

METRO4JUSTICE

LIBRO BIANCO
SULLA METROLOGIA
FORENSE
nel procedimento penale

Garantire l'affidabilità delle prove
scientifiche basate su misurazioni

A cura di:
Gabriella Di Paolo
Alessandro Ferrero
Dario Petri



UNIVERSITÀ
DI TRENTO

METRO4JUSTICE

LIBRO BIANCO

SULLA

METROLOGIA FORENSE

nel procedimento penale

Garantire l'affidabilità delle prove
scientifiche basate su misurazioni

A CURA DI:
Gabriella Di Paolo
Alessandro Ferrero
Dario Petri

Università degli Studi di Trento



UNIVERSITÀ
DI TRENTO

Pubblicato da

Università degli Studi di Trento

via Calepina, 14 - 38122 Trento

casaeditrice@unitn.it

www.unitn.it

Progetto grafico e impaginazione: Gabriella Di Paolo, Alessandro Ferrero, Luca Pressacco

Grafica di copertina: Gabriella Di Paolo, Alessandro Ferrero

©2025 Gli Autori/Le Autrici

ISBN 978-88-5541-130-1

DOI 10.15168/11572_468311

L'edizione digitale è rilasciata con licenza Creative Commons Attribuzione - Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale.



Libro in Open Access scaricabile gratuitamente dall'archivio IRIS - Anagrafe della ricerca (<https://iris.unitn.it/>)



**Finanziato
dall'Unione europea**
NextGenerationEU

Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza

**Missione 4 - Componente C2 - Investimento 1.1.
«Fondo per il Programma Nazionale di Ricerca e
Progetti di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN)»**

Titolo del progetto

Toward a more reliable scientific evidence by means of forensic metrology. A novel approach against miscarriage of justice

Verso una maggiore affidabilità della prova tecnico-scientifica per mezzo della metrologia forense. Un nuovo antidoto agli errori giudiziari

Codice del progetto

2022C9STX2

Codice CUP

E53D23006650006

Soggetto attuatore

Università degli Studi di Trento
Via Calepina, 14
CAP 38122 – TRENTO

Obiettivo principale dell'operazione

Sostenere gli investimenti in ricerca e sviluppo, promuovere l'innovazione e la diffusione delle tecnologie e rafforzare le competenze



**POLITECNICO
MILANO 1863**

GLI AUTORI

GIULIA BARONE, Assegnista di Ricerca di Diritto processuale penale – Università degli Studi dell’Insubria

GABRIELLA DI PAOLO, Professoressa Ordinaria di Diritto processuale penale – Università degli Studi di Trento

ALESSANDRO FERRERO, Professore Ordinario di Misure elettriche ed elettroniche – Politecnico di Milano

DARIO PETRI, Professore Ordinario di Misure elettriche ed elettroniche – Università degli Studi di Trento

LUCA PRESSACCO, Ricercatore di Diritto processuale penale – Università degli Studi di Trento

RICCARDO ROSCINI-VITALI, Assegnista di Ricerca di Diritto processuale penale – Università degli Studi di Trento nonché Avvocato del Foro di Verona

VERONICA SCOTTI, Assegnista di Ricerca e Docente a contratto – Politecnico di Milano nonché Avvocato del Foro di Milano

Pur trattandosi di un lavoro frutto di una riflessione congiunta e di costante confronto, il contributo individuale degli Autori è identificabile come segue:

- Giulia Barone ha redatto i paragrafi 3.1, 4.2.1 e 4.2.2;
- Gabriella Di Paolo, PI, ha redatto la Prefazione e ha contribuito, con gli altri autori, alla redazione dei paragrafi 4.1 e 4.2; ha inoltre revisionato, corretto e integrato tutti gli altri capitoli e paragrafi;
- Alessandro Ferrero ha redatto i paragrafi da 2.2 a 2.4, 4.1 e 6;
- Dario Petri ha redatto i paragrafi da 2.2 a 2.4 e 4.1;
- Luca Pressacco ha redatto i paragrafi 1, 3.3 e 4.2.4;
- Riccardo Roscini-Vitali ha redatto i paragrafi 3.2, 4.2.3, 5.4 e 5.5;
- Veronica Scotti ha redatto i paragrafi 2.1 e da 5.1 a 5.3.

INDICE

Prefazione	13
1 Verità processuale, metrologia forense ed epistemologia giudiziaria: cenni introduttivi	19
2 Fondamenti di metrologia	23
2.1 Premessa	23
2.2 Il modello di misura e l'identificazione delle sorgenti di incertezza	24
2.2.1 Concetti generali e lessico	24
2.2.2 Il modello di misura	30
2.2.3 Le sorgenti di incertezza	35
2.3 Incertezza e dubbio	39
2.3.1 Requisiti e ipotesi	39
2.3.2 Incertezza tipo e incertezza estesa	40
2.3.3 L'incertezza tipo composta	44
2.3.4 Il dubbio di decisione errata	48
2.4 Validazione della misura	50
2.4.1 Taratura	50
2.4.2 Riferibilità metrologica	53
3 Metrologia e procedimento probatorio	57
3.1 L'ammissione della prova tecnico-scientifica	57
3.1.1 Una ricognizione sulle posizioni della dottrina italiana in ordine al vaglio di ammissibilità della prova scientifica	57
3.1.2 Criteri di ammissione della prova tecnico-scientifica e metrologia forense	62
3.1.3 Cultura metrologica, nomina dell'“esperto” e formulazione del quesito peritale	65
3.2 L'acquisizione della prova tecnico-scientifica	66
3.2.1 L'approccio metrologico nella perizia e nella consulenza tecnica	66
3.3 La valutazione della prova	72
3.3.1 Valutazione della prova, decisione e motivazione nel processo penale	72

3.3.2	Criteri di valutazione della prova tecnico-scientifica e metrologia forense	74
3.3.3	I “due stadi” della valutazione probatoria e la metrologia forense	77
4	Linee guida	79
4.1	Linee guida per i tecnici	79
4.1.1	Analisi della scena del crimine	79
4.1.2	Rilevazione delle tracce con tecniche adeguate e relativa documentazione	80
4.1.3	La conservazione dei reperti	81
4.1.4	Analisi delle tracce e identificazione dell’informazione target (il c.d. misurando)	81
4.1.5	Analisi delle tracce e processi di misura	82
4.1.6	Interpretazione dei risultati: non esistono certezze!	83
4.1.7	Presentazione dei risultati: comunicare la scienza in modo adeguato	84
4.2	Linee guida per gli operatori del diritto	85
4.2.1	Fase investigativa	85
4.2.2	L’ammissione della prova tecnico-scientifica	86
4.2.3	L’acquisizione della prova tecnico-scientifica	88
4.2.4	La valutazione della prova tecnico-scientifica	90
5	Casi di studio	93
5.1	Etilometro	93
5.2	Il caso di Genova	93
5.2.1	il caso: l’accusa e i fatti da accertare	94
5.2.2	gli accertamenti tecnico-scientifici compiuti	94
5.2.3	la decisione del giudice	96
5.2.4	i possibili contributi di un corretto uso della cultura metrologica al caso	96
5.3	Il caso di Torino	97
5.3.1	Il caso:l’accusa e i fatti da accertare	97
5.3.2	Gli accertamenti tecnico scientifici compiuti	98
5.3.3	La decisione del giudice	98
5.3.4	I possibili contributi di un corretto uso della cultura metrologica al caso	100
5.4	Il caso Lorandi	100

5.4.1	L'accusa e i fatti da accertare	100
5.4.2	Gli accertamenti tecnico-scientifici compiuti	101
5.4.3	La decisione del giudice	102
5.4.4	I possibili contributi di un corretto uso della cultura metrologica al caso	103
5.5	Il caso Taffi Pamio	105
5.5.1	L'accusa e i fatti da accertare	106
5.5.2	Gli accertamenti tecnico-scientifici compiuti	107
5.5.3	La decisione del giudice	108
5.5.4	I possibili contributi di un corretto uso della cultura metrologica al caso	108
6	Conclusioni	113
6.1	La metrologia: un prezioso alleato per comprendere e comunicare i limiti intrinseci della scienza	113
6.2	La metrologia quantifica l'incertezza	114
6.3	La metrologia consente di selezionare il rilievo più affidabile	114
6.4	La metrologia consente di quantificare il dubbio	115
6.5	La cultura metrologica come antidoto agli errori giudiziari	116
	Riferimenti bibliografici	117

PREFAZIONE¹

Il presente Libro Bianco raccoglie, sintetizzandoli, i risultati del progetto di ricerca biennale dal titolo *Verso una maggiore affidabilità della prova tecnico-scientifica per mezzo della metrologia forense. Un nuovo antidoto agli errori giudiziari* (codice progetto 2022C9STX2) finanziato dall'Unione europea – Next Generation EU, nell'ambito del bando PRIN 2022 del Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR).

L'asse portante del progetto – che ha visto coinvolte, con il coordinamento dell'Università di Trento, l'Università dell'Insubria e il Politecnico di Milano² – riguardava l'impiego dei concetti e delle metodologie tipiche della metrologia in ambito forense. Sullo sfondo l'ipotesi – chiaramente espressa fin dal titolo – che la cultura metrologica possa costituire un prezioso ausilio nella gestione della c.d. prova scientifica, in particolare (ma non soltanto) ai fini della valutazione dell'affidabilità dei risultati ottenuti tramite l'applicazione di tecniche e metodi delle scienze forensi, così minimizzando il rischio di “falsi positivi” (ossia, condanne ingiuste) nell'amministrazione della giustizia penale.

L'attività di ricerca, condotta anche su “casi di studio”, e il presente Libro Bianco portano a concludere che l'ipotesi a suo tempo formulata fosse corretta. Infatti, come emergerà meglio nel prosieguo del presente lavoro e nelle conclusioni, se la scienza opera entro un *continuum* di incertezze, l'applicazione dei principi metrologici nei diversi settori delle scienze forensi rappresenta un significativo valore aggiunto in quanto la metrologia, essendosi posta, fin dalle origini, il problema di individuare, quantificare ed esprimere l'incertezza insita in ogni risultato di misura, consente di farlo anche per l'incertezza intrinsecamente associata a ogni misurazione e alle indagini eseguite nel contesto giudiziario, per supportare l'accertamento di fatti penalmente rilevanti. L'approccio metrologico garantisce dunque maggiore trasparenza, affidabilità e riproducibilità ai risultati delle indagini scientifiche, contribuendo a rafforzare la tenuta epistemologica del sapere tecnico utilizzato nel processo.

Si tratta, come s'intende, di un contributo tutt'altro che irrilevante se si considera che l'attualità ci espone continuamente a situazioni e processi di enorme complessità, e che la scienza si è attrezzata con modelli sempre più raffinati (e con la necessaria potenza di calcolo) per analizzare questi fenomeni, senza però mai riuscire ad attingere a “certezze” o “verità” assolute. È infatti ormai unanimemente riconosciuto che l'incertezza è una componente intrinseca e ine-

¹A cura di Gabriella Di Paolo.

²Per ulteriori informazioni sul gruppo di ricerca e sulle attività svolte, si rinvia al sito web del progetto, <https://www.giurisprudenza.unitn.it/4642/prin-2022>.

vitabile della scienza e pervade anche la società, poiché non esiste disciplina sperimentale che possa dirsi del tutto scevra da margini di errore.

Con queste premesse, l'incertezza associata alle conclusioni a cui perviene la scienza è diventata, ormai da tempo, uno dei temi più complessi da gestire e comunicare, in tutti gli ambiti. Ciò è dimostrato in maniera esemplare, fra l'altro, dall'esperienza maturata durante la pandemia, così come dalle persistenti difficoltà nel formulare proiezioni attendibili sull'evoluzione dei modelli climatici legati al fenomeno del riscaldamento globale, nonché, ancora, per quanto qui interessa, da recenti casi di cronaca nera ad alta rilevanza mediatica nel nostro Paese³. Benché diversissime fra loro, tutte queste esperienze hanno nitidamente messo in luce la complessità e delicatezza del rapporto tra conoscenza scientifica, incertezza e processi decisionali, specialmente quando la scienza viene assunta quale parametro di riferimento nelle scelte e/o decisioni istituzionali in contesti caratterizzati da elevato impatto sociale.

Stando così le cose, non v'è dubbio che la metrologia, con i suoi richiami a una costante e rigorosa valutazione dei limiti di validità della scienza, possa rivelarsi una disciplina preziosa anche nei contesti giurisdizionali, per un molteplice ordine di ragioni.

Anzitutto, comprendere (e accettare) l'esistenza di una ineliminabile e intrinseca incertezza non significa mettere in dubbio il valore del metodo scientifico o la possibilità di produrre una conoscenza affidabile: al contrario, vuol dire prendere atto di come tutte le informazioni sul mondo di cui siamo in possesso siano frutto di osservazioni e misure che sono sempre caratterizzate da un margine di dubbio.

Inoltre, l'insegnamento principale della metrologia è che nel mondo della scienza un dato non è mai soltanto un numero: è un insieme di valori, caratterizzato dall'incertezza di misura, che determina la probabilità con cui si suppone che il valore cercato appartenga a tale insieme e, quindi, l'attendibilità del dato. E gran parte della scienza moderna consiste proprio nel valutare, quantificare, gestire e, ove possibile, ridurre queste incertezze.

Infine, trasferire la consapevolezza circa i limiti intrinseci della scienza dalla comunità scientifica al mondo giudiziario appare non solo doveroso, ma anche di cruciale importanza poiché accettare che l'ineludibile incertezza della scienza possa essere quantificata e governata, ma mai del tutto eliminata, scongiura o riduce il rischio che i risultati delle indagini scientifiche vengano interpretati come "verità assolute". Al contrario, è necessario che chi formula

³Ci si riferisce ai casi di cronaca nera diventati oggetto di ricostruzione in forma di fiction, docufilm o inchiesta giornalistica. Si pensi, per fare un esempio molto recente, alla trasmissione televisiva RAI *Il caso*, del giornalista Stefano Nazzi, che ha minuziosamente ricostruito i profili processuali e mediatici di quattro grandi casi di cronaca nera, ossia il caso di Cogne (relativo all'omicidio del piccolo Samuele Lorenzi), il caso di Brembate di Sopra (riguardante l'omicidio di Yara Gambirasio), il caso di Perugia, (concernente l'omicidio di Meredith Kercher), e il caso del *serial killer* Donato Bilancia. Il tutto, indulgiando anche sugli aspetti critici delle indagini scientifiche svolte. Cfr. <https://www.raiplay.it/programmi/ilcaso>.

l'accusa e chi giudica sappia distinguere, ciascuno per quanto di propria competenza, il grado di affidabilità delle informazioni ottenute, comprendendo il peso e i limiti del metodo e degli strumenti scientifici utilizzati, nonché i limiti derivanti da inconsapevoli *bias* cognitivi propri sia dell'esperto che dell'operatore del diritto. In questo modo, si minimizza il rischio di errori giudiziari, che spesso derivano proprio dall'interpretare (frintendendola) un'informazione probabilistica come una certezza, oppure dall'incapacità degli operatori di "prendere le distanze da sé stessi", dai propri pregiudizi e convincimenti.

Se si condivide quanto appena delineato, può comprendersi perché la sfida del futuro consisterà verosimilmente nella diffusione, anche tra i vari soggetti coinvolti nell'amministrazione della giustizia penale (scienziati forensi e operatori del diritto, ciascuno per quanto di propria competenza), di un'adeguata cultura metrologica e delle sue "chiavi di lettura" dell'incertezza.

Dal dibattito registrato nel panorama internazionale su come assicurare la validità scientifica delle discipline forensi – di cui sono espressione il *Report* elaborato dal *Council of Advisors on Science and Technology* del Presidente Obama (c.d. PCAST Report) nel 2016⁴ e la c.d. Dichiarazione di Sydney *Revisiting the essence of forensic science through its fundamental principles* del 2022⁵ – nonché dal confronto diretto con alcuni esperti in occasione delle attività di divulgazione scientifica e/o di formazione legate al presente progetto⁶, si ha infatti l'impressione che gli scienziati forensi spesso ignorino il possibile contributo della metrologia nel valutare e governare l'incertezza, oppure, nella migliore delle ipotesi, lo considerino marginale, per non dire superfluo. Lo stesso può dirsi per gli operatori del diritto, la cui ignoranza appare però più comprensibile e giustificata per la naturale posizione di asimmetria informativa in cui versano rispetto agli esperti delle scienze forensi.

Depone a favore della prima impressione (l'ignoranza della metrologia da parte degli scienziati forensi) il fatto che i documenti internazionali appena citati facciano ampio ricorso, verosimilmente in modo inconsapevole, ai concetti tipici della metodologia, senza però utilizzarne il lessico tecnico e i relativi principi fondamentali. Del resto, tra i redattori non figurano esperti della scienza delle misure, essendosi preferiti scienziati (tutti di chiara fama) appartenenti ad altri domini (biologia, etc.).

Depone invece a favore della seconda impressione (la marginalità o superfluità della metrologia) la convinzione – talora espressa in modo esplicito dagli scienziati forensi - dell'au-

⁴Si veda [PCAST, 2016].

⁵Si veda [Roux et al., 2022].

⁶Ci si riferisce, ad esempio, allo scambio di opinioni tra i componenti del gruppo di ricerca e illustri scienziati forensi in occasione: della conferenza annuale internazionale della *American Academy of Forensic Sciences*, tenutasi a Baltimora (MD, USA) dal 17 al 22 febbraio 2025; della *International Summer Forensic horizons: investigating truth in the digital and AI era. Challenges and opportunities in digital forensics, cybersecurity, and AI-driven investigation*, svoltasi a Scicli dal 13 al 19 luglio 2025.

tosufficienza degli standard di *quality assurance in forensic science* elaborati in ambito europeo dal 2009 in poi. Si allude, in particolare, al *corpus* normativo⁷ costituito dal diritto dell'Unione europea in tema di accreditamento dei laboratori, dalla variegata serie di norme ISO 21043, nonché dai requisiti analitici e dalle raccomandazioni nella scienza forense emanate dall'ENFSI (*European Network of Forensic Science Institutes* – Rete Europea degli Istituti di Scienze Forensi)⁸.

Si tratta di una presa di posizione suggestiva, cui può però obiettarsi che l'esistenza di tali standard non è stata sufficiente a impedire clamorosi errori giudiziari. Per non dire poi del fatto che i documenti in questione ignorano totalmente gli aspetti metrologici, tant'è vero che spesso propongono definizioni di concetti metrologici diverse da quelle ufficiali del BIPM, pubblicate nell'*International Vocabulary of Metrology* (VIM) e interamente recepite dalla stessa ISO nella ISO/IEC Guide 99:2007. Infine, e soprattutto, ignorando gli aspetti metrologici, gli standard di *quality assurance* in discorso portano alla conclusione – a nostro avviso errata – che gestire le attività delle scienze forensi secondo i dettami tipici del controllo di qualità possa evitare gli errori. Ammesso e non concesso che tale approccio possa evitare gli errori macroscopici, resta sempre il fatto che esso non palesa il dubbio implicito in ciascun risultato di misura e quindi non fornisce all'autorità giudiziaria le informazioni necessarie per valutare l'attendibilità dell'evidenza scientifica.

Alla luce di quanto esposto, può quindi affermarsi, senza timore di esagerazione, che l'integrazione dell'approccio metrologico nell'ambito di applicazione delle scienze forensi costituisca un fattore decisivo di avanzamento degli studi di epistemologia giudiziaria. A fronte dei tentativi di imbrigliare le manifestazioni dell'incertezza attraverso la logica e la probabilità, e alla attuale netta contrapposizione fra i sostenitori del probabilismo logico e i fautori della probabilità soggettiva, quale schema teorico più adeguato per fronteggiare i problemi della prova in sede giudiziaria, la metrologia fornisce infatti rigorosi metodi matematici e statistici per identificare, valutare e comunicare in termini quantitativi – mediante l'individuazione degli intervalli entro i quali ci si aspetta che il valore del misurando cada con una data probabilità – l'incertezza associata al risultato dell'attività di misurazione. Si tratta di un contributo prezioso e indispensabile, tanto nel caso in cui l'incertezza debba essere interpretata come grado

⁷Si allude alla Decisione EU 2009/905/JHA *on Accreditation of forensic service providers carrying out laboratory activities*, alle *Guidelines ENFSI for the single laboratory Validation of Instrumental and Human Based Methods in Forensic Science* e agli standard ISO/IEC 17025:2017, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. I nuovi standard ISO per le scienze forensi sono invece contenuti nelle norme della serie ISO 21043.

⁸L'ENFSI è l'organismo tecnico di riferimento europeo, sia dell'Unione europea, sia del Gruppo di Cooperazione Europeo delle Polizie nonché dell'Europol e dell'Interpol, riguardo la definizione degli standard tecnici utilizzati dai Laboratori di Polizia Scientifica.

(oggettivo) di conferma di una determinata proposizione, quanto nel caso in cui essa venga intesa diversamente, quale misura della propensione (soggettiva) ad affermare la propria opinione individuale, spesso apoditticamente maturata, su determinati accadimenti. Su un piano diverso ma complementare, poi, con l'attenzione nei confronti dell'operatore (considerato parte integrante del sistema di misura), la metrologia sembra recepire e integrare gli approdi delle scienze cognitive sui c.d. "pregiudizi del ricercatore", e sul conseguente rischio che un atteggiamento "verificazionista" degli operatori (siano essi gli organi inquirenti o gli scienziati forensi) possa influenzare negativamente, sin dalle prime battute, l'indagine scientifica, contribuendo a trascurare – a volte in maniera irreparabile – tracce e possibili ricostruzioni alternative.

Vi è quanto basta per auspicare, in conclusione, che l'approccio metrologico e la consapevolezza circa il margine di incertezza, insito in ogni misurazione e analisi scientifica, non siano considerati come un elemento di fragilità o debolezza dell'accertamento giudiziario, bensì come un presidio di garanzia e un prezioso alleato: riconoscere che l'incertezza non può essere eliminata del tutto, ma può essere quantificata e governata, consente infatti al giudice e alle parti di valutare le evidenze scientifiche con la necessaria prudenza critica, di collocare i dati scientifici entro i loro limiti epistemici e di fondare la decisione su un apprezzamento più equilibrato e proporzionato degli elementi processuali. In altri termini, e come sottolineato anche dai curatori della mostra dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) intitolata *Incertezza. Interpretare il presente, prevedere il futuro*: «ammettere l'incertezza non è un limite ma una risorsa che apre a nuove opportunità, e il passaggio da limite a risorsa sta proprio nell'imparare a comprenderla e gestirla»⁹.

Trento, 20 agosto 2025

⁹La mostra *Incertezza. Interpretare il presente, prevedere il futuro*, a cura dell'INFN, si è tenuta presso il Palazzo delle Esposizioni di Roma ed era inserita nel più ampio progetto di Azienda Speciale Palaexpo *Tre Stazioni per Arte-Scienza*, promosso da Roma Culture. Alla base della mostra vi era l'idea che la valorizzazione dell'incertezza, intesa non solo come conoscenza dei limiti di analisi e misure, ma anche come aspetto cardine della nostra esistenza, debba passare non solo per gli scienziati e la scienza in sé, ma anche attraverso l'arte e la cultura ad ogni livello. Cfr. Newsletter INFS n. 88, in https://www.infn.it/newsletter-eu/pdf/NEWSLETTER_INF_N_88_italiano.pdf.

