidade	Repetibilidade	Calibração
			$\frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}{\sqrt{3}}$	$\frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u_i^2}{3}}$
2022-09-28	1,21E-04	1,21E-04	4,40E-07	1,52E-07	7,42E-07
2022-09-30	1,21E-04			2,11E-07	7,15E-07
2022-10-03	1,22E-04			4,18E-08	5,39E-07
				1,35E-07	6,65E-07
			média		

Incerteza combinada		$\sqrt{u_{\text{reprodutibilidade}}^2 + u_{\text{repetibilidade}}^2 + u_{\text{calibração}}^2}$
u_c		8,09E-07
Incerteza expandida	U (95 %) (k=2)	1,62E-06
Incerteza relativa	U_{relativo}	1,3 %
Resultado FINAL	$x =$ ($\mu\text{mol/mol}$)	U (95 %)
	121	2

Quadro 5 – Valores finais do CRM089492 contabilizando as incertezas devidas à reprodutibilidade, repetibilidade e calibração.

			Reprodutibilidade	Repetibilidade	Calibração
Data	Fração molar (mol/mol)	Média	$\frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}{\sqrt{3}}$	$\frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u_i^2}{3}}$
2022-09-28	2,96E-04	2,97E-04	2,01E-07	2,77E-07	1,15E-06
2022-09-30	2,97E-04			3,64E-07	1,16E-06
2022-10-03	2,97E-04			3,36E-08	9,12E-07
				3,25E-07	1,07E-06
			média		
Incerteza combinada			$\sqrt{u_{\text{reprodutibilidade}}^2 + u_{\text{repetibilidade}}^2 + u_{\text{calibração}}^2}$		
u_c			1,14E-06		
Incerteza expandida	U (95 %) (k=2)	2,28E-06			
Incerteza relativa	U_{relativo}	0,8 %			
Resultado FINAL	$x =$ ($\mu\text{mol/mol}$)	U (95 %)			
	297	2			

Foram calculados os erros normalizados para os valores finais de fração molar e incerteza expandida com base na estimativa das incertezas devidas à reprodutibilidade, à repetibilidade e à calibração, para os dois CRM (Quadro 6).

Quadro 6 – Valores de Erro Normalizado, contabilizando as incertezas devidas à reprodutibilidade, repetibilidade e calibração.

CRM	NDIR		GC-FID		E_n
	Fr. molar, x / (mol/mol)	Incerteza expandida, U / (mol/mol)	Fr. molar, x / (mol/mol)	Incerteza expandida, U / (mol/mol)	
CRM010391	$1,21 \times 10^{-4}$	2×10^{-6}	$1,21 \times 10^{-4}$	2×10^{-6}	0,0
CRM089492	$2,96 \times 10^{-4}$	3×10^{-6}	$2,97 \times 10^{-4}$	2×10^{-6}	0,3

Observa-se, com base nos Quadros 3 e 6, que os módulos dos erros normalizados são sempre menores que um, $|E_n| \leq 1$, considerando tanto as condições de repetibilidade como as de reprodutibilidade.

Os métodos analíticos NDIR e GC-FID dão resultados comparáveis. As incertezas obtidas são comparáveis para os dois métodos analíticos.

6 Conclusão

Com base nos resultados obtidos, nos ensaios de repetibilidade e de reprodutibilidade, a validação do método de análise de misturas gasosas de etanol em nitrogénio por cromatografia gasosa com detetor de ionização de chama (GC-FID) foi concluída com sucesso.

O módulo do erro normalizado foi sempre menor do que um, nos três dias de ensaio, $|E_n| \leq 1$, por comparação deste método com o método analítico de referência NDIR, dentro das incertezas associadas. Estas incertezas são também comparáveis para os dois métodos analíticos. Estes resultados são uma mais-valia para o LGR pois fica com dois métodos analíticos independentes para a certificação das misturas de etanol em nitrogénio, com a possibilidade de se poderem comparar resultados.