1

VERITÀ PROCESSUALE, METROLOGIA FORENSE ED EPISTEMOLOGIA GIUDIZIARIA: CENNI INTRODUTTIVI¹⁰

Il giudizio penale ha rinunciato da tempo alla pretesa di dispensare certezze oggettive e assolute. Nel contesto giudiziario è ormai noto che i metodi attraverso cui le prove necessarie per la decisione vengono acquisite e utilizzate nel processo influenzano il risultato stesso dell'indagine giudiziaria. In altre parole, la "verità" che emerge nel processo non può essere altro se non una "verità giudiziaria". Con ciò non si intende affermare che si tratta di una verità "minore", formale o convenzionale, bensì che essa si forma secondo uno specifico metodo probatorio giudiziario¹¹. È altrettanto noto che il ragionamento giudiziario non può mai essere ricondotto a una struttura esclusivamente deduttiva, ovvero al tradizionale sillogismo giudiziario, ove data la premessa maggiore (la norma) e la premessa minore (il fatto), si giunge secondo i parametri della logica classica alla conclusione (il dispositivo).

Di fronte a queste acquisizioni, le dottrine generali del processo riconoscono pacificamente il carattere probabilistico della cosiddetta "verità processuale", la quale soffre – e non potrebbe essere diversamente – dei limiti e della fallibilità di ogni altra forma di conoscenza umana¹².

Ciò su cui le teorie usualmente divergono è la concezione della probabilità più adeguata in relazione alle esigenze tipiche del contesto giudiziario¹³.

¹⁰Il Par. 1 è a cura di Luca Pressacco.

¹¹Sul punto, v. [Ubertis, 2021], p. 3, il quale osserva che «ciò che afferisce alla giurisdizione è una *verità giudiziale*, caratterizzata per essere sia contestuale (cioè dipendente dalle conoscenze, pure metodologiche, date nel momento in cui è perseguita, come avviene in ogni ambito di ricerca), sia funzionale a quell'obiettivo di giustizia storicamente determinato dal vario comporsi dei valori presenti in mezzo al popolo nel cui nome (ai sensi dell'art. 101 comma 1 Cost.) la giustizia è amministrata».

¹²Cfr. [Canzio, 2022].

¹³Per una rassegna critica delle differenti interpretazioni del concetto di probabilità in ambito giudiziario, v. [Mura, An. & Mura, Al., 2018].

La probabilità statistica (o frequentista) non ha mai goduto di particolare fortuna in relazione al fenomeno processuale. Essa, identificandosi con la frequenza relativa con cui un determinato evento si verifica in una serie di prove ripetute a parità di condizioni, mal si ataglia alla sede giudiziaria, ove si discute di vicende umane per definizione irripetibili. Pertanto, gli studiosi che approfondiscono la questione si dividono tra i sostenitori della cosiddetta “probabilità logica” e quelli che invece propugnano una concezione soggettiva della probabilità.

Secondo la prima interpretazione, la probabilità rappresenta il grado di sostegno logico che le premesse forniscono a una certa conclusione. Per questa via, si riconosce la natura proposizionale della verità processuale (il processo costituisce un “universo linguistico”) e, al medesimo tempo, si sostiene il suo carattere oggettivo, dipendente dalle conoscenze disponibili (lo stato dell’informazione) ma non dalle preferenze individuali. In base alla concezione soggettiva, invece, la probabilità è interpretata come il grado di credenza che un individuo assegna a un determinato evento, sulla base delle sue informazioni, opinioni e intuizioni. Questa visione ha il pregio di porre in risalto la situazione in cui versa il giudice, il quale è istituzionalmente costretto ad assumere una decisione in condizioni di incertezza epistemica. Essa viene però comunemente osteggiata per il timore di derive intuizionistiche del giudizio, ancorché sostenere una concezione soggettiva della probabilità non significhi necessariamente affermare che il grado di credenza in merito a un determinato evento possa essere stabilito arbitrariamente dal decisore (il quale dovrebbe, invece, ritenersi vincolato a parametri di coerenza e ragionevolezza).

A fronte di questo dibattito, che investe le fondamenta stesse della gnoseologia giudiziaria, la giurisprudenza ha percepito la necessità di aggiornare i propri modelli di ragionamento, riconoscendo la fallibilità della conoscenza umana (anche nella sede giudiziaria) e la natura induttiva o abduttiva dei procedimenti intellettivi che conducono alla ricostruzione dei fatti controversi, pur dovendo mantenere uno standard rigoroso e rispettoso della regola *in dubio pro reo*, ricavabile dalla presunzione d’innocenza (art. 27 comma 2 Cost., art. 6 comma 2 Conv. eur. dir. uomo).

Nelle ultime due decadi, in particolare, si è affermato un orientamento giurisprudenziale che – traendo spunto dalle problematiche relative all’accertamento del nesso causale nelle ipotesi di responsabilità omissiva colposa – sostiene la necessità di giungere a una ricostruzione dei fatti dotata di alta credibilità razionale per emettere una sentenza di condanna. Ove tale soglia probatoria non sia stata raggiunta, si impone invece una pronuncia di assoluzione.

Tale indirizzo ermeneutico, suggellato dal legislatore con la novella dell’art. 533 c.p.p., ha posto l’attenzione non tanto sulla definizione teorica della verità processuale – pur riconoscen-

done il carattere inevitabilmente probabilistico – quanto sui metodi operativi e sugli schemi di ragionamento che debbono sorreggere la ricostruzione dei fatti nella sede giudiziaria. Così, ad esempio, si è affermato che il nesso causale tra condotta ed evento può ritenersi sussistente anche in presenza di una legge di copertura fondata su frequenze statistiche medio-basse, purché gli ulteriori elementi probatori a disposizione siano tali da escludere la verifica di decorsi causali alternativi¹⁴.

L'attenzione per il metodo e i modelli di ragionamento, unita a un approccio basato sul dubbio critico, caratterizza dunque gli approcci contemporanei alla gnoseologia giudiziaria. Tale impostazione rivela tuttavia la sua fragilità in relazione al dominio della prova scientifica, in cui si realizza una significativa asimmetria cognitiva tra gli esperti e l'organo giurisdizionale, il quale si trova nella difficoltà di vagliare criticamente i dati e le valutazioni che gli vengono proposti.

In questo complesso panorama si inserisce la metrologia forense, vale a dire la scienza che si occupa di stabilire principi, metodi e tecniche delle misurazioni effettuate nel contesto o per finalità giudiziarie. L'insegnamento fondamentale della metrologia è che non esiste una misura perfetta o assolutamente esatta: ogni misura è significativa solo se risulta accompagnata da una stima relativa alla sua incertezza, così che il valore del misurando si collochi con una certa probabilità entro un determinato intervallo di misura.

La metrologia risulta dunque fondamentale per stabilire una cultura dei limiti di validità della prova scientifica, al fine di scongiurare usi distorti o applicazioni non corrette delle metodologie e delle tecniche di elevata specializzazione. Il ricorso alla metrologia appare essenziale sia per la sua versatilità e l'ampiezza del suo campo di applicazione – che si estende ad ogni esperimento probatorio in cui risulta necessaria una misurazione per la risoluzione della *quaestio facti* – sia per stabilire l'attendibilità e la persuasività delle informazioni necessarie per giungere a un corretto giudizio.

Prima ancora, la cultura metrologica favorisce l'individuazione delle sorgenti di incertezza che si annidano nelle modalità di acquisizione della prova e di valutazione dei relativi risultati, contribuendo all'avanzamento degli studi di epistemologia giudiziaria. In particolare, la metrologia forense contribuisce a definire gli strumenti concettuali e operativi utili per misurare ed esprimere in termini quantitativi l'incertezza (*rectius*: il grado o il livello di incertezza) associato inevitabilmente a ogni dato probatorio.

Considerate tali premesse, il presente Libro bianco si propone di introdurre i concetti fondamentali della metrologia, ai fini di una sua applicazione nel contesto forense. Particolare

¹⁴È questo l'insegnamento fondamentale della celebre pronuncia "Franzese" (Cass., sez. un., sent. 10 luglio 2002 n. 30328, in *CED Cass.*, m. 222138 - 01).

attenzione viene quindi prestata ai possibili apporti della metrologia nelle singole fasi del procedimento probatorio, esemplificando tali applicazioni con alcuni casi studio paradigmatici.

FONDAMENTI DI METROLOGIA

2.1 PREMESSA¹⁵

Giustizia e scienza si prefiggono, sia pure seguendo percorsi distinti, un fine comune: l'accertamento della verità. Tuttavia, mentre la scienza può conservare la propria completa autonomia rispetto alla giustizia, in quanto destinata ad accertare fenomeni naturali utilizzando propri schemi, regole e metodi senza ingerenza di altre discipline, nell'ambito giudiziario si è avvertito sempre più consistente il bisogno di un supporto esterno utile (o necessario) ad acclarare i fatti. Non è quindi per caso che, a partire dagli inizi del XX secolo, sia nata, grazie al lavoro di Edmond Locard, la scienza forense [Ferrero & Scotti, 2023].

Da allora la giustizia si è viepiù rivolta alla scienza, allo scopo di acquisire dati e informazioni circa i fenomeni oggetto di indagine che potessero essere qualificabili come “prove” (definite poi prove scientifiche in virtù della loro ontologia) per risolvere casi sia in ambito penale che civile. Le motivazioni alla base della crescente fiducia nella capacità delle conoscenze scientifiche di fornire indicazioni irrefutabili sullo svolgimento dei fatti risiedono nella riconosciuta maggiore attendibilità dei risultati (dati) forniti dall'applicazione di valide teorie scientifiche rispetto a quelli ottenuti con altri mezzi, testimonianze incluse.

Inizialmente, la fiducia nelle prove scientifiche era tale che, nel 1979, una risoluzione dell'International Association for Identification (IAI) giudicava come negligente condotta professionale non riportare le proprie conclusioni con assoluta certezza [Imwinkelried, 2012]. Solo in tempi più recenti – e la famosa sentenza Daubert del 1993 ne rappresenta la prima e più nota presa d'atto – si è fatta strada, anche in ambito giuridico, la consapevolezza che la scienza è caratterizzata da limiti intrinseci e non può fornire risultati assolutamente certi.

Il nuovo scenario ha dato avvio a un ampio dibattito sulle modalità e criteri per la valutazione dell'ammissibilità e dell'attendibilità delle prove scientifiche, che si è tuttavia risolto in un esercizio dialettico sterile poiché non ha portato a definire metriche in grado di quan-

¹⁵Il Par. 2.1 è a cura di Veronica Scotti.

tificare obiettivamente il grado di attendibilità di tali prove e, conseguentemente, in grado di definire quantitativamente il dubbio sulla correttezza dei dati forniti da tali “prove”.

Considerando che le prove scientifiche sono, nella quasi totalità dei casi, il risultato di un processo di misura, è in questo scenario che la metrologia può fornire un contributo determinante se impiegata in ambito giudiziario. Infatti, la metrologia – la scienza delle misure – riconosce che il risultato di una misurazione non potrà mai restituire il valore “vero” della grandezza che si intende misurare (il misurando), ma solo una più o meno buona approssimazione dello stesso. Pertanto, si occupa di quantificare in modo obiettivo e con metodi normati e universalmente riconosciuti la bontà di un risultato di misura, cioè il grado di approssimazione con cui quantifica il misurando e, conseguentemente, la probabilità che il risultato ottenuto non rappresenti il valore di ciò che si intende misurare. Questa probabilità, come si vedrà nel seguito, fornisce una valutazione quantitativa del dubbio che una decisione assunta sulla base di tale risultato non sia corretta, consentendo quindi al giudice di disporre di un quadro conoscitivo più esteso rispetto a quello che si prospetta in assenza del supporto di conoscenze metrologiche.

Nel presente capitolo si intende fornire, in modo sintetico ma completo, un quadro generale sui fondamenti della metrologia, così da porre le basi per la successiva analisi (nel Cap. 3) dei possibili contributi della metrologia forense alla formazione della prova penale.

2.2 IL MODELLO DI MISURA E L'IDENTIFICAZIONE DELLE SORGENTI DI INCERTEZZA¹⁶

2.2.1 CONCETTI GENERALI E LESSICO

Prima di addentrarci nell'analisi dei concetti tipici della metrologia, e preliminarmente a ogni altra considerazione, è bene ricordare che la metrologia, come ogni altra scienza, ha un proprio lessico, elaborato dalla comunità internazionale con particolare attenzione a evitare ambiguità e volto a costituire un riferimento comune e condiviso per tutti coloro che sono coinvolti, a vario titolo, nella pianificazione o esecuzione di misurazioni e per gli organismi governativi e intergovernativi, le associazioni commerciali, gli organismi di accreditamento, i legislatori e le associazioni professionali.

Questo lessico è contenuto nel *Vocabolario Internazionale di Metrologia* (VIM) [JCGM 200, 2012], pubblicato dal BIPM – il Bureau International des Poids et Mesures – e recepito nella normativa internazionale come la ISO-IEC Guide 99 [ISO/IEC 99, 2007], tradotta in Italia da UNI e CEI come Norma 70099:2008 [UNI CEI 70099, 2008]. Sarà per-

¹⁶I Par. da 2.2 a 2.4 sono a cura di Alessandro Ferrero e Dario Petri.

tanto a questo documento a cui faremo ampiamente riferimento, semplicemente come VIM, nel prosieguo di questo testo.

Il BIPM ha pubblicato un altro importantissimo documento: la *Guida all'espressione dell'Incertezza di Misura* (GUM) [JCGM 100, 2008], che illustra nel dettaglio il concetto di incertezza di misura e le modalità per la sua valutazione. Analogamente al VIM, anche questo documento è stato recepito dalla normativa internazionale come ISO-IEC Guide 98-3 [ISO/IEC Guide 98-3, 2008] e tradotto in Italia da UNI e CEI come norma 70098-3:2016 [UNI CEI 70098-3, 2016]. A questo documento si farà riferimento, come GUM, nel prosieguo del testo.

Appare a questo punto opportuno, preliminarmente a ogni altra considerazione, chiarire cosa si intende per metrologia. Ci soccorre il VIM, che la definisce come la «scienza della misurazione e delle sue applicazioni»¹⁷, chiarendo in una nota alla stessa definizione che: «la metrologia comprende tutti gli aspetti teorici e pratici della misurazione, qualunque sia l'incertezza di misura e il campo d'applicazione».

Questa definizione, in apparenza estremamente sintetica, contiene due concetti di estrema importanza per le applicazioni in ambito forense. Il primo è che la metrologia si interessa di tutti i campi di applicazione delle misure e, pertanto, anche di tutte le misurazioni eseguite in campo forense. Il secondo, legato al termine incertezza di misura, indica con chiarezza che la scienza della misurazione non permette mai di valutare la grandezza che si intende misurare – il misurando – con assoluta certezza. Come si vedrà nel seguito, è quindi compito della metrologia quantificare il grado di incertezza – e quindi di dubbio – con cui si può conoscere un misurando, perché in tal modo è anche possibile arrivare a quantificare il dubbio che una decisione¹⁸ presa in base al risultato di una misurazione possa rivelarsi incorretta.

Dal momento che la definizione di metrologia fa riferimento alle misurazioni, è bene iniziare chiarendo cosa si intende per misurazione. Senza perdere di generalità, ci si focalizzerà subito sul campo di interesse di questo documento e quindi sulle misurazioni volte all'analisi delle tracce, cioè dei segni lasciati dall'agire umano sulla scena¹⁹ in cui si è verificato il fatto oggetto di accertamento (sia esso un crimine o un qualunque altro fatto da ricostruire).

¹⁷VIM art. 2.2.

¹⁸È bene precisare che la decisione può derivare direttamente dal confronto della grandezza misurata con un limite di legge, come nel caso della guida in stato di ebrezza stabilita con la prova dell'etilometro, o può basarsi su valutazioni che includono un risultato di misura, ma non si limitano al solo risultato. Si vedrà che, anche in questo caso, una adeguata cultura metrologica permette di combinare utilmente i diversi elementi di dubbio per arrivare a una valutazione onnicomprensiva.

¹⁹Giova ricordare che può trattarsi di scena “virtuale”, quando il contesto è digitale e si opera su dati, come nei processi di *digital forensics*.

Queste tracce sono solitamente costituite da corpi, sostanze o fenomeni che, come tali, si manifestano nel mondo empirico e possono quindi essere osservati. Ciò che interessa, tuttavia, non è limitarsi alla semplice osservazione, ma arrivare a “rappresentare” queste tracce in modo quantitativo (che, come si vedrà, è il risultato di una misurazione), in modo da poterle poi confrontare con campioni (ad esempio campioni di sostanze prelevate dal corpo dell'imputato o della vittima) o con limiti imposti da leggi o regolamenti. È quindi necessario individuare opportune grandezze, che il VIM definisce come: «proprietà di un fenomeno, corpo o sostanza che può essere espressa quantitativamente mediante un numero e un riferimento»²⁰. Sempre il VIM, in una nota allo stesso articolo, specifica che «il riferimento citato nella presente definizione può essere una unità di misura, una procedura di misura, o un materiale di riferimento, o una loro combinazione». Numero e riferimento impiegati per esprimere quantitativamente nel loro complesso una grandezza sono chiamati, dal VIM, «valore di una grandezza»²¹.

È immediato riconoscere che il valore di una grandezza fornisce informazione su un “oggetto”²² osservabile nel modo empirico. Si può pertanto vedere la misurazione come un processo di progettazione, costruzione e utilizzo di un ponte tra il mondo empirico e il mondo dei concetti astratti tipici dell'informazione, il cui scopo non è solamente quello di attribuire un'informazione in termini quantitativi a una semplice osservazione, ma anche – e in campo forense soprattutto – indicare il grado di affidabilità (o margine di errore²³) di tale informazione.

Trascurando per ora di riportare esplicitamente l'incertezza, il ponte tra mondo empirico e mondo dell'informazione può essere espresso, in modo formale, con la relazione:

$$\text{proprietà di un oggetto} = \text{valore di una proprietà} \quad (1)$$

Ad esempio, possiamo scrivere:

$$\text{lunghezza di una barra di acciaio} = 1,23 \text{ m} \quad (2)$$

nella quale la lunghezza di una data barra di acciaio è un'entità concreta, detta misurando²⁴, di un oggetto empirico, mentre 1,23 m è un'entità informativa astratta detta valore misurato.

²⁰VIM art 1.1.

²¹VIM art. 1.19.

²²Il termine “oggetto” è qui usato nel senso generico di qualsiasi cosa che abbia proprietà, includendo quindi corpi fisici, sistemi, fenomeni, processi.

²³Si vedrà nel seguito che il termine metrologicamente corretto per esprimere il margine di errore è incertezza.

²⁴Il VIM, all'art. 2.3, definisce il misurando come grandezza che si intende misurare.

La (1) può quindi essere scritta come:

$$\text{misurando} = \text{valore misurato} \quad (3)$$

Le relazioni (1) o (3) esprimono quindi il fatto che le due espressioni a sinistra e a destra del segno = rappresentano la medesima proprietà, identificata:

- in modo concreto, a sinistra, come la proprietà (accessibile) di un oggetto empirico;
- in modo astratto, a destra, come un elemento informativo simbolico, costituito da un numero e un riferimento.

È doveroso osservare fin da ora che quanto formalmente espresso dalle (1)-(3) idealmente ammette la possibilità di definire e costruire un ponte che associa al misurando un'informazione univoca costituita da un unico valore di grandezza. Si intuisce, tuttavia, che, a causa di una serie di imperfezioni insite nell'intero processo di misura, a iniziare dall'incapacità di definire perfettamente la proprietà che si intende misurare, molto raramente il valore misurato fornisce un'informazione completamente certa sul misurando.

Quanto sopra affermato trova riscontro nelle definizioni del VIM di misurazione [«processo volto a ottenere sperimentalmente uno o più valori che possono essere ragionevolmente attribuiti a una grandezza»]²⁵ e di risultato di misura: [«insieme di valori attribuiti a un misurando congiuntamente a ogni altra informazione pertinente disponibile»]²⁶. Entrambe richiamano la necessità di esprimere un risultato di misura con un insieme di valori, all'interno dei quali si può supporre cada il valore del misurando. Come si vedrà (cfr. al Par. 2.3), l'informazione pertinente richiamata dalla definizione di risultato di misura consentirà di valutare la probabilità che il valore del misurando cada nell'insieme di valori ottenuto.

Le osservazioni che precedono sono importanti, perché, in generale, le relazioni (1) o (3) non sono necessariamente il risultato di una misurazione; esse potrebbero essere anche il risultato di un'opinione, di un'ipotesi o di una valutazione soggettiva basata sull'esperienza. Ecco perché è essenziale distinguere, sul piano del valore, l'affermazione “secondo me il valore della proprietà x è y ” dall'affermazione “il valore misurato della proprietà x è y ”. Nel primo caso, in cui si ha a che fare con opinioni e stime basate sull'esperienza, tutto diventa opinabile e soggettivo; nel secondo caso, in cui è disponibile il risultato di una misurazione, ci si aspetta invece che l'informazione fornita sia oggettiva e affidabile. Anzi, ci si aspetta che il risultato di una misurazione non sia solo affidabile, ma che fornisca anche il suo livello di affidabilità.

²⁵VIM art. 2.1.

²⁶VIM art. 2.9.

Come si vedrà, tale livello è espresso mediante l'incertezza di misura, che rappresenta uno dei pilastri portanti della metrologia.

Le considerazioni sopra esposte fanno riferimento al concetto di misurazione e sono largamente indipendenti dalle modalità con cui la misurazione stessa viene eseguita. Pertanto, è lecito aspettarsi che l'informazione fornita abbia le caratteristiche di oggettività che vengono solitamente attribuite ai risultati delle prove tecnico-scientifiche. In realtà, ciò non è sufficiente per eliminare tutti i dubbi di soggettività del risultato fornito. Infatti, anche se l'informazione fornita non è influenzata dalle opinioni di chi le fornisce, non si può escludere che l'operatore, con le modalità con cui conduce la misurazione e la scelta delle apparecchiature impiegate, non possa influenzare il risultato di misura. È quindi necessario che l'informazione fornita, oltre che oggettiva, sia anche intersoggettiva, ossia compatibile (con il grado di affidabilità precisato) con l'informazione ottenibile da operatori diversi, con mezzi diversi e in luoghi diversi, oltre che interpretata nello stesso modo da soggetti diversi, in tempi e contesti diversi.

Normalmente la misurazione di una proprietà viene realizzata impiegando uno o più strumenti secondo una procedura specificata, spesso basata su un noto principio fisico. Per completezza di informazione, uno strumento di misura è definito dal VIM come «dispositivo impiegato per eseguire misurazioni, solo o in associazione con altri dispositivi di supporto»²⁷. Spesso, un unico strumento di misura non è sufficiente per eseguire la misurazione. In tal caso, si utilizza un sistema di misura, definito dal VIM come: «insieme di uno o più strumenti di misura e in molti casi altri dispositivi, ivi compresi eventuali reagenti e alimentazioni, appositamente connessi e adattati per fornire informazione usata allo scopo di stabilire, in intervalli specificati, valori misurati di grandezze di specie specificate»²⁸. Ovviamente, uno strumento di misura utilizzato singolarmente è un sistema di misura.