Referências

- [1] ISO 6142-1:2015 – Gas analysis – Preparation of calibration gas mixtures – Part 1: Gravimetric method for Class I mixtures.
- [2] ISO 6143:2001 – Gas analysis – Comparison methods for determining and checking the composition of calibration gas mixtures.
- [3] ISO 13528:2022 – Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons.
- [4] NP EN ISO 17034:2020 – Requisitos gerais para a competência dos produtores de materiais de referência.
- [5] NP EN ISO/IEC 17025:2018 – Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração.



Metrologia no Quotidiano

No nosso dia a dia somos confrontados constantemente com resultados, constatações, comentários e opiniões que nos são debitados como valores exatos e que são utilizados para apresentar conclusões e justificar programas de ação, sejam elas de índole social, política, desportiva ou de qualquer outra dimensão.

Gostaria de refletir aqui sobre dois destes exemplos que inflamam e orientam o nosso quotidiano, mas que, apesar de não resultarem de processos puramente enquadrados na ciência da medição, só deveriam ser aceites pela sociedade se devidamente validados pela demonstração da incerteza associada à sua determinação. Vejamos:

a) Orientam-se políticas sociais a partir dos propalados défices orçamentais, cuja determinação envolve a subtração do total das despesas do governo do total das receitas arrecadadas num determinado período e comparando-o percentualmente com o PIB (que “mede” o total da produção interna do país). Ora, é justamente na compilação da enorme quantidade de parcelas necessárias para a sua determinação (impostos, taxas e sobretaxas, contribuições sociais, despesas com pessoal, pensões, subsídios, aquisições de bens e serviços, investimentos em infraestruturas, juros da dívida pública, subvenções e transferências setoriais, retirando ou não medidas extraordinárias e temporárias, etc., etc.), para não falar na avaliação do PIB (que pretende representar o somatório dos valores financeiros representativos de todos os produtos e serviços finais produzidos, podendo ser avaliado segundo perspetivas diferentes e, portanto, mais não é do que uma estimativa), que emerge a dificuldade na exatidão da determinação do valor pretendido, pelo que só pode ser apresentado se acompanhado pelo valor da incerteza associado!

Em prol de uma cultura de rigor, divulgue-se, por favor, os valores das incertezas associadas aos mágicos resultados económicos periodicamente anunciados.

b) Exemplo inflamador é sempre o resultado de uma boa partida de futebol, especialmente quando as mais recentes tecnologias apoiam as decisões dos intervenientes dos respetivos espetáculos. Estou a falar, neste caso, do VAR (*Video Assistant Referee*). Este sistema utiliza tecnologia associada a técnicas de reconhecimento e tratamento de imagem, sensores de posicionamento e recurso a algoritmos de inteligência artificial, com o objetivo de ajudar o árbitro de campo a tomar decisões. Uma destas decisões é a resultante da avaliação do posicionamento dos jogadores na determinação da regra do “fora de jogo”. O sistema é anunciado como permitindo *acelerar a decisão final e diminuindo a margem de erro nas mesmas*. Mas, afinal, qual é a incerteza associada à “medição” do posicionamento de um jogador relativamente a outro, determinado pela ativação de um sinal rádio emitido por um sensor em movimento e quando os intervenientes podem posicionar-se numa área de 2 500 m² (meio-campo de futebol)?

Em prol de uma cultura de rigor, divulgue-se, por favor, os valores das incertezas associadas à determinação dos mágicos centímetros que exprimem a validação ou anulação dos golos que deliciam os fervorosos adeptos.

Boas medições!

Luis Ribeiro



Esta rubrica, tem por objetivo sugerir um endereço que mereça um *click* dos nossos leitores.

Nesta edição, proponho-me referenciar o trabalho que está a ser levado a cabo por grande parte dos laboratórios Nacionais de metrologia, respetivas associações regionais e organização de topo (o BIPM), com o objetivo de incentivar a emissão e utilização de certificados de calibração digitais (DCC), reconhecidos internacionalmente.