Ad esempio, la temperatura di un oggetto può essere misurata ponendo un termometro a mercurio in contatto termico con l'oggetto stesso così che il calore possa essere trasmesso da questo al termometro fino a raggiungere l'equilibrio termico. Il punto in cui si arresta la colonna di mercurio, che si espande per una nota legge fisica, fornisce una indicazione proporzionale alla temperatura. Tuttavia, per ottenere un risultato di misura da questa indicazione, è necessario associare un ben preciso valore di temperatura, ad esempio 37°C, al punto in cui si arresta la colonna di mercurio. Solo in questo modo, l'informazione fornita è intersoggettiva e può essere interpretata:

²⁷VIM art. 3.1.

²⁸VIM art. 3.2.

- indipendentemente dallo strumento e può essere confrontata direttamente con quella fornita da altri strumenti;
- nello stesso modo da soggetti diversi, in tempi e contesti diversi.

Altre caratteristiche associate all'oggettività e all'intersoggettività del risultato di misura sono ²⁹:

- la ripetibilità: definita dal VIM (artt. 2.15 e 2.21) come «grado di concordanza tra indicazioni o valori misurati ottenuti da un certo numero di misurazioni ripetute dello stesso oggetto o di oggetti simili, eseguite [...] con la medesima procedura di misura, gli stessi operatori, lo stesso sistema di misura, le medesime condizioni operative e lo stesso luogo, [...] in un intervallo di tempo breve» [=medesimi risultati con stessi operatori, stessi strumenti e stesso tempo e contesto].
- la riproducibilità: definita dal VIM (artt. 2.15 e 2.25) come «grado di concordanza tra indicazioni o valori misurati ottenuti da un certo numero di misurazioni ripetute dello stesso oggetto o di oggetti simili, eseguite ... in differenti luoghi, operatori e sistemi di misura» [=stessi risultati anche con operatori diversi, mezzi diversi e in luoghi diversi].

Si vedrà nel successivo Par. 2.4.1 che l'operazione che permette di ottenere un risultato di misura dall'indicazione dello strumento si chiama taratura e si basa sul confronto tra l'indicazione stessa e un opportuno riferimento; la taratura costituisce il secondo fondamentale pilastro su cui poggia la metrologia stessa.

Per garantire che un risultato di misura sia interpretato sempre allo stesso modo da soggetti diversi e in tempi diversi, il riferimento impiegato nella taratura (spesso costituito da un'unità di misura) è universalmente riconosciuto. Per tale motivo, la definizione delle unità di misura, le modalità per realizzare e gestire gli oggetti fisici che le realizzano, detti campioni di misura, e le modalità per garantire che i risultati di misura forniti da laboratori accreditati siano riferibili a tali campioni sono responsabilità di laboratori metrologici primari³⁰ riconosciuti ufficialmente a livello nazionale e internazionale.

L'organizzazione mondiale della metrologia, costituita con la firma della Convenzione del Metro il 20 maggio 1875, governata dalla *Conférence Générale des Poids et Mesures* (CGPM) e amministrata dal *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM), riconosce validità ai

²⁹Per maggiori dettagli sui concetti di precisione, ripetibilità e riproducibilità si rimanda a [Ferrero & Scotti, 2023].

³⁰Questi laboratori sono generalmente noti come *NMI: National Metrology Institutes*.

campioni realizzati e mantenuti dagli NMI degli Stati che hanno aderito alla Convenzione del Metro.

È immediato intuire che i campioni conservati negli NMI non sono né numericamente sufficienti, né economicamente accessibili per la taratura dei miliardi di strumenti impiegati quotidianamente nelle attività di misura. La condizione di intersoggettività può quindi essere garantita solo da quella che in metrologia si chiama riferibilità metrologica e che il VIM definisce come «proprietà di un risultato di misura per cui esso è posto in relazione a un riferimento attraverso una documentata catena ininterrotta di tarature, ciascuna delle quali contribuisce all'incertezza di misura»³¹.

Questa catena ininterrotta di tarature può essere realizzata istituendo un'opportuna gerarchia di tarature, definita dal VIM come «successione di tarature da un riferimento al sistema di misura finale, in cui l'esito di ciascuna taratura dipende dall'esito della taratura precedente»³², in cui in cima alla gerarchia si trova il campione nazionale conservato nell'NMI.

Si tornerà più avanti, nel successivo Par. 2.4.2, sul concetto di riferibilità metrologica. Qui ci si limita a far notare che la garanzia che la catena di tarature sia ininterrotta e documentata viene data da un sistema di accreditamento universalmente riconosciuto, basato su norme tecniche specifiche, in cui organismi di accreditamento indipendenti garantiscono le competenze dei laboratori accreditati e la loro capacità di garantire la riferibilità dei risultati di misura prodotti.

Si tornerà su questi concetti, di estrema importanza anche in ambito forense, perché la riferibilità metrologica è, con incertezza e taratura, uno dei tre pilastri fondamentali su cui poggia la moderna metrologia.

2.2.2 IL MODELLO DI MISURA

Si è visto, al paragrafo precedente, che un processo di misura si configura come un ponte tra il mondo empirico, in cui si collocano le proprietà che si intende misurare (i misurandi), e il mondo dell'informazione, a cui appartengono i simboli utilizzati per rappresentare quantitativamente sia il misurando, sia l'affidabilità dell'informazione fornita.

È intuitivo ritenere che i processi, logici e sperimentali, che portano alla progettazione, costruzione e impiego di questo ponte siano complessi, certamente ben più complessi del semplice impiego e lettura di uno strumento.

In ambito tecnico, in presenza di processi complessi, è molto utile costruire un modello che consenta di comprendere, anche visivamente attraverso una sua rappresentazione grafica,

³¹VIM art. 2.41.

³²VIM art. 2.40.

il ruolo dei diversi sotto-processi e, soprattutto, i loro limiti di validità, che si ripercuotono direttamente sui limiti di validità del risultato ottenuto.

Per la costruzione di questo modello è bene considerare che, indipendentemente dal campo di applicazione, l'attività di misura non è mai fine a se stessa, bensì è finalizzata a fornire risultati che costituiscono elementi di ingresso a processi decisionali volti a identificare le azioni più adatte a raggiungere obiettivi prefissati soddisfacendo, al contempo, condizioni imposte.

È immediato comprendere che, nelle applicazioni forensi, a seconda che si considerino casi di giustizia penale o civile, il processo decisionale è quello volto a identificare chi ha perpetrato un reato o il soggetto responsabile di un illecito civile e a stabilire un'equa punizione o un equo risarcimento, mentre l'obiettivo è quello di amministrare giustizia secondo legge (le condizioni imposte) [Ferrero & Scotti, 2023].

In questa prospettiva, i passi logici in cui si può scomporre il processo di misura sono schematicamente illustrati in Fig. 1 e nel seguito descritti.

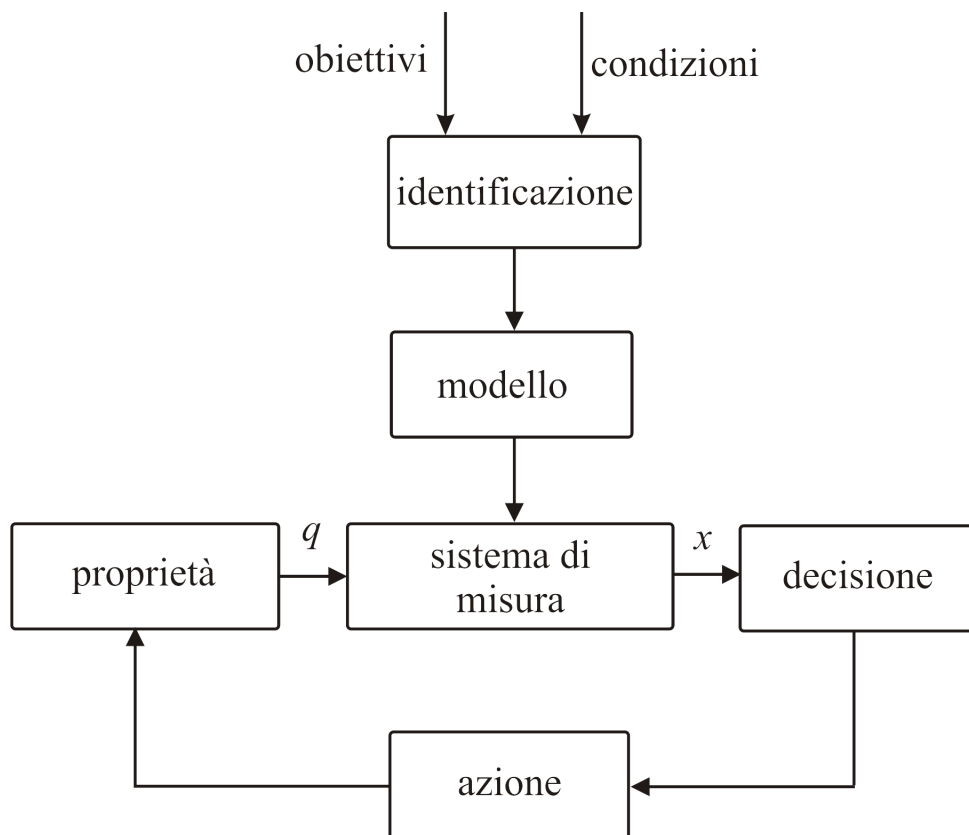


Figura 1: Modello dell'attività di misura che individua i passi logici in cui scomporre l'attività di misura

1. Identificazione

Identificazione degli obiettivi, delle condizioni imposte, del misurando, del sistema di misura più adatto, delle condizioni ambientali che possono influire sul risultato di misura.

Per meglio comprendere questa fase, si consideri il caso della guida in stato di ebbrezza. L'obiettivo è quello di stabilire se un conducente è in grado di condurre un veicolo in modo sicuro per sé e per gli altri. In questa situazione la proprietà che restituisce l'informazione più significativa sul potenziale stato di ebbrezza è la concentrazione di alcol nel sangue (BAC³³).

La misurazione di questa proprietà è chiaramente invasiva (occorre un prelievo di sangue venoso) e poco adatta ad essere eseguita sul posto. Infatti, si preferisce misurare in modo diretto la concentrazione di alcol nel respiro (BrAC³⁴), da cui si ricava, attraverso la legge fisica di Henry, la BAC [Ferrero & Scotti, 2023].

Infine, variazioni rispetto ai valori di riferimento delle proprietà che caratterizzano il contesto di misura (quali ad esempio temperatura, umidità, pressione barometrica, gravità locale, sostanze disperse nell'ambiente, vibrazioni) possono riflettersi sui valori misurati. Le grandezze che, variando, influenzano in modo significativo i valori misurati, sono dette grandezze di influenza e vanno identificate e tenute sotto controllo durante il processo di misura.

Per esempio, nel caso degli etilometri impiegati per il rilievo della BrAC, le grandezze di influenza più significative sono la temperatura e la concentrazione di idrocarburi nell'aria.

2. Modello matematico

In una misurazione, le interazioni tra misurando, sistema di misura e ambiente sono descritte da un modello matematico.

In questo modello, tutte le proprietà identificate nel precedente passo vengono rappresentate con variabili matematiche e le loro interazioni con relazioni matematiche. A seconda delle informazioni disponibili sul contesto di misura, le teorie normalmente impiegate per descrivere le proprietà e le loro interazioni possono considerare variabili e relazioni di tipo deterministico o probabilistico, senza escludere la possibilità di impiegare strumenti più evoluti quali i modelli *fuzzy*, neurali e *neurofuzzy* che sono alla base dell'intelligenza artificiale.

³³Acronimo che deriva dall'inglese *Blood Alcohol Concentration*.

³⁴Acronimo che deriva dall'inglese *Breath Alcohol Concentration*.

Indipendentemente dalla rappresentazione matematica adottata, questo passo è probabilmente il più critico dell'intero processo di misura dal momento che la descrizione simbolica che restituisce diventa il punto di partenza per tutti i passi successivi.

È importante considerare che ogni modello può fornire solo informazione incompleta sul contesto di misura, essenzialmente, ma non solo, a causa del carattere intrinsecamente incompleto della conoscenza del misurando, nonché dall'inevitabile omessa considerazione di qualche grandezza di influenza e/o di qualche interazione, e delle inevitabili approssimazioni insite nella rappresentazione matematica di proprietà e interazioni.

La conseguenza è che, indipendentemente dai sistemi di misura e dalle procedure impiegate, il modello rappresenta una sorta di limite superiore alla qualità del risultato di misura ottenibile. Per comprendere questo concetto, si può ancora fare riferimento alla misura di concentrazione di alcol nel sangue attraverso la misura della concentrazione di alcol nel respiro. Il modello fisico a cui si fa riferimento consente di stabilire una relazione di proporzionalità tra BAC e BrAC, dove però il coefficiente di proporzionalità impiegato³⁵ è solo il valore medio valutato su una popolazione statisticamente significativa di individui; la variabilità da individuo a individuo di tale coefficiente influenza pertanto il valore di BAC ottenuto in modo decisamente più significativo dell'accuratezza dello strumento [Ferrero & Scotti, 2023].

3. Sistema di misura

Per utilizzare correttamente il sistema di misura scelto, il cui compito, come si è visto al precedente Par. 2.2.1, è quello di assegnare un valore x al misurando q , occorre definire adeguatamente le procedure da eseguire.

A differenza dei processi discussi nei punti precedenti, largamente indipendenti dal misurando, queste procedure sono specifiche per i singoli misurandi considerati.

Un'attenta e dettagliata descrizione delle procedure di misura è estremamente importante. Le modalità d'uso, le condizioni e lo stato degli strumenti impiegati (quali ad esempio impieghi precedenti, età e tempo trascorso dall'ultima taratura), possono infatti influenzare fortemente la qualità del risultato di misura. Una chiara descrizione delle procedure è, quindi, necessaria per istruire l'operatore sulle modalità con cui eseguire le operazioni richieste.

³⁵Tale fattore è fissato in 2300 dal DM 196/1990.

Per esempio, quando si impiegano strumenti (radar o lidar) a bordo strada per misurare la velocità dei veicoli per il controllo del traffico – i cosiddetti *autovelox* – le procedure di misura coinvolgono diversi fattori: lo strumento deve essere collocato a una data distanza dal bordo della carreggiata, con un prefissato angolo rispetto all'asse della carreggiata e un prefissato angolo rispetto alla sua superficie; inoltre, la temperatura a cui opera deve essere all'interno delle condizioni operative indicate dal costruttore. Il mancato rispetto di una di queste condizioni può influenzare l'accuratezza della velocità rilevata in modo significativo e, qualora venga elevata una contravvenzione per eccesso di velocità, può costituire elemento di contestazione.

4. Decisione

Sulla base del risultato di misura, le autorità preposte sono chiamate a prendere una decisione la quale, in ambito forense, si riduce molto spesso a stabilire se il valore misurato supera o meno un prefissato valore limite³⁶, oppure se è “compatibile” (*match/no match*) con il valore manifestato da un altro oggetto con cui l'oggetto sotto misura è confrontato. Questo processo decisionale non presenta, apparentemente, particolari difficoltà: confrontare due valori numerici – il valore misurato e il limite oppure il campione noto – sembra un'operazione banale.

Il punto critico, spesso trascurato, è rappresentato dal fatto che, come visto al precedente Par. 2.2.1, solo molto raramente un risultato di misura può essere espresso con un singolo valore; al contrario, esso è formato da un insieme di valori. Si vedrà nel successivo Par. 2.3, che questo insieme di valori è esprimibile come un intervallo, all'interno del quale si presume cada il valore del misurando con una probabilità specificata, detta probabilità di copertura.

Il confronto di un valore numerico (il limite) con un siffatto intervallo comporta, se il limite cade in prossimità dell'intervallo, una probabilità, e quindi un dubbio, sulla correttezza della decisione. La corretta applicazione dei principi della metrologia consente, come si vedrà, di quantificare questo dubbio, ad esempio come probabilità che un risultato, considerato superiore a un limite prefissato, sia in realtà inferiore, o viceversa.

Il rischio di decisione errata può quindi essere quantificato e presentato al giudice che può valutare, sulla base del suo prudente apprezzamento, se decidere o meno di tra-

³⁶Si pensi ai casi frequentissimi di superamento dei limiti di velocità da parte di un veicolo, in cui il valore misurato viene confrontato con il limite di velocità imposto nel tratto di strada considerato, o ai casi di guida in stato di ebbrezza, in cui il valore di tasso alcolemico misurato dall'etilometro viene confrontato con i limiti di legge definiti dal Codice della strada.

scurarlo, giungendo quindi a pronunciare la sentenza al di là di ogni ragionevole dubbio [Ferrero & Scotti, 2023].

2.2.3 LE SORGENTI DI INCERTEZZA

Quanto discusso al paragrafo precedente ha messo in luce che, in ragione delle inevitabili imperfezioni implicite in ciascuno dei processi implementati, il risultato ottenuto con una misurazione non potrà mai, se non in casi particolarissimi, fornire il valore vero (peraltro ignoto e inconoscibile [Ferrero & Scotti, 2023, Ferrero et al., 2015]) del misurando. In altri termini, un risultato di misura può fornire solamente una conoscenza incompleta del misurando.

Quando sono coinvolte attività forensi, ciò pone un problema di fondo: se la giustizia ripone fiducia sulla completa e oggettiva affidabilità della scienza e dei metodi scientifici, cui si rivolge nei casi in cui siano necessarie competenze specifiche, com'è possibile garantire tali aspettative quando, dati i limiti della scienza, è possibile avere solo una conoscenza approssimata dei fenomeni indagati?

La risposta a tale quesito viene proprio nella metrologia, tra i cui compiti vi è anche quello dell'identificazione e quantificazione delle potenziali sorgenti di incertezza. Come si è già accennato nel precedente Par. 2.2.1, l'incertezza di misura costituisce parte integrante del risultato di misura e quantifica il livello di affidabilità dell'informazione fornita. Più nello specifico, il VIM definisce l'incertezza di misura come un «parametro non negativo che caratterizza la dispersione dei valori che sono attribuiti a un misurando, sulla base delle informazioni utilizzate»³⁷.

Resta ora da comprendere cosa sia questo parametro non negativo e come esso possa essere ottenuto a partire dalle informazioni utilizzate. Per farlo, è utile fare riferimento alla già citata GUM [UNI CEI 70098-3, 2016]. Al punto 0.2 dell'introduzione, la GUM afferma:

«Ora si accetta generalmente che, allorquando tutte le componenti di errore note o ipotizzate siano state valutate e le relative correzioni apportate, rimanga tuttavia un'incertezza sulla correttezza del risultato, vale a dire un dubbio su quanto bene questo rappresenti il valore della grandezza misurata».

Si ritornerà in seguito su questa affermazione, perché densa di concetti rilevanti per comprendere come definire e valutare l'incertezza di misura. Per ora ci si limita a sottolineare che incertezza è intesa come sinonimo di dubbio, concetto di particolare rilevanza in ambito giuridico.

³⁷VIM art. 2.26.

Per arrivare a comprendere come questo dubbio possa essere quantificato attraverso la corretta valutazione dell'incertezza, è utile fare ancora riferimento al modello discusso nel precedente paragrafo in quanto aiuta a identificarne le possibili sorgenti.

Si è visto che i processi volti all'identificazione e alla descrizione matematica del misurando, delle proprietà ambientali significative, del sistema di misura e delle loro mutue interazioni, ne possono restituire solo una descrizione approssimata. Questo porta a un contributo di incertezza che viene chiamato incertezza di definizione proprio perché ha origine nell'imperfetta definizione del contesto di misura. Il VIM la definisce come «componente dell'incertezza di misura che deriva dalla quantità finita di dettagli nella definizione di un misurando»³⁸.

Si è già visto al precedente paragrafo che l'adozione di uno specifico modello limita superiormente la qualità del risultato. Questo concetto viene esplicitato dal VIM che in una nota precisa: «l'incertezza di definizione costituisce nella pratica il limite inferiore dell'incertezza di misura per qualsiasi misurazione di un dato misurando».

È interessante confrontare questa definizione con quella di validità fondazionale di un metodo scientifico applicato in ambito forense data dal *President's Council of Advisors on Science and Technology* statunitense nel report del 2016, noto come il PCAST report [PCAST, 2016]:

«La validità fondazionale³⁹ per un metodo di scienze forensi richiede che si dimostri, sulla base di studi empirici, che il metodo sia ripetibile, riproducibile e accurato a livelli che siano stati misurati e siano appropriati per l'uso che se ne intende fare. Validità fondazionale, quindi, significa che un metodo può, in linea di principio, essere affidabile. È il concetto scientifico che si ritiene corrisponda al requisito giuridico della Federal Rule 702(c) di “metodi e principi affidabili”».

È possibile affermare che l'incertezza di definizione, per come è stata definita, può essere impiegata per quantificare quanto affidabile sia, in linea di principio, un metodo di misura. Infatti, l'affidabilità di un metodo, intesa come la sua capacità di fornire risultati ripetibili, riproducibili e accurati dipende ovviamente dalla quantità di dettagli che contribuiscono a definire la grandezza oggetto di misura [Ferrero & Scotti, 2023]. Pertanto, la validità fondazionale di un metodo forense richiede di partire dal contributo fornito dall'incertezza di definizione.

Uno dei processi considerati nel modello di una misurazione illustrato in precedenza ha riguardato le attività svolte con il sistema di misura impiegato. Come si è visto al Par. 2.2.1, il VIM definisce il sistema di misura come «insieme di uno o più strumenti di misura e in molti

³⁸VIM art. 2.27.

³⁹*Foundational validity* nel testo originale.

casi altri dispositivi, ivi compresi eventuali reagenti e alimentazioni, appositamente connessi e adattati per fornire informazione usata allo scopo di stabilire, in intervalli specificati, valori misurati di grandezze di specie specificate»⁴⁰.

Le imperfezioni di questo sistema e dei suoi componenti e le interazioni con l'operatore, il misurando e l'ambiente danno origine a un altro contributo di incertezza, che viene chiamato incertezza di misura strumentale, o semplicemente incertezza strumentale. È definita dal VIM come «componente dell'incertezza di misura che ha origine dallo strumento di misura o dal sistema di misura impiegato»⁴¹.

Come si vedrà nel seguito, l'incertezza strumentale viene valutata attraverso la taratura degli strumenti che compongono il sistema di misura e, pertanto, anche l'incertezza dei riferimenti utilizzati nell'operazione di taratura contribuisce all'incertezza strumentale.

Anche in questo caso è utile un raffronto con i concetti presentati nel PCAST report [PCAST, 2016], in particolare con la definizione della validità in campo di un metodo di scienze forensi:

«Validità in campo⁴² significa che il metodo è stato correttamente applicato in campo. È il concetto scientifico che si ritiene corrisponda al requisito giuridico della Federal Rule 702(d) che un esperto “abbia applicato in modo affidabile principi e metodi ai fatti relativi al caso”».

È interessante notare che la definizione data dal PCAST di validità in campo prende in considerazione anche il ruolo dell'esperto – cioè l'operatore – che utilizza il metodo di scienze forensi. In metrologia, l'operatore è considerato parte del sistema di misura e, quindi, contribuisce all'incertezza strumentale. Valutarne il contributo è, probabilmente, uno dei compiti più difficili, ma, una volta assolto, fornisce una valutazione completa e affidabile della validità di un risultato di misura.

Tutto quanto finora analizzato ha chiaramente validità generale, può cioè essere applicato a qualunque processo di misura di qualunque grandezza e in qualunque ambito. È anche indubbio che questi concetti devono poi essere declinati in modo specifico a ciascun ambito applicativo e a ciascuna singola misurazione.