Um dos domínios em que a sua aplicabilidade pode ser revolucionária é o dos dispositivos da Internet das Coisas (IoT), com os quais são normalmente geradas enormes quantidades de dados de medição, cujo desconhecimento da sua qualidade e incerteza poderão torná-los inúteis e não se adequarem ao seu propósito. Estes são dados relativos a processos e ambientes que, apoiados por algoritmos de Inteligência Artificial (AI) permitem tomar decisões baseadas nos resultados obtidos. Todavia, o conhecimento instantâneo dos erros e da rastreabilidade desses resultados, permitida pela possibilidade de automatizar a leitura e interpretação automática dos DCC (*machine readable and interpretable*), permitirá a eliminação da interação humana, com todas as vantagens inerentes.

Deixo aqui alguns *links* para que possam navegar nesta matéria:

- [Digital Calibration Certificates in IoT](#)
- [Basic structure of the DCC by PTB](#)
- [Calibration 4.0 – Information system for usage of digital calibration certificates](#)

Boas leituras.

Luís Ribeiro

A Química das Medições

Como é diferente a incerteza da diferença!

A relevância da avaliação da incerteza de medição associada a grandezas químicas é consensual, embora este tipo de avaliações só ser realizado de forma sistemática na comunidade dos laboratórios acreditados segundo a norma ISO/IEC 17025 e dos Institutos Nacionais de Metrologia. Com efeito, alguns laboratórios de ensaios químicos não acreditados avaliam e consideram a incerteza de medição na interpretação dos resultados que produzem, como laboratórios da indústria e da academia, mas, infelizmente, estes são uma exceção nestes sectores de atividade. Nalgumas latitudes, como no caso da realidade portuguesa, os laboratórios de ensaio acreditados têm de reportar os seus resultados com incerteza, cumprindo a exigência consensual de reportar os resultados analíticos de uma forma que permita a sua interpretação objetiva. Certamente que, num futuro próximo, esta exigência será alargada a toda a comunidade de laboratórios acreditados e, desejavelmente, a todos os outros sectores que tradicionalmente não são sujeitos a um acompanhamento técnico tão rigoroso.

Apesar do facto da avaliação da incerteza de medição estar integrada na rotina dos laboratórios acreditados, observam-se alguns tipos de erros com alguma frequência, fruto da dificuldade em assimilar os princípios deste tipo de avaliações. O surgimento de abordagens simplificadas de avaliação da incerteza de medição tem permitido aos laboratórios proceder a avaliações da incerteza sem o domínio da forma como a incerteza se propaga com impacto em determinações ditas por “cálculo”. Alguns destes tipos de determinações relevantes nalguns sectores analíticos são: (1) o teor de magnésio em águas por subtração da dureza total pela dureza cálcica, (2) teor de crómio III em alimentos por subtração entre teor de crómio total e crómio VI, (3) teor de hidratos de carbono em alimentos por diferença entre 100 % e soma dos outros componentes do alimento, (4) valor energético de alimentos, (5) razão de adsorção de sódio em águas de rega, etc.

Muitos laboratórios estão habituados a combinar componentes de incerteza em termos relativos (i.e. na forma da razão entre a incerteza e o valor medido) porque as medições realizadas envolvem multiplicações e divisões de grandezas de diversas naturezas (i.e. de unidades de medida diferentes) como concentrações, volumes e massas ou porque assumem que as incertezas associadas à precisão e à veracidade são constantes em termos relativos. No entanto, quando o parâmetro determinado envolve a soma ou subtração de grandezas de mesma natureza, a incerteza propaga-se em termos absolutos.