In ambito forense, la fase che maggiormente coinvolge attività sperimentali, volte a raccogliere e interpretare le prove scientifiche, è quella investigativa, le cui varie fasi possono molto schematicamente essere rappresentate come in Fig. 2.

⁴⁰VIM art. 3.2.

⁴¹VIM art. 4.22.

⁴²*Validity as applied* nel testo originale.



Figura 2: Un possibile modello del processo investigativo

Ciascuna fase può dare origine a contributi di incertezza, come sommariamente illustrato in Fig. 3. Senza entrare in dettagli che esulano dallo scopo di questo documento, ci si limita a evidenziare alcuni tra gli aspetti più significativi.

- Durante la fase di identificazione e raccolta, eventuali contaminazioni o procedure di raccolta non corrette possono alterare le proprietà che si intende misurare, dando origine a un contributo di incertezza del risultato finale.
- Durante la fase di conservazione, il livello con cui sono garantite le condizioni ambientali ottimali per la conservazione possono fornire un ulteriore contributo all'incertezza.
- Nell'estrazione e analisi delle proprietà di interesse si possono generare tutti i tipici contributi di incertezza di definizione e strumentale visti finora.
- Nella valutazione e interpretazione dei risultati è estremamente importante identificare e quantificare tutti i contributi di incertezza che si sono manifestati nelle fasi precedenti, tenendo conto di eventuali correlazioni⁴³ tra questi; è inoltre fondamentale



Figura 3: Possibili contributi di incertezza originati dalle varie fasi del processo investigativo

⁴³Giova ricordare che la correlazione è un concetto matematico che rappresenta l'eventuale interdipendenza tra due grandezze, cioè la possibilità che la variazione di una grandezza possa dipendere, in modo più o meno stretto, dalle variazioni di un'altra grandezza. Se le due grandezze variano in modo totalmente indipendente, la correlazione è nulla.

sapere come combinare opportunamente tali contributi al fine di valutare l'incertezza complessiva da associare all'informazione utilizzata nella successiva fase decisionale.

- Infine, i risultati ottenuti vanno presentati, sia in forma documentale, sia in sede di discussione del teste (consulente o perito) ed è estremamente importante farlo con proprietà di linguaggio, per evitare che eventuali imprecisioni lessicali e definizioni inconsistenti con la normativa introducano ulteriori elementi di dubbio, errate comprensioni o producano false certezze.

2.3 INCERTEZZA E DUBBIO

Si è visto, al precedente Par. 2.2.3, come la GUM [JCGM 100, 2008] consideri incertezza e dubbio sinonimi. Si sono anche identificate le possibili sorgenti di incertezza. Per assegnare utilità pratica a questi concetti, resta ora da definire come quantificare e comporre i vari contributi di incertezza. Per farlo, servirà qualche riferimento ad alcuni concetti di matematica e, in particolare, di probabilità. Si cercherà di ridurre al minimo il formalismo matematico, senza entrare nei dettagli e solo per mostrare le formule che permettono di ottenere il risultato desiderato, privilegiando l'illustrazione grafica dei concetti impiegati, di più semplice e intuitiva comprensione.

2.3.1 REQUISITI E IPOTESI

La GUM indica anche, al punto 0.4, i requisiti che deve soddisfare il metodo ideale per valutare ed esprimere l'incertezza. In particolare afferma [JCGM 100, 2008]:

«Il metodo ideale per valutare ed esprimere l'incertezza del risultato di una misurazione dovrebbe essere:

- universale: il metodo dovrebbe essere applicabile a tutti i tipi di misurazione e di dati in ingresso utilizzati nelle misurazioni.

La grandezza usata per esprimere l'incertezza deve essere:

- internamente coerente: dovrebbe cioè essere sia derivabile direttamente dalle componenti che vi contribuiscono, sia indipendente dal modo in cui queste componenti vengono raggruppate e dalla scomposizione delle componenti stesse in sottocomponenti;
- trasferibile: l'incertezza valutata per un risultato dovrebbe essere direttamente utilizzabile come componente della valutazione dell'incertezza di un'altra misurazione nella quale intervenga il primo risultato».

Il punto 0.4 della GUM contiene un'altra importante affermazione [JCGM 100, 2008]:

«Inoltre, in molte applicazioni industriali e commerciali, così come nel campo sanitario e della sicurezza, è spesso necessario fornire un intervallo intorno al risultato della misurazione entro il quale ci si aspetta che cada una grande parte della distribuzione dei valori ragionevolmente attribuibili alla grandezza oggetto della misurazione.

Pertanto, il metodo ideale per valutare ed esprimere l'incertezza di misura dovrebbe poter agevolmente fornire un intervallo di tal sorta, ed in particolare un intervallo con una probabilità di copertura⁴⁴, o livello di fiducia, che corrisponda realisticamente a quello richiesto».

Quest'ultima affermazione indica chiaramente che la GUM intende seguire un approccio probabilistico alla valutazione ed espressione dell'incertezza di misura. Per comprendere se e come ciò sia possibile, viene ancora in soccorso la GUM che, nel già citato punto 0.2 dell'introduzione, ipotizza che tutte le componenti di errore note o ipotizzate siano state valutate e le relative correzioni apportate. Giova qui ricordare che le componenti di errore che possono essere corrette sono quelle dovute agli effetti sistematici, cioè quegli effetti che non variano in misure ripetute dello stesso misurando [Ferrero & Scotti, 2023]. L'esempio tipico di un effetto sistematico è la diversa lunghezza dei bracci di una bilancia a bracci, che causa un errore che si manifesta uguale a se stesso ripetendo la misurazione. Tipica è anche la procedura di correzione, che prevede una doppia pesata, scambiando tra di loro massa incognita e masse campione, e attribuendo alla massa incognita il valore ottenuto dalla media dei valori misurati nelle due pesate.

2.3.2 INCERTEZZA TIPO E INCERTEZZA ESTESA

Nell'ipotesi che gli errori dovuti agli effetti sistematici siano stati corretti, gli unici effetti che possono influenzare il risultato di misura sono quelli aleatori⁴⁵. Gli effetti aleatori si manifestano con una variabilità casuale dei valori misurati, la cui distribuzione può essere matematicamente rappresentata da una variabile aleatoria, a sua volta descritta da una funzione densità di probabilità. La funzione densità di probabilità può assumere forme diverse. In Fig. 4 sono rappresentati tre andamenti tipici: normale o gaussiano, in Fig. 4a, uniforme, in Fig. 4b, e triangolare in Fig. 4c.

⁴⁴La probabilità di copertura di un intervallo di valori indica la probabilità che un valore (in questo caso il valore del misurando) cada all'interno di tale intervallo.

⁴⁵Non è questa la sede per un'approfondita trattazione degli effetti sistematici e aleatori e delle loro conseguenze sulla variabilità dei valori misurati, per la quale si rimanda a [Ferrero & Scotti, 2023].

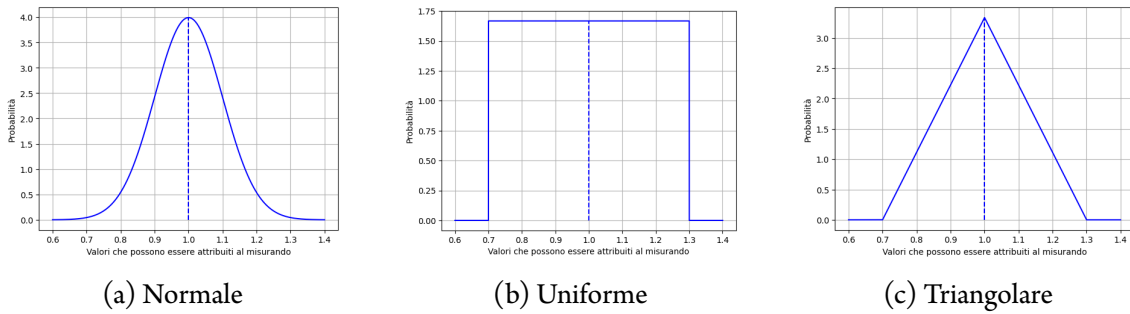


Figura 4: Esempio di funzioni densità di probabilità

La densità di probabilità permette di rappresentare formalmente come si distribuiscono i valori che possono essere ragionevolmente attribuiti al misurando. La teoria della probabilità consente di dimostrare che il *valore medio* μ di questa distribuzione (le linee tratteggiate in Fig. 4) rappresenta, di norma, la miglior stima del valore del misurando. La dispersione dei valori attribuibili al misurando è inoltre spesso quantificabile attraverso un altro parametro caratteristico della funzione densità di probabilità: lo *scarto tipo* σ ⁴⁶.

È possibile dimostrare che all'aumentare della dispersione aumenta anche lo scarto tipo. La Fig. 5 mostra due funzioni densità di probabilità normali, in cui quella rappresentata dalla linea rossa ha scarto tipo doppio rispetto a quella rappresentata con la linea blu. È immediato verificare che la dispersione dei valori rappresentati da quest'ultima è nettamente inferiore alla dispersione dei valori rappresentati dalla distribuzione disegnata con la linea rossa.

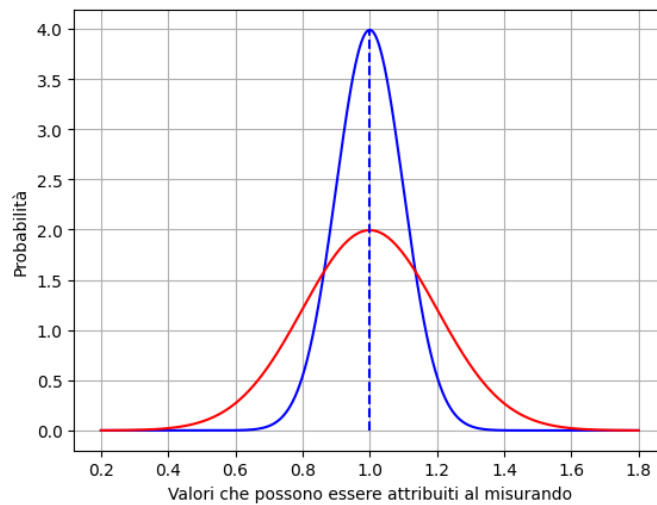


Figura 5: Confronto tra due distribuzioni di probabilità normali: una (linea rossa) con scarto tipo doppio rispetto all'altra (linea blu).

⁴⁶Anche in questo caso si rinvia, per una trattazione matematica più rigorosa, a [Ferrero & Scotti, 2023].

Dal momento che lo scarto tipo di una distribuzione di valori è in grado di quantificarne la dispersione, quando questi valori sono quelli attribuibili al misurando, lo scarto tipo fornisce una valutazione della relativa incertezza. Pertanto, la GUM definisce l'incertezza tipo come: «incertezza del risultato di una misurazione espressa come scarto tipo»⁴⁷. La notazione suggerita è la lettera minuscola u e la GUM suggerisce anche di esprimerla con al più due cifre significative.

Si è visto che la GUM afferma che il metodo ideale per valutare ed esprimere l'incertezza di misura dovrebbe poter agevolmente fornire un intervallo con una probabilità di copertura, o livello di fiducia, che corrisponda realisticamente all'affidabilità da associare al risultato di misura. È quindi doveroso verificare se, a partire dall'incertezza tipo, si arriva agevolmente a definire tale intervallo e a valutare la relativa probabilità di copertura. A tale scopo, si ricorda che la probabilità che il valore del misurando cada in un intervallo di semi-ampiezza pari a u costruito attorno al valore misurato (valore medio della funzione densità di probabilità) è data dall'area sottesa da questa funzione su tale intervallo (per i dettagli matematici si veda [Ferrero & Scotti, 2023]).

La Fig. 6 mostra, colorate in rosso, le aree sottese dalla funzione densità di probabilità nel caso di funzione normale (Fig. 6a) e di funzione triangolare (Fig. 6b), caratterizzate dallo stesso valore di incertezza tipo. È intuitivo comprendere che l'area, e quindi la probabilità di copertura, dipende, a parità di incertezza tipo, dalla forma della funzione densità di probabilità. Nel caso di Fig. 6, la probabilità che il valore del misurando cada nell'intervallo $\pm u$ attorno al valore misurato è pari al 68,3% per la funzione normale e al 65,0% per la funzione triangolare.

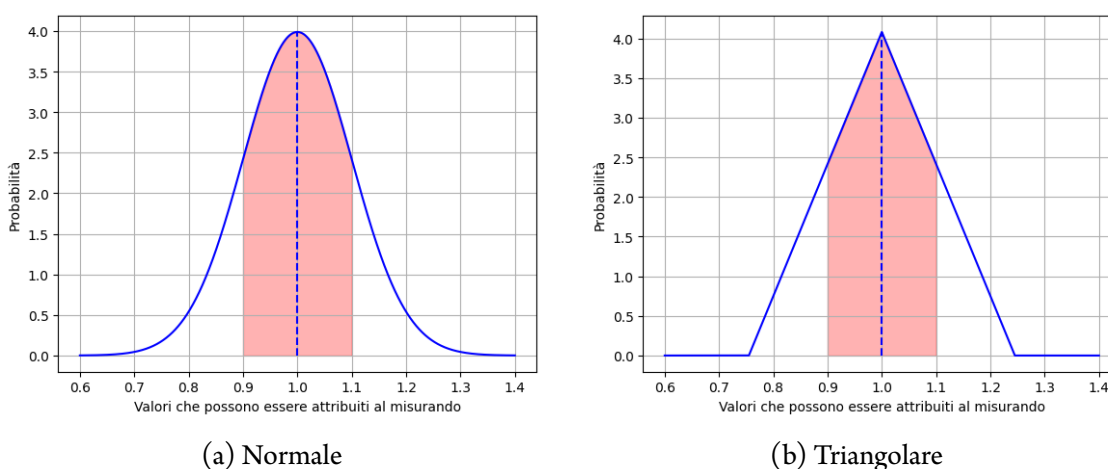


Figura 6: Probabilità che il valore del misurando cada nell'intervallo $\pm u$ attorno al valore misurato. L'area colorata in rosso quantifica tale probabilità

⁴⁷GUM art. 2.3.1.

Non sempre questi valori di probabilità, piuttosto modesti, corrispondono a quelli richiesti, solitamente ben maggiori. La GUM considera questo caso e definisce l'incertezza estesa come la «grandezza che definisce, intorno al risultato di una misurazione, un intervallo che ci si aspetta comprendere una grande parte della distribuzione di valori ragionevolmente attribuibili al misurando»⁴⁸. La GUM suggerisce di utilizzare la lettera maiuscola U per esprimere l'incertezza estesa e suggerisce anche di esprimerla con al più due cifre significative, analogamente a quanto visto per l'incertezza tipo.

In generale, l'incertezza estesa si ottiene moltiplicando l'incertezza tipo per un opportuno fattore k , detto fattore di copertura e definito dalla GUM come il «fattore numerico utilizzato come moltiplicatore dell'incertezza tipo per ottenere un'incertezza estesa»⁴⁹.

Analogamente a quanto già visto per l'incertezza tipo, anche per gli intervalli di semi-ampiezza U attorno al valore misurato, la probabilità che il valore del misurando cada al loro interno dipende dalla forma della funzione densità di probabilità associata al risultato di misura.

La Fig. 7 mostra tali intervalli, costruiti con un fattore di copertura $k = 2$, e la corrispondente area sottesa da una funzione densità di probabilità normale (Fig. 7a) e da una funzione triangolare (Fig. 7b), a parità di incertezza tipo. È possibile dimostrare che la probabilità di copertura di questi intervalli è del 95,45% nel primo caso e del 96,63% nel secondo caso. Questo esempio conferma la necessità di conoscere la funzione densità di probabilità associata al ri-

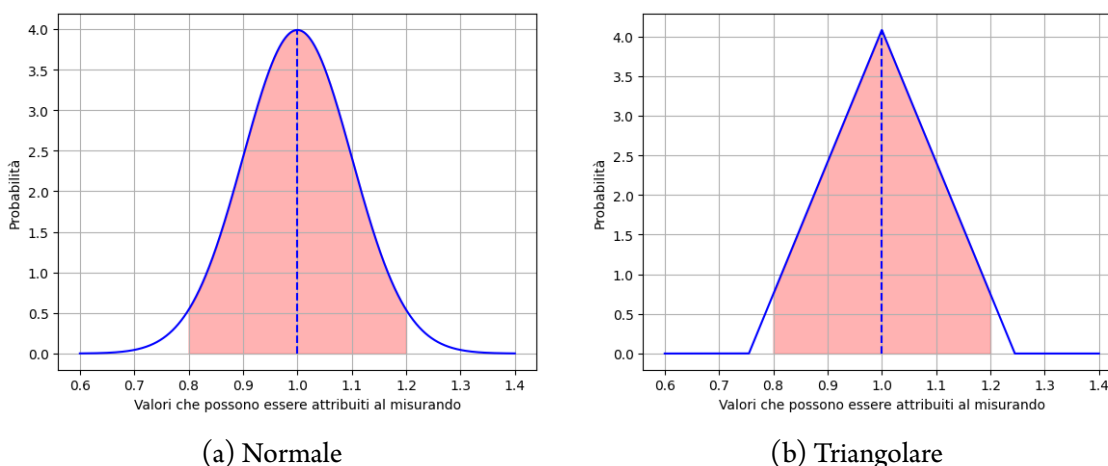


Figura 7: Probabilità che il valore del misurando cada nell'intervallo $\pm 2u$ attorno al valore misurato. L'area colorata in rosso quantifica tale probabilità

⁴⁸GUM, art. 2.35.

⁴⁹GUM art. 2.3.6.

sultato di misura per poter correttamente assegnare una probabilità di copertura all'intervallo definito a partire dall'incertezza estesa.

La GUM prescrive i metodi da applicare per la valutazione dell'incertezza tipo e per identificare la funzione densità di probabilità che descrive la distribuzione dei valori attribuibili al misurando. I dettagli matematici su cui si basano tali metodi esulano dallo scopo di questo documento e pertanto si rinvia il lettore interessato direttamente alla GUM [JCGM 100, 2008] o ai testi che trattano in modo diffuso le modalità di applicazione dei metodi proposti [Ferrero & Scotti, 2023, Ferrero et al., 2015, Ferrero & Salicone, 2006].

2.3.3 L'INCERTEZZA TIPO COMPOSTA

Finora si è considerato solamente il caso di misure di un singolo misurando eseguite in via diretta. Esistono tuttavia molti casi in cui la proprietà che si intende misurare non è agevolmente accessibile direttamente ed è conveniente o necessario valutarla attraverso operazioni matematiche applicate ai risultati di misura di altre grandezze. Come si è visto, uno dei requisiti posti dalla GUM per definire l'incertezza è che sia trasferibile, cioè che l'incertezza valutata per un risultato possa essere impiegata come componente nella valutazione dell'incertezza di un'altra misura nella quale tale risultato intervenga.

Intuitivamente, le incertezze tipo attribuite ai risultati delle misure delle singole grandezze misurate contribuiscono all'incertezza tipo associata al risultato di misura finale, incertezza che la GUM chiama incertezza tipo composta e la definisce come l'«incertezza tipo del risultato di una misurazione allorquando il risultato è ottenuto mediante i valori di un certo numero di altre grandezze; essa è uguale alla radice quadrata positiva di una somma di termini, che sono le varianze o le covarianze di quelle grandezze, pesate secondo la variazione del risultato di misura al variare di esse»⁵⁰.

Questa definizione, ancorché formalmente corretta, risulta difficilmente comprensibile se non si conosce il significato dei termini matematici citati. La formalizzazione matematica, in questo caso, può essere di grande aiuto nel comprendere, almeno a grandi linee, la portata di questa definizione. Si introdurrà quindi tale formalismo, consci che non sarà intuitivo e, pertanto, si tenterà di utilizzare, per quanto possibile, semplici esempi. Si supponga quindi che un dato misurando Y venga determinato a partire da altre N grandezze X_1, X_2, \dots, X_N , attraverso la relazione funzionale f :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (4)$$

⁵⁰GUM art. 2.3.4.

Questa relazione esprime in modo matematico le operazioni da compiere sulle grandezze X_i per ottenere il risultato di misura Y desiderato. Per esempio, se X_1 è il risultato della misura della distanza percorsa da un veicolo in un tempo, anch'esso misurato, X_2 , la velocità media Y dello stesso veicolo sarà misurata come $Y = \frac{X_1}{X_2}$, che esprime, in questo caso, la (4).

In generale, le grandezze X_1, X_2, \dots, X_N sono loro stesse dei misurandi e possono dipendere da altre grandezze a loro volta. Nel seguito, per semplicità e senza perdere in generalità, non verrà però considerata alcun'altra dipendenza ⁵¹.

Ciascun risultato di misura X_i è espresso, come si è visto, dal valore misurato x_i e dall'incertezza tipo $u(x_i)$ ad esso associata. Il valore y del misurando Y è ottenuto applicando la (4) ai valori misurati x_1, x_2, \dots, x_N . Si ha pertanto:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (5)$$

Sempre tralasciando i dettagli matematici, per i quali si rimanda a [Ferrero & Scotti, 2023], sotto condizioni spesso verificate in pratica, l'incertezza tipo composta è ottenuta dalle incertezze tipo dei singoli risultati di misura secondo l'equazione seguente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j)} \quad (6)$$

dove:

- il simbolo Σ indica una somma di termini, e rappresenta in termini matematici la somma di termini citata dalla definizione della GUM;
- i termini $u^2(x_i)$ sono i quadrati delle incertezze tipo associati ai singoli valori misurati x_i , quindi i quadrati di uno scarto tipo o le varianze citate dalla definizione data dalla GUM;
- i termini $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ ⁵² rappresentano i pesi citati dalla definizione data dalla GUM: tanto più grandi sono i pesi, tanto maggiore sarà la sensibilità della funzione f , e quindi del valore misurato y , a variazioni della grandezza di ingresso x_i ; di conseguenza, sarà maggiore anche il contributo dell'incertezza di x_i sul risultato di misura y ;

⁵¹Se qualcuna delle grandezze X_1, X_2, \dots, X_N dovesse dipendere a sua volta da altre grandezze, il metodo descritto in questo paragrafo si applica iterativamente.

⁵²Matematicamente si tratta delle derivate parziali della funzione f rispetto alle variabili x_i .

- i termini $r(x_i, x_j) = r(x_j, x_i)$ sono i coefficienti di correlazione; questi coefficienti variano tra -1 e +1 ed esprimono il grado di dipendenza di ciascun valore misurato x_i dal valore misurato x_j : un coefficiente nullo indica che i due valori misurati variano in maniera totalmente indipendente tra di loro; un valore unitario indica completa dipendenza della variazione di un valore rispetto all'altro. I prodotti $u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j)$ rappresentano le covarianze citate dalla definizione data dalla GUM.

Si è ritenuto utile riportare la formula (6), nota come legge di propagazione dell'incertezza, nonostante la difficoltà di lettura da parte di chi non ha familiarità con la notazione matematica, essenzialmente per due motivi.

1. Si è voluto mostrare che la composizione delle componenti di incertezza è un'operazione non solo possibile, ma anche relativamente semplice da eseguire, dal momento che la (6) può essere agevolmente implementata in un semplice foglio di calcolo, senza richiedere strumenti di calcolo che non siano alla portata di tutti.
2. La portata della (6) va ben oltre il semplice aspetto metrologico. Essendo basata su considerazioni matematiche universali, indica un metodo universale per comporre elementi di dubbio⁵³, che si può rivelare assai utile al giudice quando questi si trovi a dover valutare e comporre elementi di prova ottenuti con mezzi diversi, incluse le prove scientifiche. In particolare, la (6) indica un percorso valutativo che richiede:
 - di esprimere in modo quantitativo i dubbi con probabilità che, nel caso di prove ottenute con metodi non scientifici, possono essere soggettive, fondate sull'esperienza del giudice;
 - di valutare l'impatto, più o meno significativo, di quel particolare elemento di prova sul giudizio finale. Si è visto che una elevata "sensibilità" del giudizio finale nei confronti di un particolare elemento può "amplificare" il dubbio relativo a quell'elemento nella valutazione globale;
 - di valutare eventuali dipendenze di un elemento da un altro elemento. A titolo di esempio, tre testimonianze considerate indipendenti su un medesimo fatto portano a considerare la ricostruzione del fatto che emerge dalle testimonianze più attendibile che nel caso di una sola testimonianza. Se però le tre testimonianze non fossero totalmente indipendenti, l'attendibilità della ricostruzione non sarebbe maggiore di quella derivante da una singola testimonianza.

⁵³Si ricorda che l'incertezza di misura è sinonimo di dubbio, e un dubbio può sempre essere quantificato in termini di scarto tipo di una distribuzione di possibili valori.

Inoltre, è estremamente importante notare che la (6) fornisce lo scarto tipo della funzione densità di probabilità associata al risultato di misura Y , e quindi la sua incertezza tipo. Questa equazione, tuttavia, non dice nulla sulla funzione densità di probabilità dei valori attribuibili a Y . Come si è visto ai punti precedenti, se tale funzione non è nota non è possibile valutare la probabilità di copertura di un qualunque intervallo costruito attorno al valore misurato y a partire dall'incertezza tipo composta $u_c(y)$ o a un qualunque suo multiplo.

È pertanto necessario fare delle valide ipotesi su questa funzione densità di probabilità, oppure determinarla. La GUM [JCGM 100, 2008] suggerisce, ove possibile, di fare riferimento al teorema del limite centrale. Questo importante teorema della teoria della probabilità afferma che, se:

1. la funzione f è lineare⁵⁴;
2. nessuna delle $u(x_i)$ domina le altre (in pratica se sono tutte dello stesso ordine di grandezza);
3. il numero N di contributi è infinito;

allora la funzione densità di probabilità che descrive la grandezza Y è una funzione normale. Qualora il numero di contributi N sia finito, come avviene in pratica, allora la funzione densità di probabilità che descrive la Y approssima una funzione normale e l'approssimazione è tanto migliore quanto più grande è N .

Benché questo risultato sia importante da un punto di vista teorico, è tuttavia di difficile applicazione nella pratica quotidiana, in quanto il numero di grandezze N è spesso piccolo e si ha spesso a che fare con funzioni f fortemente non lineari, quali ad esempio moltiplicazioni o divisioni, come nell'esempio sopra riportato di misura di una velocità. Per affrontare correttamente anche queste situazioni, il BIPM ha pubblicato il Supplemento 1 alla GUM [JCGM 101, 2008], in cui si raccomanda di impiegare il metodo di simulazione numerica Monte Carlo per determinare (in modo approssimato mediante un istogramma delle frequenze relative) la funzione densità di probabilità da associare al risultato Y .

Senza entrare nei dettagli implementativi di una simulazione Monte Carlo, per i quali si rimanda sempre a [Ferrero & Scotti, 2023], ci si limita a riportare, in Fig. 8, il risultato di una simulazione relativa alla misura di una resistenza di terra, ottenuta mediante il rapporto dei valori misurati di tensione e corrente. Si è supposto che i valori di tensione e corrente siano misurati con un'incertezza tipo pari allo 0,5% del valore misurato, entrambi descritti con una densità di probabilità uniforme; si è inoltre supposto che la correlazione tra le due misure sia

⁵⁴Ciò significa che il valore y è ottenuto come somma pesata dei valori misurati x_i .

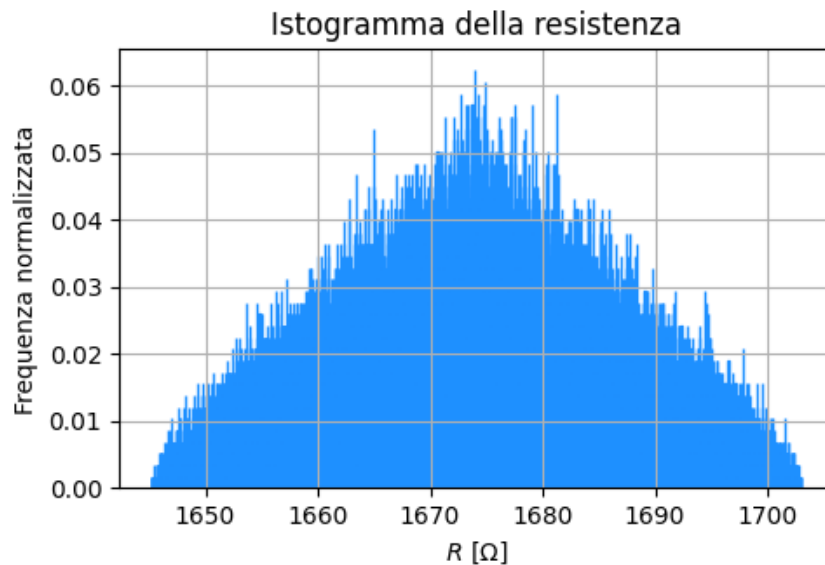


Figura 8: Istogramma delle frequenze relative per il valore misurato di resistenza

nulla ($r = 0$). Applicando la (6) si ottiene un'incertezza tipo composta $u_c(R) = 12 \Omega$, pari allo 0,72% del valore misurato (1674 Ω). La Fig. 8 indica chiaramente che la funzione densità di probabilità, approssimata dall'istogramma delle frequenze, è ben lontana dall'essere normale e questo conferma che l'impiego del teorema del limite centrale può portare a risultati non corretti se le ipotesi sui cui si fonda non sono soddisfatte.

2.3.4 IL DUBBIO DI DECISIONE ERRATA

Avendo definito le modalità con cui attribuire a un risultato di misura sia l'incertezza, sia la funzione densità di probabilità che rappresenta la distribuzione di valori che possono essere attribuiti al misurando, si è ora in grado di quantificare il dubbio che una decisione presa sulla base di tale risultato sia errata. Senza perdere di generalità⁵⁵, si mostrerà come quantificare tale dubbio facendo riferimento all'esempio che segue.

Si supponga di aver misurato una grandezza e di avere ottenuto il valore, espresso nella corretta unità di misura, 1,6. Si supponga anche che l'incertezza tipo associata al valore misurato sia pari al 10,7% del valore stesso e che i valori che possono essere ragionevolmente attribuibili al misurando si distribuiscano secondo una funzione densità di probabilità normale, come rappresentato in Fig. 9.

Si supponga che si verifichi una condizione di illegalità se la grandezza considerata superi il valore 1,5, indicato in Fig. 9 con una linea verticale rossa. Se ci si limitasse al solo confronto

⁵⁵Per gli aspetti teorici e la loro trattazione matematica si rimanda, come sempre, a [Ferrero & Scotti, 2023].

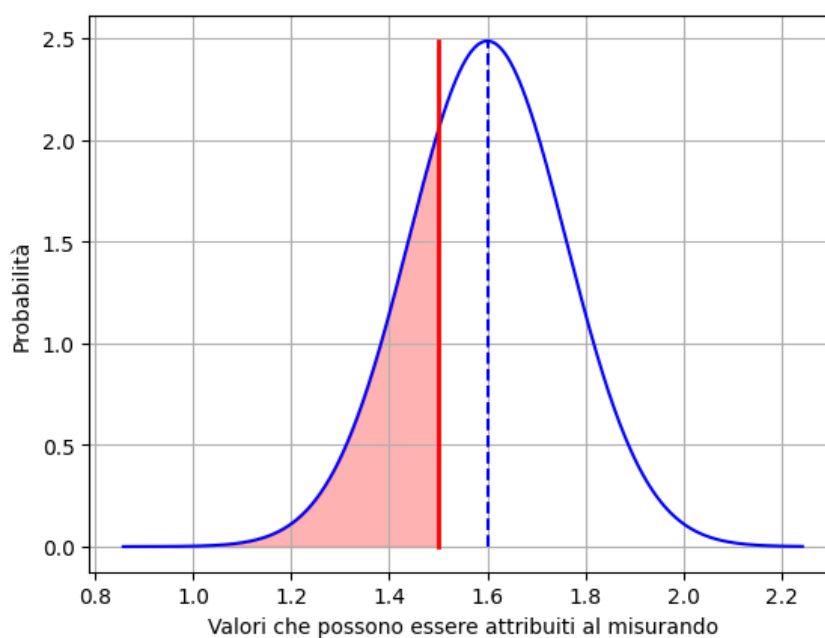


Figura 9: Funzione densità di probabilità normale che rappresenta i valori attribuibili al misurando. Il limite da non superare, rappresentato dalla linea verticale rossa cade all'interno dei valori attribuibili al misurando. La probabilità che il misurando sia inferiore al limite è data dall'area colorata in rosso

tra il valore misurato (1,6) e il valore limite (1,5) non ci sarebbe alcun dubbio che il limite sia stato superato e che ci si trovi in una situazione di illegalità da sanzionare.

Se però si osserva la Fig. 9, si percepisce immediatamente che il limite cade all'interno dell'intervallo di valori che possono ragionevolmente essere attribuiti al misurando e quindi che questo potrebbe essere minore del limite, facendo cadere l'ipotesi di illegalità. In altri termini, se si rappresenta il risultato di misura in modo metrologicamente corretto, ossia come un insieme di valori e non come un singolo valore, nasce un dubbio che la decisione presa sulla base del solo valore misurato, invece che sull'insieme dei valori ad esso attribuibili, sia errata.

Dalla teoria della probabilità, nota la funzione densità di probabilità, è possibile quantificare il dubbio che il valore attribuibile al misurando sia inferiore al limite; basta infatti determinare il valore dell'area sottesa dalla funzione fino al limite, ossia l'area colorata di rosso in Fig. 9. Nell'esempio considerato, questa probabilità vale il 26,7% ed esprime, in forma numerica, il dubbio che la decisione di considerare superato il limite non sia corretta.

Riassumendo, si è mostrato come, attraverso un approccio metrologicamente corretto alla valutazione delle prove scientifiche – ossia valutando l'incertezza di misura e determinando la funzione densità di probabilità che caratterizza la dispersione di valori che possono ragionevolmente essere attribuiti al misurando – sia possibile rendere palese e quantificare il dubbio

che una decisione basata sul confronto tra il valore misurato e un limite possa risultare non corretta.

2.4 VALIDAZIONE DELLA MISURA

I punti trattati al precedente Par. 2.3 hanno illustrato il concetto di incertezza di misura e come, attraverso la sua valutazione, sia possibile arrivare a definire, attorno al valore misurato, un intervallo nel quale si suppone cada il valore – ignoto – del misurando con una data probabilità di copertura o livello di fiducia. Si è anche visto come, attraverso la corretta espressione dell'incertezza, sia possibile arrivare a quantificare il dubbio che decisioni prese sulla base di risultati di misura possano essere errate.

Tuttavia, quanto visto non garantisce che il risultato di misura sia corretto, cioè che il valore del misurando cada realmente nell'intervallo ottenuto con la probabilità data. Non è infatti possibile escludere a priori che, nella procedura di misura, non sia stato correttamente individuato qualche effetto sistematico (e non siano state pertanto apportate le dovute correzioni), ad esempio quando non sia stato correttamente valutato l'effetto di una qualche grandezza di influenza, e che questo abbia portato a una valutazione dell'incertezza formalmente corretta, ma sostanzialmente errata.

In altri termini, come già anticipato al Par. 2.2.1, la sola valutazione dell'incertezza di misura non garantisce l'intersoggettività dell'informazione ottenuta da una misurazione. Per garantirla è necessario fare riferimento ad altri due concetti fondamentali della metrologia: la taratura e la riferibilità metrologica.

2.4.1 TARATURA

La taratura è così definita dal VIM⁵⁶:

«Operazione eseguita in condizioni specificate, che in una prima fase stabilisce una relazione tra i valori di una grandezza, con le rispettive incertezze di misura, forniti da campioni di misura, e le corrispondenti indicazioni, comprensive delle incertezze di misura associate, e in una seconda fase usa queste informazioni per stabilire una relazione che consente di ottenere un risultato di misura a partire da un'indicazione».

Il significato di questa definizione può essere compreso supponendo di misurare una generica grandezza x con lo strumento che si desidera tarare. In accordo con la definizione data, la

⁵⁶VIM art. 2.39.

prima fase richiede di stabilire una relazione tra «i valori di una grandezza, con le rispettive incertezze di misura, forniti da campioni di misura e le corrispondenti indicazioni, comprensive delle incertezze di misura associate».

Ciò richiede la disponibilità di un campione x_s ⁵⁷ per la grandezza considerata x e di misurare il campione stesso x_s con lo strumento che si intende tarare. Il campione x_s , in quanto tale, ha valore noto ed è nota la sua incertezza tipo $u(x_s)$. Quando x_s viene misurato con lo strumento in taratura, questo restituisce un'indicazione x_m , con un'incertezza tipo $u(x_m)$.

La situazione che si presenta è, in generale, quella mostrata in Fig. 10 che rappresenta graficamente la relazione tra i valori delle due grandezze coinvolte nella prima fase della taratura.

Una volta completata la prima fase, è necessario affrontare la seconda fase, che consiste nello «stabilire una relazione che consente di ottenere un risultato di misura a partire da un'indicazione». Dalla Fig. 10 si evince immediatamente che l'indicazione ottenuta x_m differisce dal valore del campione x_s per la quantità:

$$\Delta = x_m - x_s \quad (7)$$

Questa relazione quantifica la differenza tra l'indicazione dello strumento in taratura e il valore atteso del risultato di misura dato dal valore del campione. Si può quindi iniziare a definire la relazione necessaria per ottenere un risultato di misura a partire da un'indicazione, correggendo quest'ultima come segue:

$$x_r = x_m - \Delta \quad (8)$$

dove x_r è il valore numerico del risultato di misura desiderato.

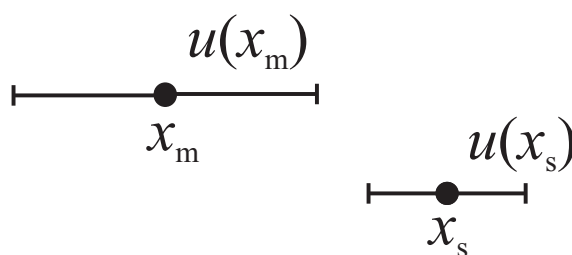


Figura 10: Valore del campione x_s , con la sua incertezza, e indicazione x_m fornita dallo strumento in taratura, con la sua incertezza

⁵⁷Si suppone per semplicità di trattazione che il misurando sia una grandezza misurabile su una scala a rapporto, come avviene per le principali grandezze utilizzate nelle scienze empiriche. In questo caso la scala di misura è determinata fissando un singolo campione.

Per completare la trasformazione da indicazione a risultato di misura, è ora necessario valutare l'incertezza tipo associata al valore numerico fornito dalla (8). A tale scopo bisogna osservare che questo valore è affetto da due contributi di incertezza. Un primo contributo ha origine nello strumento stesso ed è quantificato da $u(x_m)$, mentre il secondo contributo è dato dall'incertezza associata al campione, $u(x_s)$. Quest'ultimo contributo riflette la conoscenza incompleta sul valore del campione, ossia sulla affidabilità della correzione applicata con la (8). È quindi necessario combinare questi due contributi per valutare l'incertezza tipo associata a x_r . Dal momento che questi due contributi sono chiaramente indipendenti in quanto associati ad entità diverse (lo strumento e il campione), applicando la (6), si ha:

$$u(x_r) = \sqrt{u(x_m)^2 + u(x_s)^2} \quad (9)$$

Le due equazioni (8) e (9) costituiscono il risultato della seconda fase della taratura e, quindi, dell'intera operazione di taratura. La (9) mostra anche che, a meno che $u(x_s)$ sia trascurabile rispetto a $u(x_m)$, la taratura contribuisce ad aumentare l'incertezza di misura, dal momento che è necessario considerare anche l'incertezza del campione.

Va inoltre osservato che la correzione data dalla (8) e l'incertezza data dalla (9) devono essere valutate per l'intero campo di misura dello strumento. La taratura deve pertanto essere eseguita su un numero di punti del campo di misura sufficiente a individuare le correzioni da apportare su qualunque valore misurato all'interno di quel campo [Ferrero & Scotti, 2023].

Esaminato l'aspetto operativo dell'operazione di taratura, si rende necessario sottolineare un punto spesso trascurato in ambito forense. Come chiaramente indicato nella definizione del VIM, la taratura è un'operazione eseguita in condizioni specificate. Ciò significa che il risultato della taratura è valido solamente nelle condizioni in cui si è svolta la taratura e al momento della taratura.

È quindi particolarmente importante conoscere i valori delle grandezze di influenza al momento della taratura, valori che devono essere riportati nel certificato di taratura, perché variazioni di queste grandezze comportano, in generale, variazioni nell'indicazione dello strumento e, quindi, del risultato di misura. Le correzioni apportate a seguito della taratura potrebbero pertanto non essere più valide se lo strumento è utilizzato in condizioni operative diverse da quelle di taratura.

Questa situazione si verifica generalmente quando un sistema di misura viene tarato in laboratorio, in condizioni specificate, e poi viene utilizzato in campo, in situazioni anche significativamente diverse. In questi casi, il risultato della taratura può ancora essere utilizzato, purché sia disponibile un modello (in genere analitico) che leghi gli effetti della differenza tra i valori delle grandezze di influenza durante la taratura e i valori che le stesse grandezze assumo-

no nelle condizioni operative. Tuttavia, come già sottolineato, qualunque modello fornisce una conoscenza finita sugli effetti descritti e, conseguentemente, contribuisce all'incertezza di misura. Questo ulteriore contributo deve pertanto essere combinato con gli altri contributi considerati dalla (9), aumentando così l'incertezza associata al valore misurato.

L'esempio tipico, in ambito forense, di questa situazione è quello dei dispositivi per il rilievo della velocità degli autoveicoli in transito (i cosiddetti autovelox), che si trovano a lavorare in condizioni ambientali (essenzialmente temperatura e umidità) anche molto diverse da quelle in cui sono stati tarati. In questo caso, oltre all'incertezza di taratura, è necessario considerare anche il contributo di incertezza dovuto alle variazioni delle condizioni ambientali.

Infine, bisogna considerare che il risultato della taratura si riferisce alle condizioni del sistema di misura nel momento in cui si effettua la taratura. Nulla garantisce che il sistema di misura mantenga le sue caratteristiche metrologiche nel tempo. Generalmente, infatti, a causa dell'invecchiamento dei componenti, i sistemi di misura modificano il proprio comportamento al trascorrere del tempo.

Pertanto, è compito di chi impiega il sistema di misura, definire un programma di ri-tarature fissandone la periodicità, sulla base delle informazioni disponibili sul comportamento del sistema stesso [Ferrero & Scotti, 2023], in modo da garantire che l'eventuale deriva delle caratteristiche nel periodo intercorso tra due tarature successive, non ne pregiudichi le prestazioni metrologiche.

2.4.2 RIFERIBILITÀ METROLOGICA

In linea di principio, l'operazione di taratura richiede il confronto tra il sistema di misura da tarare e un campione. Si è visto, al Par. 2.2.1, che i campioni (a cui solitamente si fa riferimento come campioni primari) sono quelli realizzati e mantenuti dagli NMI degli Stati firmatari della Convenzione del Metro e che questi campioni sono, di fatto, inaccessibili per tarare i sistemi di misura normalmente utilizzati.

Nella normale pratica delle misure, i campioni primari vengono utilizzati per tarare pochi strumenti di pregio, a loro volta usati per tarare altri strumenti, in una gerarchia di tarature in cui ogni passo contribuisce all'incertezza di taratura, come chiaramente indicato dalla (9).

Come si è visto, è possibile garantire la condizione di intersoggettività mediante la riferibilità metrologica, che pone il risultato di misura in relazione a un riferimento «attraverso una documentata catena ininterrotta di tarature». In questa definizione, le parole chiave sono «documentata» e «ininterrotta».

Ininterrotta significa che ciascun elemento della catena di tarature deve garantire la stessa riferibilità di tutti gli altri elementi. In particolare, ogni strumento della catena deve essere tarato da un laboratorio che è parte della stessa gerarchia di tarature, ma si trova un passo più vicino al campione di riferimento.

Documentata significa che ciascun passo del processo di taratura deve essere adeguatamente documentato, in modo da fornire evidenza che ogni azione eseguita durante la taratura assicuri che il risultato ottenuto faccia effettivamente riferimento al campione utilizzato e che la catena di tarature sia integra, ossia senza interruzioni.

L'importanza della riferibilità nel garantire che un risultato di misura sia stato correttamente ottenuto e che l'incertezza di misura sia stata correttamente valutata sulla base di una corretta taratura dei sistemi di misura impiegati è talmente rilevante – soprattutto in ambito forense – che la validazione dell'intero processo deve essere regolamentata da un sistema di accreditamento ufficialmente costituito.

Il sistema di accreditamento consegue anch'esso dalla Convenzione del Metro. In uno scenario internazionale sempre più orientato alla globalizzazione, risulta di fondamentale importanza garantire la compatibilità dei risultati di misura relativi a un dato misurando ottenuti nei diversi Stati membri. A tale scopo, nel 1999 fu siglato dagli Stati che aderiscono alla Convenzione il *Mutual Recognition Arrangement* – MRA [BIPM CIPM, 1999], o Accordo di Mutuo Riconoscimento. Sulla base di questo accordo, ogni risultato fornito da un sistema di misura tarato in riferimento ai campioni nazionali di uno Stato viene riconosciuto da tutti gli Stati membri e dagli Stati associati, esattamente come se tale sistema fosse stato tarato utilizzando i propri campioni nazionali.

Nell'MRA è stabilito che gli NMI di ciascuno degli Stati membri e associati firmatari devono soddisfare i requisiti della ISO/IEC Guide 25:1990, *Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e di taratura*. Questa Guida, ora diventata in Italia la Norma UNI CEI 17025:2018 [UNI CEI EN ISO/IEC 17025, 2018], stabilisce i requisiti che un laboratorio di taratura deve soddisfare per provare le proprie competenze e la propria abilità nel tarare sistemi di misura, assicurando così la riferibilità ai campioni nazionali.

Il MRA riguarda solamente gli NMI e fissa i requisiti che questi Istituti devono soddisfare per ottenere il mutuo riconoscimento. Si limita pertanto a garantire che ciascun campione nazionale sia metrologicamente compatibile con i corrispondenti campioni degli altri Stati membri o associati. D'altra parte, una gerarchia di laboratori di taratura che soddisfano gli stessi requisiti richiesti agli NMI e dettati dalla Norma UNI CEI 17025:2018 può, in linea di principio, garantire la riferibilità ai campioni nazionali e soddisfare quindi le esigenze di taratura della nazione.