Por exemplo, na determinação da dureza magnésica, M , de símbolo de unidade mmol/L, pela subtração da dureza total, T , pela dureza cálcica, C , ($M = T - C$) de mesma natureza, a incerteza padrão em M , u_M , é igual à raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas padrão em T e C ($u_M = \sqrt{u_T^2 + u_C^2}$); ou seja, se $T = 3,0$ mmol/L, com uma incerteza padrão relativa de 5 % (i.e. $\frac{u_T}{T} = 5\%$), e $C = 2,4$ mmol/L, com uma incerteza padrão relativa de 5 % (i.e. $u_C/C = 5\%$), deve-se calcular M ($M = 3,0 - 2,4 = 0,6$ mmol/L), converter as incertezas relativas em padrão ($u_T = 3,0 \times 5\% = 0,15$ mmol/L; $u_C = 2,4 \times 5\% = 0,12$ mmol/L) e depois calcular a incerteza padrão de M ($u_M = \sqrt{u_T^2 + u_C^2} = \sqrt{0,15^2 + 0,12^2} = 0,19$ mmol/L). A incerteza padrão de M deve ser expandida, por exemplo, para um nível de confiança de 95 % usando um fator de expansão de 2, resultando numa incerteza expandida de 0,38 mmol/L. Ou seja, o valor medido de 0,60 mmol/L tem uma incerteza expandida 0,38 mmol/L sendo reportado o resultado como $(0,60 \pm 0,38)$ mmol/L para um nível de confiança de 95 %. Olhando para valores de incerteza expandida usando um fator igual a dois, a diferença de valores com incertezas expandidas relativas de 10 % (duas vezes os valores de 5 %) produz um valor com uma incerteza relativa de 63 % (i.e. $0,38/0,60$). Perante este valor de incerteza, os analistas primeiro questionam-se se as contas estão certas e depois de concluir sobre a correção das mesmas questionam-se se a medição não será demasiada incerteza para o fim em vista. Se pretendermos avaliar se uma água de consumo humano tem um teor de magnésio inferior a 2,06 mmol/L (valor máximo recomendado em águas de consumo humano pelo Decreto-Lei 152/2017 de 7 de dezembro equivalente a 50 mg/L), o valor de incerteza associado a uma medição a 0,60 mmol/L é adequado porque, de acordo com esta estimativa, o teor de magnésio será inferior a 0,98 mmol/L, i.e. $(0,60 + 0,38)$ mmol/L para um nível de confiança elevado (maior que 97,5 %) e menor que 2,06 mmol/L para um nível de confiança ainda maior. Caso o valor medido mais a incerteza seja maior que o valor máximo recomendado ou admissível, o analista terá de ponderar a adequação da incerteza. Se a incerteza for considerada demasiado alta, pode-se optar-se por medir o teor de magnésio de forma direta por espectrometria atómica, expectavelmente com menor incerteza. Considerando que a incerteza relativa correspondendo ao resultado de medição igual a $(0,60 \pm 0,38)$ mmol/L é muito elevada, alguns laboratórios podem optar por reportar o resultado como $\leq 0,98$ mmol/L sendo que é importante usar o símbolo " \leq " em vez de "<" porque existe uma probabilidade relevante do valor da grandeza medida se encontrar ligeiramente acima de 0,98 mmol/L. No exemplo descrito, se T e C forem mais próximos, o valor de M pode estar associado uma incerteza relativa maior que 100 % cuja apresentação mereceria a ponderação do facto da concentração de magnésio não poder ser negativa como sugerido por uma incerteza maior que o valor medido.

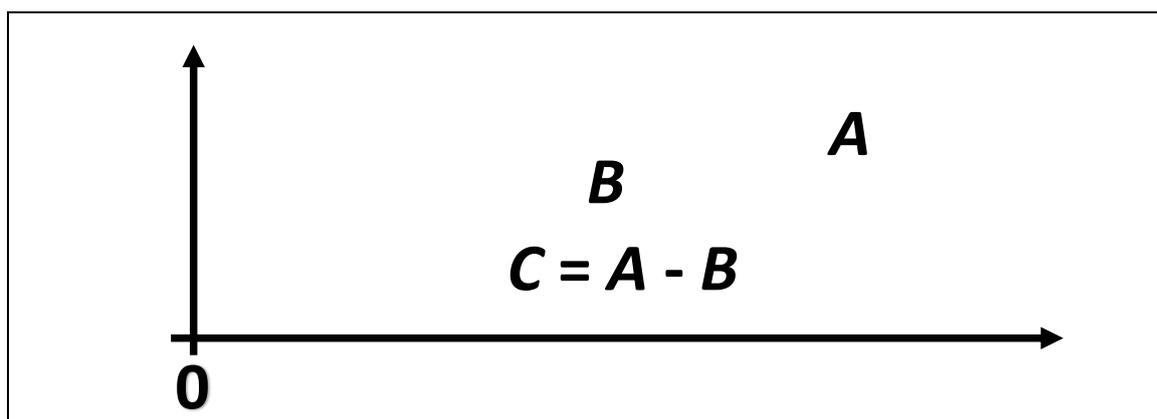


Figura. A incerteza propaga-se em termos absolutos numa diferença. Quando o valor da diferença é baixo, a sua incerteza relativa pode ser muito elevada.