Gli Stati firmatari del MRA hanno conseguentemente istituito, sotto la supervisione scientifica dei propri NMI, organismi di accreditamento allo scopo di verificare se un laboratorio possieda, per una data grandezza, le competenze richieste dalla Norma 17025 e, in caso di esito positivo, qualificarlo come laboratorio accreditato in conformità alla 17025 per quella data grandezza. È in tal modo garantito che i risultati di misura forniti da quel laboratorio per la grandezza per cui è accreditato sono metrologicamente riferibili ai campioni nazionali.

L'Unione Europea ha emanato un regolamento lievemente più severo, il Regolamento 765/2008 [Regolamento (EC) No 765/2008, 2008], che stabilisce che ciascun stato dell'UE possa avere un unico organismo di accreditamento a sua volta accreditato e sorvegliato dall'*European co-operation for Accreditation* (EA). Il compito di questi organismi di accreditamento è di verificare la conformità dei laboratori alla Norma UNI CEI 17025.

Pertanto, mentre, ad esempio, gli USA hanno diversi organismi di accreditamento, come l'*American Association for Laboratory Accreditation* (A2LA), il *Perry Johnson Laboratory Accreditation* (PJLA) e l'*International Accreditation Service, Inc.* (IAS), ciascun Stato europeo ha un unico organismo di accreditamento. In Italia tale organismo è Accredia.

Si può concludere quindi che i laboratori accreditati garantiscano la «documentata catena ininterrotta di tarature» necessaria per riferire un risultato di misura ai campioni nazionali. Solo i sistemi di misura tarati da questi laboratori garantiscono pertanto la riferibilità metrologica dei risultati di misura che forniscono.

In ambito forense, l'accreditamento viene auspicato dalla Decisione Quadro 2009/905/GAI del Consiglio dell'unione Europea sull'accreditamento dei fornitori di servizi forensi che effettuano attività di laboratorio [Decisione Quadro 2009/905/GAI, 2009], il cui obiettivo è chiaramente riportato all'art. 1.1:

«Scopo della presente decisione quadro è assicurare che le autorità responsabili della prevenzione e individuazione dei reati e delle relative indagini riconoscano ai risultati delle attività di laboratorio svolte da fornitori di servizi forensi accreditati in uno Stato membro la stessa attendibilità dei risultati delle attività di laboratorio svolte da fornitori di servizi forensi accreditati per la norma EN ISO/IEC 17025 in qualsiasi altro Stato membro».

L'art. 1.2 chiarisce in che modo raggiungere questo obiettivo:

«L'obiettivo è conseguito assicurando che un organismo nazionale di accreditamento attesti che i fornitori di servizi forensi che effettuano attività di laboratorio sono conformi alla norma EN ISO/IEC 17025».

Infine, l'art. 2 definisce l'ambito di applicazione, affermando che la Decisione si applica alle attività di laboratorio che riguardano il profilo del DNA e i dati dattiloscopici, e l'art. 7 afferma che gli Stati membri devono adottare le misure necessarie per conformarsi alle disposizioni della Decisione Quadro relative ai profili del DNA entro il 30 novembre 2013.

Si ricorda che la Norma 17025, nel definire i requisiti che un laboratorio di taratura deve soddisfare, prescrive che l'incertezza di misura venga valutata e che il laboratorio garantisca la riferibilità metrologica dei propri risultati definendo un appropriato programma di ri-tarature dei propri sistemi di misura. Pertanto, imponendo il rispetto di tale norma il legislatore europeo assegna, sia pure in modo indiretto e limitatamente – almeno in modo esplicito – ai laboratori di analisi del DNA e delle impronte digitali, grande importanza agli aspetti metrologici nel rilievo e valutazione delle prove scientifiche.

3

METROLOGIA E PROCEDIMENTO PROBATORIO

Seguendo la classificazione tradizionale, il procedimento probatorio si articola in tre fasi dedicate, rispettivamente, all'ammissione, all'assunzione e alla valutazione della prova. La classificazione appare rilevante perché, in ciascuna fase, muta il quadro normativo di riferimento. Essa, inoltre, si rivela utile perché consente di procedere con metodo analitico, esaminando il contributo specifico apportato dalla metrologia in relazione a ciascun segmento del procedimento probatorio. Nei paragrafi che seguono, pertanto, si delinea sommariamente il contenuto delle singole fasi, evidenziando il rilievo assunto dalla metrologia forense nell'ambito di ciascuna di esse.

3.1 L'AMMISSIONE DELLA PROVA TECNICO-SCIENTIFICA⁵⁸

Nel Cap. 2 si è visto come un corretto impiego della metrologia forense e dei suoi principi sia in grado di assicurare un approccio razionale alla c.d. prova tecnico-scientifica, in quanto consente di mettere in evidenza i limiti delle risultanze probatorie formatesi in sede giudiziale.

Prima di delineare il ruolo fondamentale che la metrologia può assumere nelle diverse fasi del procedimento probatorio e – per quanto di specifico interesse nel presente paragrafo, nell'ammissione della prova scientifica – risulta necessario effettuare una breve ricognizione delle posizioni assunte dalla dottrina italiana in relazione al giudizio di ammissibilità della prova scientifica.

3.1.1 UNA RICOGNIZIONE SULLE POSIZIONI DELLA DOTTRINA ITALIANA IN ORDINE AL VAGLIO DI AMMISSIBILITÀ DELLA PROVA SCIENTIFICA

In via preliminare, è utile ricordare che, secondo il vigente codice di procedura penale, gli strumenti probatori volti a “veicolare” nel processo conoscenze di carattere tecnico/scientifico

⁵⁸Il Par. 3.1 è a cura di Giulia Barone.

sono la consulenza tecnica e/o la perizia. Quest'ultima rientra nel catalogo dei mezzi di prova tipici, in quanto puntualmente disciplinati dalla legge⁵⁹. Sul punto vale la pena precisare che il patrimonio informativo alla base dell'attività di periti e/o consulenti tecnici è di regola raccolto dalla polizia giudiziaria, dalla polizia scientifica e dagli esperti di cui essa può avvalersi per «raccolg[re] [...] ogni elemento utile alla ricostruzione del fatto e alla individuazione del colpevole» (art. 348 comma 1 c.p.p.), «procede[ndo], fra l'altro», «alla ricerca delle cose e delle tracce pertinenti al reato nonché alla conservazione di esse e dello stato dei luoghi» (art. 348 comma 2 lett. a c.p.p.).

Tanto premesso, deve osservarsi come rispetto alle prove tipiche (*melius* mezzi di prova tipici) l'ammissione sia regolata dall'art. 190 c.p.p. Tale norma – ispirandosi a un principio di massima apertura verso le richieste probatorie delle parti, coerentemente con quello che è l'assetto funzionale del diritto alla prova⁶⁰ – impone al giudice l'esclusione delle sole prove vietate dalla legge e di quelle che appaiano manifestamente superflue o irrilevanti. Ne consegue che, ai sensi dell'art. 190 c.p.p., da leggersi in combinato disposto con l'art. 187 c.p.p., il vaglio giudiziale di ammissibilità delle prove tipiche si sostanzia in un accertamento negativo circa la loro manifesta irrilevanza (nel senso di non pertinenza rispetto ai fatti oggetto di prova) e superfluità (nel senso di sovrabbondanza rispetto ai risultati probatori già acquisiti o da acquisire con altri mezzi di prova). Eventuali dubbi in punto di rilevanza e superfluità, dovrebbero quindi “giocare” a favore dell'ammissione dei mezzi istruttori richiesti dalle parti.

Con riferimento alle prove atipiche – ossia, alle prove non regolamentate espressamente dalla legge – il legislatore ha invece ritenuto opportuno condizionare l'ammissione alla verifica di un *quid pluris*, sicché l'art. 189 c.p.p., oltre ad esigere il consueto accertamento sulla non manifesta irrilevanza della prova, impone altresì al magistrato di valutare che la stessa non vada a pregiudicare la libertà morale della persona e, soprattutto, che sia idonea ad assicurare l'accertamento del fatto.

Stando ad un'interpretazione letterale degli artt. 189 e 190 c.p.p., sembrerebbe che l'idoneità probatoria possa assurgere a criterio di ammissibilità esclusivamente rispetto alle prove atipiche; diversamente, in relazione alle prove tipiche, essa parrebbe acquisire rilievo solo nel-

⁵⁹Quanto alla perizia, la stessa è regolata dagli artt. 220 - 232 c.p.p. Ai sensi dell'art. 220 c.p.p., la perizia è ammessa quando «occorre svolgere indagini o acquisire dati o valutazioni che richiedono specifiche competenze tecniche, scientifiche o artistiche». Disposta la perizia, le parti possono nominare i propri consulenti tecnici, affinché partecipino alle operazioni peritali, proponendo indagini specifiche e/o formulando osservazioni e riserve; si parla, in questo caso, di consulenza endo-peritale (cfr. art. 230 c.p.p.). Tuttavia, il codice di rito riconosce alle parti la facoltà di nominare un professionista esperto per introdurre e presentare al giudice conoscenze specialistiche anche quando non viene disposta una perizia e, dunque, indipendentemente da essa; si parla, in questo caso, di consulenza extra-peritale (cfr. art. 233 c.p.p.).

⁶⁰Si veda [Gennari, 2022] p. 176.

la successiva fase della valutazione probatoria (ai sensi del combinato disposto degli artt. 192 e 546 comma 1 lett. e c.p.p.)⁶¹.

Tale ricostruzione non è però condivisa da autorevole dottrina, la quale, proprio con riferimento all'ammissione della c.d. prova scientifica, propone l'applicazione di una dicotomia analoga a quella poc'anzi prospettata⁶². L'assunto di partenza di tale impostazione è che nell'ambito delle evidenze scientifiche occorra distinguere tra prova scientifica "comune" – ossia, quella che sia stata oggetto di un consolidato uso in sede giudiziale – e prova scientifica "nuova" – vale a dire quella che «fa uso di strumenti scientifico-tecnici nuovi o controversi e di elevata specializzazione». In ragione del suo consolidato uso in sede giudiziaria, la prova scientifica comune dovrebbe essere sottoposta al vaglio di ammissibilità ordinario, dettato dall'art. 190 c.p.p.; per contro, allorché vengano in rilievo metodiche nuove, controverse o comunque altamente specializzate, il vaglio di ammissibilità della *novel science* dovrebbe essere condotto alla stregua del combinato disposto di cui agli artt. 189 e 190 c.p.p.

La tesi in esame è stata elaborata dalla dottrina italiana per far fronte all'annoso problema dell'ingresso, nei contesti giudiziari, della c.d. *junk science*, e quindi per soddisfare l'avvertita esigenza di scongiurare il rischio che vengano introdotte (e usate ai fini decisori) "prove" fondate su metodologie e/o teorie prive di un effettivo fondamento scientifico: in altri termini, sprovviste di un'adeguata validità scientifica⁶³. In quest'ottica, l'orientamento qui in commento propone di introdurre, in sede di ammissione delle prove scientifiche nuove, una verifica più rigorosa, basata su un'interpretazione analogica dell'art. 189 c.p.p. In base a tale esegesi, nell'espressione «prove non disciplinate dalla legge» dovrebbero essere ricondotte anche le prove scientifiche nuove: ancorandosi a metodologie e/o teorie sconosciute o la cui affidabilità non è stata sufficientemente riconosciuta dall'esperienza giudiziaria, esse non sarebbero altro che delle prove atipiche in senso improprio⁶⁴.

Secondo tale impostazione, il giudizio di ammissibilità della prova scientifica consterebbe dunque di due fasi: la prima, tesa a verificare, nel contraddittorio tra le parti, se ci si trovi o meno in presenza di una prova scientifica nuova; la seconda, coincidente con la valutazione ai sensi del combinato disposto di cui agli artt. 189 e 190 c.p.p. In altri termini, dopo aver appurato di essere al cospetto di una prova scientifica nuova, il giudice sarebbe chiamato a valutare, in un'udienza *ad hoc*, nel contraddittorio tra le parti, se la nuova prova specialistica

⁶¹Sul punto si rimanda al successivo Par. 3.3 in tema di valutazione della prova tecnico-scientifica.

⁶²Il riferimento è a [Dominioni, 2005], si veda in particolare p. 13 e ss.

⁶³In argomento la letteratura è amplissima; si vedano, tra gli altri, [A.a.Vv., 2022]; [A.a.Vv., 2011]; [Basile, 2018]; [Conti, 2008]; [Dominioni, 2005]; [Rivello, 2014]; [Rivello, 2017].

⁶⁴[Dominioni, 2005], in particolare pp. 102-108.

sia rilevante, dotata di una sufficiente idoneità probatoria e se la stessa pregiudichi o meno la libertà morale della persona.

In accordo con i sostenitori della tesi in esame, la verifica circa l'idoneità probatoria dovrebbe essere condotta sulla base dei seguenti criteri: a) la validità teorica del principio scientifico o della metodologia; b) l'adeguatezza dello strumento tecnico rispetto alla ricostruzione del fatto; c) la controllabilità del corretto utilizzo pratico dello strumento; d) la qualificazione dell'esperto che esegue l'analisi; e) la comprensibilità dello strumento tecnico⁶⁵.

La proposta di introdurre un'udienza predibattimentale *ad hoc* per il giudizio di ammissibilità delle prove scientifiche (nuove) e, soprattutto, la definizione di criteri alla stregua dei quali valutare la suddetta ammissibilità, sono dichiaratamente ispirate al sistema nordamericano di ammissione dell'*expert witness*⁶⁶ e all'evoluzione che lo ha interessato a partire dai primi anni '90, all'indomani della nota sentenza *Daubert v. Merrel Dow Pharmaceuticals Inc*⁶⁷.

Con tale pronuncia i giudici statunitensi hanno statuito che, ai fini dell'ammissione del testimone esperto, non fosse più sufficiente accertare la mera rilevanza della conoscenza scientifica rispetto ai fatti da provare secondo il criterio della *general acceptance* della teoria o della metodologia alla base della testimonianza esperta, ma che occorresse qualcosa di più e cioè un vaglio in ordine all'affidabilità e all'accuratezza della metodologia o della teoria sulla quale la testimonianza dell'esperto si basava (il c.d. *relevancy plus-standard*), dettando, a tal fine, una serie di criteri, conosciuti anche come criteri *Daubert*⁶⁸, ripresi in Italia dalla giurisprudenza della Corte di cassazione a far data dal 2011⁶⁹.

⁶⁵[Dominioni, 2005], in particolare pp. 217-218.

⁶⁶Espressione, questa, che definisce il mezzo di prova attraverso cui, nell'ordinamento statunitense, vengono introdotte conoscenze specialistiche nel procedimento penale.

⁶⁷*Daubert v. Merrel Dow Pharmaceuticals Inc.*, 509 U.S. 579 (1993). La letteratura sul punto è assai vasta; si vedano *ex multis*, [Berger, 2000]; [Bernstein & Jackson, 2004]; [Sacks, 2000]; [Vickers, 2005]. A livello italiano si vedano, invece, [Dominioni, 2005] in particolare pp. 137-178; [Gennari, 2022] in particolare pp. 158-172; [Sterlocchi, 2011].

⁶⁸Sul punto vale la pena evidenziare come la sentenza *Daubert* abbia segnato un punto di svolta per l'ammissione della prova scientifica nel sistema statunitense, individuando delle vere e proprie linee guida per l'applicazione della Rule 702 del *Federal Rule of Evidence* – un corpus normativo avente l'obiettivo di regolamentare l'ammissibilità e l'impiego delle prove nell'ambito dei processi avanti le corti federali degli Stati Uniti – in base alle quali, ai fini dell'ammissione dell'*expert witness*, il giudice è chiamato a valutare «*whether the reasoning or methodology underlying the testimony is scientifically valid and of whether that reasoning or methodology properly can be applied to the facts in issue*», aggiungendo che, per valutare la validità scientifica della metodologia il giudice deve verificare: «1) *whether the theory or technique can be (and has been) tested*; 2) *whether the theory or technique has been subjected to peer review and publication*» e, nei casi particolari, anche «*the known or potential rate of error [...] and the existence and maintenance of standards controlling the technique's operation*», e guardando comunque anche alla «*general acceptance*» della metodologia o della teoria alla base dell'*expert witness*. Criteri, questi, che sono poi stati approfonditi dalla giurisprudenza successiva con la c.d. «trilogia *Daubert*» – composta, oltre che dalla già citata sentenza *Daubert*, dalle seguenti pronunce: *General Electric Co. v. Joiner*, 522 U.S. 136, (1997); *Kumho Tire Co., Ltd. v. Carmichael*, 526 U.S. (1999).

⁶⁹Il riferimento è in particolare alla sentenza Cass., sez. IV, sent. 17 settembre 2010 n. 43786, Cozzini,

Tutto ciò premesso, occorre notare come la dottrina maggioritaria muova forti critiche alla tesi sin qui analizzata⁷⁰, evidenziando, in particolare: 1) la difficoltà di distinguere, in concreto, tra prova scientifica “comune” e prova scientifica “nuova”⁷¹; 2) la “forzatura” interpretativa che discende dalla riconduzione entro la formula «prove non disciplinate dalla legge» anche delle prove scientifiche la cui idoneità probatoria sia sconosciuta o comunque non sufficientemente riconosciuta dall’esperienza giudiziaria⁷². Inoltre, alcuni autori mettono in dubbio la stessa opportunità di procedere a uno *screening* preliminare della validità della metodica sottesa alla prova scientifica in un sistema come quello italiano, dove, contrariamente a quanto accade nell’ordinamento processual-penalistico statunitense⁷³, il giudice che decide sull’ammissione della prova è lo stesso giudice tenuto poi alla sua valutazione⁷⁴.

Scendendo più nel dettaglio, i fautori dell’orientamento maggioritario partono dal presupposto che occorra rifuggire alla tentazione di costruire, all’interno della disciplina del procedimento probatorio, un’*enclave* di regole specifiche per le prove scientifiche⁷⁵, dovendosi applicare – anche al cospetto della prova specialistica – le regole generali dettate in materia di prova e, per quanto qui di interesse, in materia di ammissione.

Con specifico riferimento alla distinzione tra prova scientifica “nuova” e prova scientifica “comune”, oltre a sottolineare la difficoltà di comprendere quando, in concreto, ci si trovi al cospetto dell’una o dell’altra categoria, non si manca di notare come l’esigenza di ricorrere a criteri di ammissione rigorosi sia indispensabile ogniqualvolta si intenda introdurre nel processo penale prove che si rifacciano a un metodo scientifico, pena il rischio di consentire l’accesso alla c.d. *junk science*: in questa logica di “profilassi”, distinguere tra prova scientifica nuova e prova scientifica comune potrebbe solo determinare ingiustificate disparità di trattamento, a detrimento della qualità dell’accertamento. Di conseguenza, il vaglio di ammissibilità della

in *CED Cass.*, m. 248943 - 01, con cui la Corte di legittimità ha accolto per la prima volta i criteri *Daubert*, applicandoli, però, alla fase della valutazione (sul punto si veda *infra* Par. 3.3). In argomento la letteratura è assai vasta; sul punto si veda, su tutti [Tonini, 2011]. Sugli sviluppi della giurisprudenza di legittimità successiva in materia, si rimanda invece a [Conti, 2019].

⁷⁰In questo senso si esprimono, tra gli altri, [Rivello, 2014]; [Ubertis, 2019]; [Ubertis, 1995].

⁷¹In argomento si vedano, tra gli altri, [Gennari, 2022], in particolare pp. 177-179; [Rivello, 2014], nello specifico pp. 110-112.

⁷²Sul punto si rimanda in particolare a [Focardi, 2003a]; e [Rivello, 2014], in particolare pp. 112-124.

⁷³La distinzione tra giudice che decide sull’ammissione della prova e giudice dei fatti vale, naturalmente, nei soli casi di processo con giuria, in cui la *petit jury* opera come *trier of fact*, non nei casi di *bench trial*.

⁷⁴Per un approfondimento sul punto si rimanda a [Gennari, 2022], nello specifico pp. 181-187.

⁷⁵[Caianiello, 2022], p. 191, il quale prosegue evidenziando come «proprio i caratteri di pervasività, eterogeneità e incertezza che caratterizzano [...] lo sviluppo delle scienze e della tecnologia, rendono quanto mai attuali i principi tradizionali cui si impronta il processo penale, vale a dire il contraddittorio, da un lato, da attuare tanto al momento della introduzione della prova quanto in quello della sua formazione, e il ragionevole dubbio, dall’altro».

scientific evidence – controversa o meno che sia la metodologia e/o la teoria sulla quale si fonda – deve restare governato sempre (e solo) dalla regola generale dettata dall'art. 190 c.p.p.

In senso adesivo, alcuni autori hanno ulteriormente rimarcato come il giudizio di rilevanza imposto dall'art. 190 c.p.p. presupponga sempre, implicitamente, un accertamento in ordine alla capacità probatoria della prova di cui si chiede l'ammissione: non può infatti dirsi rilevante – e in quanto tale ammissibile – «la prova che, pur avendo ad oggetto il tema del processo, sarebbe concretamente inidonea a produrre alcun risultato probatorio utile»⁷⁶. Ne consegue che il giudizio di rilevanza prescritto dall'art. 190 c.p.p. ben può essere effettuato alla stregua dei criteri *Daubert*, così come recepiti a livello nazionale: risulterà così irrilevante «quella prova che non risponda ai criteri richiesti dalla giurisprudenza più evoluta in materia di prova scientifica (criteri *Daubert-Cozzini*, e i relativi sviluppi successivi)»⁷⁷.

3.1.2 CRITERI DI AMMISSIONE DELLA PROVA TECNICO-SCIENTIFICA E METROLOGIA FORENSE

Ciò premesso in ordine alle posizioni espresse dalla dottrina italiana in relazione al giudizio di ammissibilità della prova scientifica, occorre ora soffermarsi sui possibili apporti della metrologia rispetto a tale fase del procedimento probatorio.

Sul punto, merita rimarcare sin da ora come le considerazioni di seguito esposte sul possibile ruolo che la metrologia forense potrebbe (e dovrebbe) assumere in sede di ammissione dell'evidenza scientifica (e successivamente, nella scelta degli esperti da nominare e nella formulazione dei quesiti peritali), abbiano valore e utilità a prescindere da quale, tra le impostazioni dottrinali poc'anzi prospettate, si preferisca e, dunque, indipendentemente dal fatto che si decida di ricondurre il giudizio di ammissibilità della prova scientifica entro le maglie degli artt. 189 e 190 c.p.p. o, piuttosto, entro quelle del solo art. 190 c.p.p. Come si è già avuto modo di evidenziare, infatti, entrambe le tesi concordano sull'opportunità di sottoporre a un vaglio di ammissibilità rigoroso le prove che si fondano su metodologie o teorie tecnico-scientifiche, riconoscendo ambedue la necessità di indagare l'idoneità probatoria della prova specialistica sulla base di specifici criteri.

Con specifico riferimento ai criteri individuati dalla giurisprudenza d'oltreoceano per decidere in ordine all'ammissione della testimonianza esperta si è già rilevato che, a partire dalla sentenza *Daubert*, ai giudici statunitensi è richiesto di indagare, da un lato, la validità della metodologia o della teoria alla base della testimonianza dell'*expert witness* e, dall'altro, la possibilità di una concreta e corretta applicazione della stessa al caso di specie.

⁷⁶Così [Gennari, 2022], p. 180. Nello stesso senso [Caianiello, 2022], p. 194; [Ubertis, 2007].

⁷⁷[Caianiello, 2022], p. 194.

A partire dal 2016 e, più precisamente, dalla pubblicazione del report *Forensic Science in Criminal Courts: Ensuring Scientific Validity of Feature-Comparison Methods*⁷⁸, a cura del *President Council of Advisors on Science and Technology* ([PCAST, 2016]) nominato dal quarantaquattresimo Presidente degli Stati Uniti, Barack Obama, i due parametri di valutazione individuati dalla sentenza Daubert sono identificati, rispettivamente, con le espressioni “foundational validity” (validità fondazionale) e “validity as applied” (validità in campo)⁷⁹.

Come già osservato nel capitolo precedente, si tratta di due distinte tipologie di validità scientifica che il magistrato è tenuto a prendere in considerazione ai fini dell’ammissione della *scientific evidence*. La prima (*foundational validity*) richiede che, sulla base di studi empirici, sia dimostrata la ripetibilità, riproducibilità e accuratezza di una determinata metodologia forense, a livelli che siano stati misurati e che risultino appropriati per l’applicazione prevista. La seconda (*validity as applied*) si riferisce, invece, alle applicazioni del metodo alle circostanze del caso concreto, e richiede che dette applicazioni vengano effettuate secondo procedure idonee a garantirne l’affidabilità, sotto la supervisione di un esperto dotato di competenze specifiche e di sufficiente esperienza⁸⁰.

In altri termini, la *foundational validity* si riferisce alla validità intrinseca del metodo scientifico utilizzato e richiede di verificare se la metodologia o la tecnica siano teoricamente idonee a fornire risultati affidabili in quanto fondate su principi scientifici consolidati e sperimentalmente verificati; la *validity as applied* riguarda, invece, l’adeguatezza dell’applicazione di quel metodo scientifico nel singolo caso.

Oltre a definire tali parametri, il PCAST report ha fornito altresì una serie di indicazioni per la verifica degli stessi, chiarendo che per l’accertamento della validità fondazionale, occorre che la metodica sia stata sottoposta a test empirici da parte di più gruppi di ricerca e che tali test abbiano: a) dimostrato la ripetibilità e la riproducibilità del metodo; b) fornito stime in ordine all’accuratezza del metodo (ossia la frequenza con cui perviene ad una conclusione errata) e circa la sua adeguatezza rispetto all’uso che se ne intenda fare. Per la verifica della validità in campo, il PCAST report [PCAST, 2016] esige invece, in primo luogo, la dimostrazione, da parte dell’esperto forense, della propria capacità di applicare la metodica in modo affidabile, e poi, di averlo concretamente fatto; in secondo luogo, si richiede che le affermazio-

⁷⁸*Report to the President “Forensic Science in Criminal Courts: Ensuring Scientific Validity of Feature-Comparison Methods”, Executive Office of the President, President’s Council of Advisors on Science and Technology, Washington D.C., 2016, liberamente accessibile all’indirizzo: https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/PCAST/pcast_forensic_science_report_final.pdf.*

⁷⁹Sull’incarico assegnato al *President Council of Advisors on Science and Technology* dal Presidente Obama e sul report che ne è conseguito si rimanda a [Pressacco, 2025].

⁸⁰Sui concetti di “foundational validity” e “validity as applied” si veda anche [Ferrero & Scotti, 2023].

ni del professionista sul valore probatorio degli elementi riscontrati siano espresse in modo scientificamente valido.

La capacità di applicare in modo affidabile un certo metodo scientifico può essere dimostrata, come anticipato, solo attraverso test empirici in grado di misurare la frequenza con cui l'operatore addiviene ad una risposta corretta. Per determinare se un professionista abbia effettivamente applicato il metodo in modo affidabile è invece necessario che le procedure impiegate, i risultati ottenuti e le note di laboratorio siano rese disponibili per la revisione delle operazioni da parte di soggetti terzi. Quanto alle affermazioni dell'esperto in merito al valore probatorio degli elementi riscontrati occorre che il medesimo indichi il tasso complessivo di falsi positivi e la sensibilità del metodo, ricavati dagli studi sulla validità fondazionale, provando altresì che i campioni utilizzati nei test empirici sono rilevanti rispetto alle condizioni presenti nel caso di specie.

Ebbene, è in tale contesto che entra in gioco la metrologia forense. In quanto scienza delle misure, la metrologia permette di misurare, esprimendola in termini quantitativi, la validità della metodologia e/o della teoria alla base della prova scientifica, sia in linea di principio (validità fondazionale) sia in concreto (validità in campo).

La metrologia forense fornisce cioè un criterio tecnico-normativo di validazione generale del metodo scientifico, attraverso cui il giudice può decidere se dare o meno ingresso nel processo alla prova specialistica di cui le parti richiedono l'ammissione.

Più nello specifico, utilizzando i parametri metrologici illustrati nel precedente Cap. 2 – quali, in particolare, l'incertezza di definizione⁸¹, la ripetibilità della misura⁸², la riproducibilità di misura⁸³ – è possibile quantificare l'affidabilità del metodo e quindi la capacità dello stesso di fornire risultati ripetibili, riproducibili e accurati. Al contempo, conoscere – attraverso le opportune operazioni di taratura⁸⁴ – l'incertezza strumentale che quantifica, come ormai noto, la componente di incertezza derivante dallo strumento di misura e dal sistema di misurazione che si intende impiegare⁸⁵, così come avere a disposizione la documentazione relativa agli *audit* di accreditamento del laboratorio nel quale dovrebbero essere effettuate le analisi o, più in generale, eseguite le operazioni peritali⁸⁶, consente di stimare la *validity as applied* del metodo alla base della prova scientifica⁸⁷.

⁸¹VIM art. 2.27. Si rimanda a quanto osservato in argomento nel precedente Cap. 2

⁸²VIM art. 2.21. Sul punto si rimanda a quanto osservato in [Ferrero & Scotti, 2023] pp. 75 e 76.

⁸³VIM art. 2.25. In argomento si rimanda a [Ferrero & Scotti, 2023] pp. 76 e 77.

⁸⁴In argomento si veda il precedente Cap. 2, al Par. 2.3.1.

⁸⁵VIM 4.24. Si rimanda a quanto osservato in argomento nel precedente Cap. 2

⁸⁶Sul punto si veda il successivo Par. 3.2.

⁸⁷L'esatta quantificazione della validità di campo potrà, infatti, essere misurata solo successivamente all'assunzione della prova, quando (e se) la metodologia sarà concretamente applicata, al caso concreto, dal perito o consulente tecnico individuato.

In estrema sintesi – e per concludere – la conoscenza dei suddetti parametri metrologici permette al giudice di quantificare sia la validità in astratto della metodologia e/o della teoria su cui si fonda la prova scientifica, sia le possibilità di una sua concreta e corretta applicazione al caso di specie, consentendogli così di decidere – sulla base di criteri oggettivi e misurabili – in ordine all’ammissibilità della stessa.

Ogniqualvolta le parti presentino istanza di ammissione di una prova tecnico-scientifica dovrebbero quindi fornire al magistrato l’indicazione dei suindicati parametri metrologici, così da assicurare all’organo giurisdizionale tutte le informazioni necessarie a valutare la validità scientifica della metodologie e/o della teoria alla base dell’evidenza specialistica e a decidere in ordine all’ammissione della prova.

3.1.3 CULTURA METROLOGICA, NOMINA DELL’“ESPERTO” E FORMULAZIONE DEL QUESITO PERITALE

Come si avrà modo di chiarire nei successivi Par. 3.2 e 3.3, il ricorso alla cultura e ai principi della metrologia forense è essenziale anche nelle successive fasi del procedimento probatorio, cioè nell’assunzione e nella valutazione della prova. Ciò comporta che la metrologia rivesta un ruolo fondamentale anche nelle attività preliminari a tali fasi, quali la scelta e la nomina degli esperti (perito e/o consulenti tecnici) nonché, e soprattutto, la formulazione del quesito peritale.

Sotto il primo profilo occorre evidenziare che, per garantire un’assunzione metrologicamente corretta della prova⁸⁸ e assicurare al giudice la conoscenza di tutte le informazioni necessarie per la valutazione della stessa⁸⁹, è indispensabile che il professionista nominato conosca e sappia applicare i principi della metrologia. Occorre cioè che l’esperto effettui i rilievi, i confronti, le analisi e, in generale, tutte le operazioni peritali secondo gli insegnamenti della metrologia forense, così come illustrati nel precedente Cap. 2: in breve calcolando, valutando e spiegando correttamente al giudice il livello di dubbio associato a ogni singolo risultato ottenuto.

Per raggiungere questo obiettivo, è auspicabile che il possesso (attestato e comprovato) di una formazione adeguata in ambito metrologico venga annoverato tra i criteri per l’iscrizione all’albo dei periti e dei consulenti tecnici. Pare inoltre opportuno che il giudice e le parti private – ciascuno per quanto di propria competenza – prendano in considerazione tali competenze quando nominano, rispettivamente, i periti e i consulenti.

⁸⁸Sul punto si rimanda al successivo Par. 3.2.

⁸⁹In argomento si veda il successivo Par. 3.3.

Rispetto ai tecnici/professionisti già iscritti agli albi, potrebbe inoltre essere utile prevedere, ai fini della permanenza nell'elenco dei consulenti e dei periti, la frequenza di corsi di formazione *ad hoc* in materia di metrologia forense, all'esito dei quali sottoporre gli esperti ad opportuni test di valutazione.

Quanto alla formulazione del quesito peritale – poiché la conoscenza di parametri quali l'incertezza di definizione e l'incertezza strumentale risulta indispensabile, come si vedrà, non solo ai fini dell'ammissione della prova scientifica, ma anche per la sua valutazione – sembra di fondamentale importanza che all'atto di formulazione del quesito il giudice richieda all'esperto di misurare, indicare e spiegare i livelli di incertezza delle misurazioni effettuate.

Alla luce di quanto esposto, e per concludere, è evidente come una corretta formazione metrologica risulti cruciale non solo per gli esperti ma anche per gli operatori del diritto. Una solida cultura metrologica è infatti essenziale – sia per la pubblica accusa sia per le parti private – per fornire al giudice le informazioni necessarie in merito alla validità scientifica della metodologia e/o della teoria alla base della prova tecnico-scientifica che intendono far ammettere, così come è essenziale per il magistrato giudicante per decidere se ammetterla o meno nel processo. Allo stesso modo, la conoscenza dei principi metrologici è necessaria al giudice e alle parti per la scelta degli esperti e per la formulazione del quesito peritale.

3.2 L'ACQUISIZIONE DELLA PROVA TECNICO-SCIENTIFICA⁹⁰

3.2.1 L'APPROCCIO METROLOGICO NELLA PERIZIA E NELLA CONSULENZA TECNICA

La seconda fase del procedimento probatorio è costituita dall'acquisizione della prova. Nell'ambito della prova tecnico-scientifica, gli attori principali di tale fase sono rappresentati dal perito e dal consulente tecnico. Tali soggetti assumono un ruolo di particolare rilevanza nei procedimenti penali, poiché i temi di indagine presentano spesso profili sofisticati o di alta specializzazione che richiedono accertamenti di particolare complessità.

«Concluse le formalità di conferimento dell'incarico» esaminate precedentemente, «il perito procede», infatti, «ai necessari accertamenti e risponde ai quesiti con parere raccolto nel verbale» (art. 227 comma 1 c.p.p.), che dietro autorizzazione del giudice può venire trasfuso in una relazione qualora si ritenga indispensabile illustrarlo con note scritte (art. 227 comma 5 c.p.p.), spesso necessarie per determinate materie, non affrontabili senza un supporto documentale.

⁹⁰Il Par. 3.2 è a cura di Riccardo Roscini-Vitali.

L'importanza dell'impiego dell'approccio metrologico nel compimento delle «operazioni necessarie per rispondere ai quesiti» (art. 228 comma 1 primo periodo c.p.p.) viene eminentemente in rilievo se solo si considera il mandato specifico cui il perito, «consapevole della responsabilità morale e giuridica che assum[e] nello svolgimento dell'incarico», si impegna con dichiarazione resa dinanzi al giudice⁹¹: «adempiere al [suo] ufficio senza altro scopo che quello di far conoscere la verità» (art. 226 comma 1 c.p.p.). Si tratta di un impegno di non poco momento, tant'è che l'ordinamento prevede che il perito possa essere sostituito dal giudice con ordinanza «se svolge negligenemente l'incarico affidatogli» (art. 231 comma 1 c.p.p.)⁹² e finanche punito con la reclusione da due a sei anni, oltretutto con l'interdizione dai pubblici uffici e dalla professione o dall'arte, se «afferma fatti non conformi al vero» (art. 373 c.p.)⁹³.

Ebbene, poiché uno dei pilastri portanti della cultura metrologica è, come visto nel Cap. 2, il concetto di incertezza di misura – e la conseguente necessità di esprimerla fornendo una «stima di quanto incompleta sia l'informazione prodotta»⁹⁴ – l'approccio metrologico può senz'altro aiutare il perito ad assolvere diligentemente al proprio mandato di fare conoscere la verità al giudice: se l'evidenza scientifica aspira fisiologicamente a costituire un'informazione il più completa possibile, essa, infatti, non può che ricomprendere anche i suoi margini di incompletezza.

È importante evidenziare che l'approccio metrologico dovrebbe essere alla base dell'attività non solo del perito, ma anche dei suoi ausiliari e dei consulenti tecnici. Infatti, gli stessi sono, nell'ottica del legislatore, parimenti chiamati a concorrere, ciascuno con il proprio contributo, al perseguimento dell'obiettivo comune di fare conoscere al giudice la verità nell'accezione anzidetta. Lo stesso dovrebbe dirsi, inoltre, per la polizia scientifica, che, pur non agendo come perito o consulente tecnico in senso stretto, ha un ruolo cruciale nelle indagini sulla scena del

⁹¹L'omessa dichiarazione di impegno si traduce, secondo E. Fortuna e S. Dragone, *Le prove*, in [Fortuna et al., 2007], p. 378, in una mera irregolarità, attesa la mancata previsione da parte del legislatore della nullità derivante dall'art. 142 comma 3 c.p.p. del 1930, o, secondo [Mendoza et al., 1994], p. 68, in una nullità relativa, atteso che l'art. 501 comma 1 c.p.p., estendendo all'esame dei periti e dei consulenti tecnici «le disposizioni sull'esame dei testimoni», richiamerebbe anche la previsione di nullità di cui all'art. 497 comma 3 c.p.p. nell'ipotesi in cui il testimone non renda omologa dichiarazione di impegno a dire la verità.

⁹²Sul tema v.: [Consolo, 1990], p. 4; M. Musso, *Sub art. 231*, in [Chiavario, 2003], p. 632; [Salvinelli, 1991], p. 395.

⁹³Anche se – vale la pena precisarlo – «il reato di falsa perizia sussiste, nel contesto di accertamenti valutativi, in presenza di un enunciato mendace riconducibile, [...] sotto il profilo soggettivo, ad una divergenza intenzionale tra il convincimento reale del consulente o del perito e quello manifestato nell'elaborato tecnico» (Cass. pen., sez. VI, sent. 26 febbraio 2016, n. 12654). In senso conforme, v.: Cass. pen., sez. VI, sent. 11 novembre 2015, n. 48915; Cass. pen., sez. VI, sent. 11 giugno 2015, n. 38307; Cass. pen., sez. VI, sent. 4 giugno 2015, n. 36654. Sulla falsa perizia o interpretazione di cui all'art. 373 c.p., v., in letteratura: [Giunta, 2020]; [Kostoris, 2020]; [Spangher, 2020], p. 2777; [Taormina, 2007], p. 360.

⁹⁴[Ferrero & Scotti, 2023], p. 68.

crimine (primaria o secondaria) e nell'eventuale dibattimento come testimone qualificato o esperto⁹⁵.

Con riguardo ai primi, è utile ricordare che «il perito può essere [...] autorizzato [...] a servirsi di ausiliari di sua fiducia». Ancorché la previa autorizzazione del giudice possa riguardare il solo «svolgimento di attività materiali non implicanti apprezzamenti e valutazioni» (art. 228 comma 2 c.p.p.), il perito può delegare ai propri ausiliari attività tecnico-scientifiche, quali la rilevazione ed elaborazione di dati, comunque in grado di produrre incertezza di misura. La giurisprudenza di legittimità ha infatti stabilito che il perito, «una volta autorizzato» – per esempio – «ad avvalersi di un istituto privato per eseguire analisi di laboratorio» – aventi a oggetto, nella fattispecie, l'estrazione del DNA da alcuni reperti e la comparazione tra i polimorfismi ricavati dai campioni –, «non è obbligato a recarsi personalmente presso il laboratorio ed eseguire personalmente le analisi», «ben potendo farle eseguire dal responsabile, salvo poi effettuare personalmente gli apprezzamenti e le valutazioni richieste dall'incarico»⁹⁶. È quindi opportuno che anche gli ausiliari del perito adottino un adeguato approccio metrologico nell'esecuzione delle attività loro delegate; parimenti, è necessario che il giudice e le parti vigilino affinché al coadiutore non vengano assegnate valutazioni autonome, esorbitanti la delega autorizzata, le quali renderebbero la perizia affetta da invalidità, nelle forme – a seconda dell'orientamento dottrinale – della nullità assoluta⁹⁷, dell'inutilizzabilità⁹⁸ o dell'inesistenza⁹⁹.

Con riguardo, invece, ai secondi (i consulenti tecnici), va rimarcato che al fine di assicurare un pieno ed effettivo contraddittorio anche in ambito scientifico, al consulente sono riconosciuti, oltre al diritto di conoscere tutti gli atti del procedimento penale messi a disposizione del perito¹⁰⁰, importanti diritti partecipativi: i consulenti tecnici «possono [infatti] partecipare alle operazioni peritali, proponendo al perito specifiche indagini» (attività propulsiva) «e formulando osservazioni e riserve» (attività deduttiva)¹⁰¹, «delle quali deve darsi atto nella relazione» (art. 230 comma 2 c.p.p.) ai fini della valutazione della prova da parte del giudice¹⁰². È intuitivo come la cultura metrologica possa (e debba) avere un ruolo importante non solo all'interno dell'attività deduttiva, in merito alla correttezza o meno dell'approccio metro-

⁹⁵V. Cass. pen., sez. III, sent. 22 maggio 2003, n. 24882.

⁹⁶Cass. pen., sez. I, sent. 23 giugno 2005, n. 32925. Analogamente, v., per gli accertamenti radiografici, Cass. pen., sez. IV, sent. 21 febbraio 1983 e, per l'elettroencefalogramma, Cass. pen., sez. I, sent. 23 aprile 1971.

⁹⁷In tale senso, v. [Mendoza et al., 1994], p. 86.

⁹⁸In tale senso, v. M. Musso, Sub art. 228, in [Chiavario, 2003], p. 623.

⁹⁹In tale senso, v. [Taormina, 1972], p. 405 e [Perchinunno, 1968], p. 325.

¹⁰⁰La dottrina è, infatti, concorde nel ritenere che non esistano aree di conoscibilità da cui il consulente tecnico possa essere escluso ([Dean, 1992], p. 514; [Frigo, 1988], p. 2184).

¹⁰¹Per la distinzione tra attività propulsiva e attività deduttiva, v. [Kostoris, 1993], p. 67.

¹⁰²[Conte & Loforte, 2006], p. 97.

logico impiegato dal perito, ma anche nel contesto della c.d. “attività propulsiva”. «Nell’ambito della stessa perizia i quesiti possono [infatti] essere ampliati anche con carattere di novità in direzione di un più puntuale ed efficace esito dell’accertamento in una più completa visione di insieme»¹⁰³. Il consulente tecnico potrebbe quindi chiedere un’estensione del quesito per ricompredervi gli aspetti fondamentali della metrologia forense trattati nel Cap. 2 – in particolare la necessità di accertare (ed esplicitare) la c.d. incertezza di misura, nonché quella di applicarne anche gli altri principi fondamentali (*i.e.* la taratura e la riferibilità metrologica, ovvero la catena ininterrotta delle tarature). Nel caso in cui il perito ritenga di non eseguire le specifiche indagini metrologiche richieste dal consulente tecnico, quest’ultimo avrebbe peraltro la possibilità di rivolgersi direttamente al giudice per ottenere una decisione ai sensi dell’art. 228 comma 4 c.p.p., a norma del quale, «quando [...] sorgono questioni relative ai poteri del perito e ai limiti dell’incarico, la decisione è rimessa al giudice». Nulla vieta, poi, che le valutazioni metrologiche condotte dal consulente tecnico confluiscono in una sua relazione scritta, acquisibile dal giudice in dibattimento, anche d’ufficio, dopo l’esame ai sensi dell’art. 501 c.p.p. o esibibile nei casi di intervento incidentale del g.i.p. o in udienza preliminare e, sicuramente, ai fini della decisione¹⁰⁴. Il giudice d’ufficio e le parti su richiesta possono, infine, precisare i temi della metrologia forense afferenti alla prova tecnico-scientifica acquisita al momento dell’esame del perito¹⁰⁵.

Attesa l’identità di oggetto tra perizia e consulenza tecnica¹⁰⁶ – consistendo anche quest’ultima nello svolgimento di attività di indagine, nell’acquisizione di dati materiali e nel com-

¹⁰³Cass. pen., sez. I, 23 gennaio 1995, n. 3352, la quale desume normativamente detto principio «dal combinato disposto degli art. 501, comma 1, e 489, comma 3, c.p.p., osservandosi per l’esame del perito, in quanto applicabili, le disposizioni sull’esame dei testimoni ed essendo previsto che colui che ne ha chiesto l’audizione possa “proporre nuove domande”, ne deriva la possibilità di proporre, per analogia, “quesiti nuovi” in corso di perizia, una volta salvaguardato il contraddittorio anche tecnico, garantito dal comma 2 dell’art. 226 c.p.p. alle parti che a tanto vogliono far ricorso».

¹⁰⁴In tale senso, v. Cass. pen., sez. IV, sent. 3 febbraio 2004, n. 14863 e Cass. pen., sez. I, sent. 17 marzo 1999, n. 7252. Sul tema, cfr. [Gianniti, 2005], p. 206.

¹⁰⁵Nel cui corso il contenuto della relazione peritale può essere utilizzato ai fini delle contestazioni, secondo D. Siracusano, *Le prove*, in [Siracusano et al., 1990], p. 392. *Contra*, v. G. Varraso, *La prova tecnica*, in [Spangher, 2008], p. 280, secondo il quale non potrebbe parlarsi di contestazioni in senso tecnico trattandosi di esame che affronta tematiche tecniche. La lettura della relazione peritale in assenza del preventivo esame del perito integra, peraltro, una nullità a regime intermedio *ex* artt. 178 comma 1 lett. *b* e *c* e 180 c.p.p. determinata, secondo Cass. pen., sez. VI, 10 giugno 1998, n. 12975, dalla lesione del diritto di partecipazione del pubblico ministero o, secondo Cass. pen., sez. I, sent. 19 marzo 2004, n. 20927, del diritto di intervento delle parti private (in senso conforme, v.: Cass. pen., sez. V, sent. 7 febbraio 2003; Cass. pen., sez. V, sent. 10 novembre 1995, n. 12591; Cass. pen., sez. I, sent. 19 giugno 1995, n. 8300), una nullità relativa (Cass. pen., sez. III, sent. 22 aprile 1999, n. 8497), un’inutilizzabilità a fronte della violazione dell’art. 511 comma 3 c.p.p. (Cass. pen., sez. I, sent. 6 febbraio 1997, n. 2670; Cass. pen., sez. III, sent. 13 marzo 1996, n. 3593) o una mera irregolarità (con specifico riguardo al caso dell’incidente probatorio, v. Cass. pen., sez. IV, sent. 3 ottobre 2006, n. 36613; Cass. pen., sez. VI, sent. 24 maggio 1996, n. 6359; Cass. pen., sez. II, sent. 10 febbraio 1994, n. 4273).