A descrição e o exemplo apresentados provam que o valor de incerteza deve ser determinado seguindo escrupulosamente as leis que regem a forma como esta se propaga, e as ambições que temos para o seu valor devem ser consideradas na ponderação da necessidade de se seguir outras estratégias de medição menos incertezas.

Consultas sugeridas:

R. Bettencourt da Silva, *Managing the uncertainty and limit of quantification of parameters determined by the difference between independently measured values*, 2022:

<https://mechem.rd.ciencias.ulisboa.pt/>

R. Bettencourt da Silva, *Kragten method for uncertainty propagation: Easy way of doing difficult things!*, 2023: <https://mechem.rd.ciencias.ulisboa.pt/>.

Ricardo Bettencourt da Silva

EVENTOS

CONFMET 2023 *Conferência Nacional da SPMet, "Medir para Apoiar o Sistema Alimentar Mundial"*

Organização:

- SPMET- Sociedade Portuguesa de Metrologia
- RELACRE - Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal
- INIAV - Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária

Apoios:

- ADMedida
- Ordem dos Engenheiros
- IPQ - Instituto Português da Qualidade

Evento presencial, no INIAV, Oeiras, 16 e 17 de novembro de 2023

Mais informação em:

<http://www.spmet.pt/index.html>



METROLOGIA 2023

Metrologia como ferramenta para desenvolvimento industrial do Brasil

Organização:

- Sociedade Brasileira de Metrologia

Apoios:

- IRD – Instituto de Radioproteção e Dosimetria
- INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

Evento presencial, Itaipava, Petrópolis - RJ, Brasil, de 28 a 30 de novembro de 2023

Ocorrendo em simultâneo:

- CBM – 12.º Congresso Brasileiro de Metrologia;
- SEMETRO – XV Congresso Internacional de Metrologia Elétrica;
- CIMMEC – VII Congresso Internacional de Metrologia Mecânica;
- CBMRI – IX – Congresso Brasileiro de Metrologia das Radiações Ionizantes ;
- Remeq-I – VII Workshop da Rede de Metrologia Química do Inmetro;
- CBMO – V Congresso Brasileiro de Metrologia Óptica.

Mais informação em:

<https://metrologia2023.org.br/>



LABSUMMIT2024

*Evento de 3 dias, com mais de 30 expositores,
mais de 50 palestrantes,
mais de 100 sessões paralelas*

Organização:

- Ambidata group,
- ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade
- RELACRE - Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal

Apoios institucionais:

ACERTES, APQ, CIP, eurolab,
eurolab-Espanha, felab, P-BIO, SPM, SPMET

Evento presencial, Convento de São Francisco, Coimbra, de 16 a 18 de maio de 2024

Mais informação em:

<https://www.labsummit.com/>



IMEKO 2024, XXIV World Congress

Think Metrology

Organização:

- IMEKO – *International Measurement Confederation*
- PTB - *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*



Congresso mundial IMEKO, Hamburgo, Alemanha, de 26 a 29 de agosto de 2024

Mais informação em:

<https://www.imeko2024.org/home/>

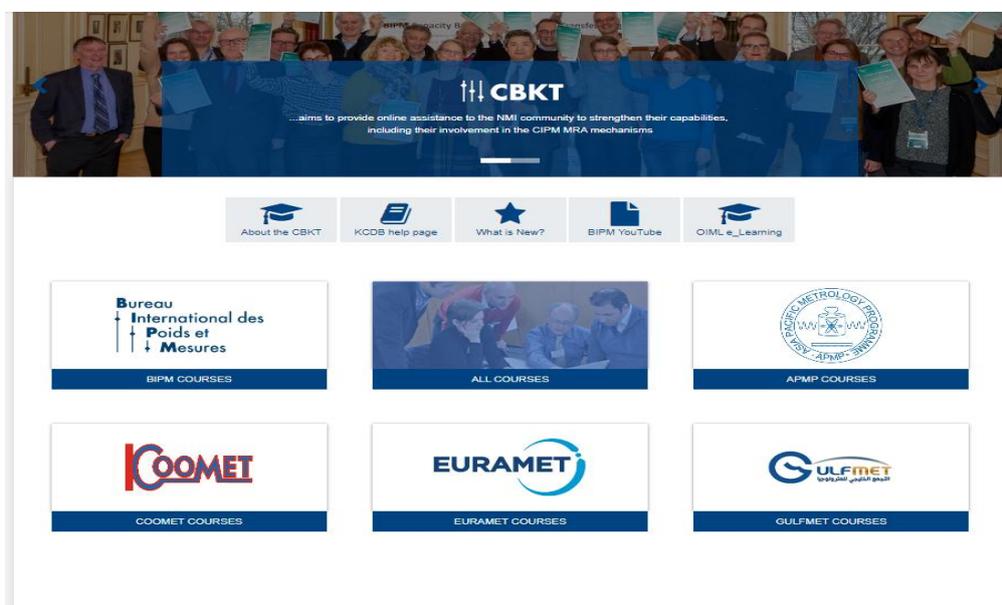
MONOGRAFIAS

No sítio *internet* do BIPM estão disponíveis em inglês e, por vezes em francês, documentos elaborados pelo Grupo de Trabalho 1 (JCGM-WG1) responsável pelo Guia para a expressão da incerteza de medição (GUM) e pelo Grupo de Trabalho 2 (JCGM-WG2) responsável pelo Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM).



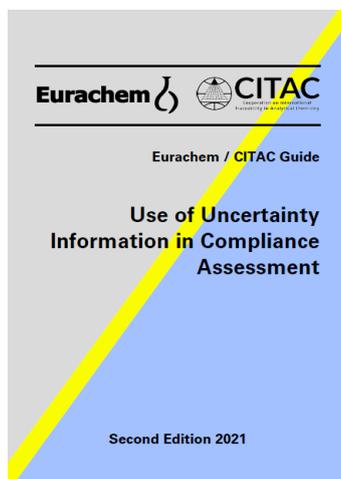
<https://www.bipm.org/fr/committees/jc/jcgm/publications>

O sítio *internet* do BIPM também disponibiliza uma plataforma *e-learning* com vários materiais didáticos em: <https://e-learning.bipm.org/>

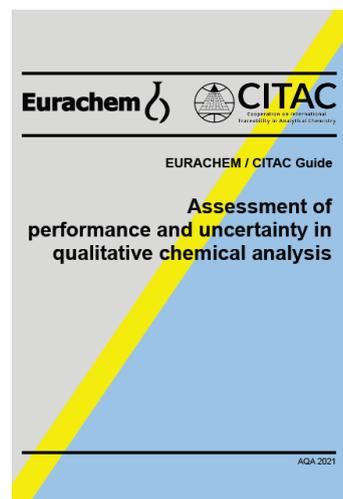


No sítio *internet* da EURACHEM, estão disponíveis vários guias, sendo os mais recentes:

[Use of uncertainty information in compliance assessment](#)



[Assessment of performance and uncertainty in qualitative chemical analysis](#)



No sítio *internet* do ForMEQ – Forum de Metrologia e Examinologia em Química, encontra-se também uma série de publicações em língua portuguesa, desde traduções de guias, até Notas Técnicas originais e muito úteis.

<https://formeq.org/publicacoes/>

SPMet

Sociedade Portuguesa
de Metrologia

CONFMET 2023

16-17 Novembro
INIAV-Oeiras

MEDIR

PARA APOIAR
O SISTEMA ALIMENTAR MUNDIAL

kg

m

s

A

K

cd

mol

ISSN 2182-5424

| n.º 17 | Novembro de 2023

www.spmet.pt