¹⁰⁶In tale senso, v.: [Adorno, 1997], p. 2151; [Cossignani, 1997], p. 335; [Vicoli, 2000], p. 577.

pimento di operazioni sperimentali che possono costituire fonte di incertezza di misura – e atteso il pieno valore probatorio che la consulenza tecnica può assumere¹⁰⁷, si ritiene che un corretto approccio metrologico debba essere alla base anche della c.d. consulenza tecnica extraperitale, ossia la consulenza espletabile da tecnici nominati dalle parti¹⁰⁸ «quando», appunto, «non è stata disposta perizia» (art. 233 c.p.p.). Non a caso, il codice di rito prevede che l'autorità giudiziaria possa impartire al consulente tecnico «le prescrizioni necessarie per la conservazione dello stato originario delle cose e dei luoghi» (art. 233 comma 1-ter c.p.p.). Evidentemente, anche in tale contesto potrebbero (e dovrebbero) trovare spazio indicazioni di metodo riconducibili alla cultura metrologica.

A conclusioni analoghe può giungersi con riguardo al pubblico ministero e ai consulenti che lo stesso può nominare «quando procede ad accertamenti, rilievi segnaletici, descrittivi o fotografici e ad ogni altra operazione tecnica per cui sono necessarie specifiche competenze» (art. 359 comma 1 c.p.p.), che devono essere rendicontate all'interno del verbale delle operazioni compiute. Come sopra anticipato, lo stesso dovrebbe dirsi, infine, con riguardo alla polizia giudiziaria e alle persone idonee delle quali la stessa può avvalersi quando «compie atti od operazioni che richiedono specifiche competenze tecniche» (art. 348 comma 4 c.p.p.).

Nel primo caso (consulenti della pubblica accusa), l'approccio metrologico può infatti aiutare il pubblico ministero e i suoi consulenti a valutare se e in quale misura l'accertamento tecnico – avente, per esempio, a oggetto l'individuazione e il rilevamento delle impronte dattiloscopico-papillari¹⁰⁹, la comparazione di impronte digitali prelevate sul luogo del delitto con quelle di cui la polizia giudiziaria sia già in possesso¹¹⁰ oppure l'accertamento della natura biologica di una traccia rilevata sull'arma del delitto o su cose pertinenti al reato – sia ripetibile, in quanto volto a una «semplice descrizione oggettiva e statica di una cosa»¹¹¹, o non ripeti-

¹⁰⁷Secondo Corte cost., sent. 19 febbraio 1999, n. 33, «il giudice [...] può legittimamente desumer[n]e elementi di prova».

¹⁰⁸Ossia dalla persona offesa ([Focardi, 2003b], p. 44; *contra*, v. G. Spangher, *I profili soggettivi*, in [Aa.Vv., 2001], p. 157), dagli enti esponenziali ([Aprile & Silvestri, 2002], p. 39; [Aa.Vv., 2001], p. 91; in termini critici, v. [Spangher, 2020], *ibid.*) e dal danneggiato dal reato ([Aa.Vv., 2001], p. 28; *contra*, v. [Gualtrieri, 2002], p. 83).

¹⁰⁹Secondo Cass. pen., sez. II, sent. 5 giugno 2003, n. 27311, «l'attività di individuazione e rilevamento delle impronte dattiloscopico-papillari, risolvendosi in operazioni urgenti non ripetibili di natura meramente materiale, rientra nella disciplina di cui all'art. 354, comma 2, c.p.p. e non in quella concernente gli accertamenti tecnici non ripetibili di cui agli artt. 359 e 360 c.p.p., i quali presuppongono attività di carattere valutativo su base tecnico-scientifica ed impongono il rispetto del contraddittorio e delle correlate garanzie difensive». In senso conforme, v. Cass. pen., sez. III, sent. 27 ottobre 1998, n. 5779.

¹¹⁰Secondo Cass. pen., sez. V, sent. 17 marzo 2004, n. 23319, «la comparazione delle impronte digitali prelevate con quelle già in possesso della polizia giudiziaria non richiede particolari cognizioni tecnico-scientifiche, risolvendosi in un mero accertamento di dati obiettivi ai sensi dell'art. 354 c.p.p., il cui svolgimento non postula il rispetto delle formalità prescritte dall'art. 360 c.p.p.».

¹¹¹Cass. pen., sez. IV, sent. 14 aprile 2004, n. 24078.

bile, in quanto avente «ad oggetto persone, cose, luoghi, soggetti a modificazioni in modo da far loro perdere in tempi brevi ogni valenza probatoria in relazione ai fatti oggetto di indagini e di eventuale futuro giudizio»¹¹². Valutazione, questa, di non poco momento, giacché per i soli accertamenti tecnici non ripetibili valgono, a pena di inutilizzabilità, le garanzie difensive dettate nell'art. 360 c.p.p.¹¹³.

Nel secondo caso (polizia giudiziaria, polizia scientifica e rispettivi esperti), invece, va considerato che le informazioni raccolte da tali soggetti rappresentano assai frequentemente il patrimonio informativo di base per le successive attività peritali e/o dei consulenti tecnici. Nel normale corso di un'indagine penale, la polizia giudiziaria e gli esperti di cui essa può avvalersi sono infatti i primi soggetti, anche in ordine di tempo, ad avere il compito di «raccolg[re] [...] ogni elemento utile alla ricostruzione del fatto e alla individuazione del colpevole» (art. 348 comma 1 c.p.p.), «procede[ndo], fra l'altro», «alla ricerca delle cose e delle tracce pertinenti al reato nonché alla conservazione di esse e dello stato dei luoghi» (art. 348 comma 2 lett. a c.p.p.). Ne consegue che l'operato e le valutazioni dei periti e consulenti tecnici possono risultare fortemente condizionate dall'analisi della scena del crimine effettuata in precedenza dagli inquirenti. Si pensi, per esempio, al caso dell'individuazione e repertazione di materiale biologico o di cose pertinenti al reato: un'errata raccolta e repertazione può impedire di ottenere risultati che invece si potrebbero ottenere con un'attività svolta in modo metodologicamente (e metrologicamente) ortodosso¹¹⁴.

Alla luce di quanto poc'anzi esposto, e per concludere, non v'è dubbio che l'approccio metrologico sia portatore di un valore aggiunto nella fase di acquisizione della prova, favorendo lo svolgimento diligente delle attività di acquisizione delle evidenze scientifiche.

Esso infatti consente ai soggetti a vario titolo coinvolti nel procedimento penale¹¹⁵ di con-

¹¹²Cass. pen., sez. VI, sent. 18 novembre 1992.

¹¹³In tale senso, v. Cass. pen., sez. III, sent. 23 novembre 2004, n. 5460, ad avviso della quale, «in tema di accertamenti tecnici fatti eseguire dal pubblico ministero, le garanzie difensive dettate, a pena di inutilizzabilità, dall'articolo 360 del c.p.p. riguardano solo gli accertamenti tecnici "non ripetibili", mentre per quelli ripetibili nessun avviso il pubblico ministero è tenuto a dare all'indagato e al suo difensore».

¹¹⁴Con riguardo alla raccolta del reperto, nel caso, per esempio, dell'omicidio di Meredith Kercher pare che l'operatore abbia raccolto e riposto il gancetto del reggiseno della vittima nell'apposita busta con la mano ricoperta di un guanto invece che con una pinzetta, come richiesto dalle *best practices* per evitare possibili contaminazioni.

¹¹⁵Nell'ordine logico-cronologico ideale di intervento si tratta dei seguenti soggetti:

- la polizia giudiziaria e le persone idonee delle quali la stessa si avvalga, «quando comp[ono] atti od operazioni» (art. 348 comma 4 c.p.p.) funzionali a «raccolg[re] [...] ogni elemento utile alla ricostruzione del fatto e alla individuazione del colpevole» (art. 348 comma 1 c.p.p.), «alla ricerca delle cose e delle tracce pertinenti al reato nonché alla conservazione di esse e dello stato dei luoghi» (art. 348 comma 2 lett. a c.p.p.);
- il pubblico ministero e i consulenti dallo stesso nominati, «quando proced[ono] ad accertamenti, rilievi segnaletici, descrittivi o fotografici e ad ogni altra operazione tecnica» (art. 359 comma 1 c.p.p.);
- il perito nominato dal giudice, quando «procede ai necessari accertamenti e risponde ai quesiti», e gli ausiliari di cui lo stesso si serve, quando «svolg[ono] [...] attività materiali non implicanti apprezzamenti e valutazioni» (art. 228 comma 2 c.p.p.);

correre attivamente allo scopo precipuo di «far conoscere la verità» (art. 226 comma 1 c.p.p.) quantificando il grado di incompletezza delle informazioni fornite, in vista della successiva valutazione probatoria rimessa all'organo giudicante.

Se così è, la conseguenza diretta di questa conclusione è che i principi di metrologia forense trattati nel Cap. 2¹¹⁶ non solo dovrebbero essere applicati a tutte le attività connesse all'acquisizione della prova tecnico-scientifica, ma la loro applicazione dovrebbe poi essere esplicitata anche nella relativa documentazione di output, e precisamente:

- nel verbale delle operazioni compiute dalla polizia giudiziaria e dalle persone idonee delle quali la stessa si avvalga (art. 357 comma 1 c.p.p.);
- nel verbale in cui viene raccolto il parere del perito (art. 227 comma 1 c.p.p.);
- nella relazione peritale autorizzata dal giudice (art. 227 comma 5 c.p.p.);
- nella relazione scritta elaborata dal consulente nell'ambito della consulenza tecnica sia peritale sia extraperitale.

3.3 LA VALUTAZIONE DELLA PROVA¹¹⁷

3.3.1 VALUTAZIONE DELLA PROVA, DECISIONE E MOTIVAZIONE NEL PROCESSO PENALE

Il momento della valutazione della prova costituisce lo stadio finale del procedimento probatorio. Il suo raggiungimento, dunque, presuppone che abbiano già avuto luogo le fasi dell'ammissione e dell'assunzione della prova¹¹⁸.

Ciò implica, in primo luogo, che siano state effettuate le valutazioni concernenti la rilevanza, la pertinenza e l'idoneità epistemologica del mezzo di prova richiesto e, secondariamente, che siano state compiute le operazioni necessarie per introdurre la prova medesima (*rectius*: gli elementi di prova ricavabili dalla fonte corrispondente, sia essa personale o reale) all'interno del processo, secondo le forme previste dalla legge (nel caso di prova tipica) oppure

- i consulenti tecnici, quando «partecipa[no] alle operazioni peritali, propon[gono] al perito specifiche indagini e formulano[no] osservazioni e riserve» (art. 230 comma 2 c.p.p.).

¹¹⁶Secondo cui è opportuno che l'operatore: (i) descriva l'attività del misurare, identificando il misurando, il sistema di misura e il contesto di misura; (ii) consideri le interazioni tra misurando, sistema di misura e contesto di misura secondo un modello matematico deterministico o probabilistico; (iii) dia conto dell'intervenuta osservanza dei processi sperimentali; (iv) quantifichi l'incertezza di misura; (v) validi detta incertezza mediante la taratura; (vi) impieghi sistemi di misura tarati da laboratori accreditati.

¹¹⁷Il Par. 3.3 è a cura di Luca Pressacco.

¹¹⁸Sulle quali v. i Par. 3.1. e 3.2.

stabilite dal giudice nel contraddittorio tra le parti (nel caso di prova atipica, ai sensi dell'art. 189 c.p.p.).

Per quanto interessa in questa sede, giova ancora precisare che la valutazione della prova si realizza istituzionalmente in due momenti processuali differenti, sebbene questi ultimi siano logicamente e dialetticamente connessi, così che non risulta possibile individuare una vera e propria cesura tra essi. La prova deve essere valutata, innanzi tutto, al momento della deliberazione della sentenza, quando il giudice (ovvero i giudici, qualora si tratti di un organo collegiale) si ritira in camera di consiglio e assume la decisione. Tuttavia, la pronuncia del dispositivo nella pubblica udienza non esaurisce i compiti del giudice, il quale è chiamato in seguito ad esprimere il proprio ragionamento (anche) probatorio attraverso la redazione della motivazione del provvedimento giurisdizionale.

Si tratta di un adempimento particolarmente significativo, in particolare nell'ambito di un ordinamento giuridico – come quello italiano – in cui l'obbligo di motivazione è dotato di un solido fondamento costituzionale (art. 111 comma 6 Cost.). A testimonianza di ciò, è possibile citare le disposizioni del codice di rito che disciplinano il contenuto della motivazione in fatto sia nei suoi lineamenti generali (art. 192 c.p.p.), sia nei suoi profili specifici, in relazione alle diverse tipologie di provvedimento espressamente contemplate (cfr. l'art. 292 c.p.p. per le ordinanze cautelari; l'art. 425 c.p.p. per la sentenza di non luogo a procedere; l'art. 546 c.p.p. per la sentenza emessa all'esito del dibattimento).

L'esame delle disposizioni che precedono restituisce l'immagine di una motivazione in fatto analitica e dettagliata, come si evince dal fatto che non sia sufficiente la mera indicazione delle prove poste a fondamento della decisione, essendo invece necessario precisare i criteri utilizzati nella valutazione della prova e i risultati acquisiti tramite essa (art. 192 comma 1 c.p.p.). D'altra parte, l'obbligo di motivazione della sentenza dibattimentale è stato di recente ulteriormente approfondito in virtù della l. 23 giugno 2017 n. 103 (c.d. "riforma Orlando"). Quest'ultima, con l'obiettivo di delineare un modello normativo della motivazione in fatto della decisione giurisdizionale, dal quale emerga esplicitamente il ragionamento probatorio sull'intero spettro dei fatti che costituiscono oggetto di prova¹¹⁹, ha emendato l'art. 546 c.p.p. il quale oggi afferma espressamente che la sentenza emessa all'esito del dibattimento deve contenere:

«... e) la concisa esposizione dei motivi di fatto e di diritto su cui la decisione è fondata, con l'indicazione dei risultati acquisiti e dei criteri di valutazione della prova adottati e con l'enunciazione delle ragioni per le quali il giudice ritiene non attendibili le prove contrarie, con riguardo: 1) all'accertamento dei fatti e delle

¹¹⁹Cfr., al riguardo, [Capone, 2018]; [Di Paolo, 2017].

circostanze che si riferiscono all'imputazione e alla loro qualificazione giuridica; 2) alla punibilità e alla determinazione della pena, secondo le modalità stabilite dal comma 2 dell'art. 533, e della misura di sicurezza; 3) alla responsabilità civile derivante dal reato; 4) all'accertamento dei fatti dai quali dipende l'applicazione di norme processuali».

3.3.2 CRITERI DI VALUTAZIONE DELLA PROVA TECNICO-SCIENTIFICA E METROLOGIA FORENSE

Si tratta, come appare evidente, di uno snodo assai impegnativo per il giudice, soprattutto nei casi in cui la ricostruzione fattuale appaia connotata da una certa complessità. Questo impegno decisorio e motivazionale appare ancor più gravoso – com'è agevole intuire – in relazione alla valutazione della prova scientifica o specialistica. Qui, infatti, l'inferenza probatoria che è alla base dell'accertamento del fatto, conducendo dall'elemento al risultato di prova, si regge su criteri estranei alle conoscenze tipiche dell'uomo medio e consiste, nella maggior parte dei casi, in leggi scientifiche del tipo statistico-probabilistiche¹²⁰.

A questo punto emerge il ben noto paradosso della prova scientifica, con il quale si intende comunemente evidenziare che il giudice si trova costretto a valutare situazioni probatorie che non solo oltrepassano le sue competenze tecnico-giuridiche, ma rispetto alle quali ha apertamente riconosciuto la propria "ignoranza" ricorrendo all'ausilio di soggetti esperti ed altamente specializzati nelle discipline interessate. Si prospetta, insomma, il rischio di un'erronea interpretazione o applicazione, da parte del giudice, delle informazioni ricevute dagli esperti o, addirittura, dell'impossibilità di fatto per l'organo giudicante di vagliare criticamente le conoscenze ottenute mediante perizia o consulenza tecnica, in ragione della asimmetria epistemica tra i soggetti coinvolti. Come si è accennato, infatti, il giudice è chiamato a giustificare i suoi provvedimenti, spiegando le ragioni per le quali ha ritenuto affidabili e persuasivi determinati elementi, rigettando per converso quelli considerati irrilevanti o inattendibili.

Com'è noto, a partire dalla celebre sentenza *Cozzini*¹²¹, la Cassazione ha assegnato al giudice il compito di custode e garante della affidabilità epistemologica e, dunque, dell'attendibilità delle tesi sostenute dagli esperti in giudizio. In particolare, sono stati precisati i criteri alla stregua dei quali il giudice deve operare la propria valutazione per discernere le conoscenze dotate di affidabilità epistemica da quelle prive di tale statuto. Tali criteri, elaborati con particolare riferimento alle tesi cosiddette "nomologiche" – cioè, quegli enunciati, tipici delle

¹²⁰Sulla complessa definizione del sintagma "prova scientifica", cfr. [Dominioni, 2007], p. 976 ss.; [Rivello, 2014], p. 57 ss.; [Tonini & Cecchi, 2023].

¹²¹Cass. pen., sez. IV, sent. 17 dicembre 2010 n. 43786, in *CED Cass*, m. 248943 - 01.

scienze naturali, che esprimono relazioni di causa-effetto o regolarità osservabili – possono essere suddivisi in due categorie: i requisiti soggettivi e quelli oggettivi.

Tra i primi rientrano: l'autorevolezza, l'indipendenza e le finalità perseguite dall'esperto. Tra i secondi si annoverano, invece, l'ampiezza, il rigore e l'oggettività della ricerca, il grado di sostegno che i fatti accordano alla tesi, l'ampiezza e l'intensità della discussione che ha accompagnato la ricerca, il grado di consenso che essa raccoglie presso la comunità scientifica di riferimento e la portata della sua attitudine esplicativa¹²².

L'individuazione dei requisiti in esame, che riproduce in buona sostanza gli approdi cui è giunta la giurisprudenza Nordamericana in materia – nonostante le differenze di natura ordinamentale e procedimentale tra gli ordinamenti giuridici considerati¹²³ – ha suscitato opposte reazioni da parte dei commentatori. Secondo un primo orientamento, tali requisiti consentono di oltrepassare la sterile contrapposizione tra gli approcci caratterizzati da una diffidenza ingiustificata nei confronti del sapere scientifico e quelli connotati da un acritico recepimento di esso¹²⁴. I requisiti in esame riflettono infatti l'affermazione di una "cultura dei criteri" attraverso i quali scrutinare il contributo reso dall'esperto in giudizio e – per questa via – attribuiscono rilievo concreto e operativo alla concezione del giudice come garante della legalità probatoria in presenza di prove tecnico-scientifiche. Un diverso orientamento ha invece posto l'accento sulla difficoltà, per l'organo giurisdizionale, di affrontare un accertamento così complesso sulla razionalità e la logicità del metodo propugnato dall'esperto, potendo il giudice essere chiamato a sindacare l'adeguatezza degli esperimenti compiuti o il livello di consenso di cui una determinata tesi gode nella comunità scientifica di riferimento (magari persino globale).

A questo punto, portando a compimento le premesse poste sino a questo momento, occorre chiedersi quale possa essere il contributo specifico – a livello metodologico – della metrologia forense, in relazione alla valutazione della prova scientifica, e quale sia l'impatto della cultura metrologica sui diversi criteri cui si è precedentemente accennato.

¹²²In tal senso, da ultima, v. Cass. pen., sez. V, sent. 16 novembre 2021 n. 1801/2022, in *CED Cass.*, m. 282545, la cui massima riproduce l'insegnamento ormai tradizionale secondo cui: «In tema di prova scientifica, il giudizio di attendibilità di una teoria deve tener conto degli studi che la sorreggono e delle basi fattuali sui quali sono condotti, dell'ampiezza, della rigorosità e dell'oggettività della ricerca, del grado di sostegno che i fatti accordano alla tesi, della discussione critica che ha accompagnato l'elaborazione dello studio e delle opinioni dissonanti che si siano eventualmente formate, dell'attitudine esplicativa dell'elaborazione teorica, del grado di consenso che la tesi raccoglie nella comunità scientifica, nonché dell'autorità e dell'indipendenza di chi ha effettuato la ricerca».

¹²³Sul punto, v. [Gennari, 2022].

¹²⁴Cfr., al riguardo, [Carlizzi, 2019], p. 49 ss., il quale – esaminando la fenomenologia dei rapporti tra giudice ed esperto – distingue atteggiamenti, rispettivamente, di apertura e di chiusura giudiziale nei confronti del contributo fornito dagli specialisti.

In quanto scienza che studia le attività di misurazione – precisamente le unità di misura, i metodi e gli strumenti di misurazione – con l’obiettivo di garantire che le misure ottenute siano accurate, ripetibili e confrontabili, si ritiene che i principi e i metodi propri della metrologia possano offrire un contributo considerevole per scrutinare, in primo luogo, i profili oggettivi del test *Cozzini*. Vengono in rilievo, in particolare, l’ampiezza, il rigore e l’oggettività della ricerca, nonché il grado di sostegno che gli esperimenti (*rectius*: le misurazioni) accordano alla tesi proposta dall’esperto in giudizio. Da questo punto di vista, i principi offerti dalla metrologia forense si inseriscono coerentemente nella “cultura dei criteri” sviluppata dalla giurisprudenza italiana – con tutti i pregi e i limiti che questo tipo di approccio comporta¹²⁵ – di cui costituiscono uno sviluppo e una specificazione significativa, poiché dotata di rilievo metodologico generale. Essi, infatti, trovano applicazione in tutti i casi in cui sia necessario effettuare una misurazione per acquisire dati o svolgere operazioni, come recita l’art. 220 c.p.p. Tali principi, insomma, contribuiscono a rendere i giudizi concernenti l’attendibilità della prova scientifica concreti e controllabili – eventualmente anche dai giudici di legittimità, mediante il sindacato sulla contraddittorietà e sulla manifesta illogicità della motivazione, *ex art. 606 lett. e c.p.p.* – per garantire razionalità e qualità delle decisioni giudiziarie.

In questi termini, la metrologia forense contribuisce a verificare la c.d. *foundational validity* (cui si è già accennato *supra*, Par. 3.1.2) la quale richiede che sia dimostrato, sulla base di studi empirici, che una determinata metodica forense sia ripetibile, riproducibile e accurata, a dei livelli che sono stati misurati in via sperimentale e che risultano appropriati in relazione all’applicazione prevista. Non sfugge che tale verifica appare particolarmente importante e densa di significato quando in discussione vi siano metodologie forensi nuove o controverse, rispetto alle quali non si sono sedimentate regole di impiego e criteri di attendibilità, motivo per cui l’organo giurisdizionale non può valersi di un patrimonio conoscitivo consolidato nella valutazione (ma, ancor prima, nell’ammissione e nell’assunzione della prova medesima).

Il contributo della metrologia forense, tuttavia, non si esaurisce a questo livello. Esso si estende infatti anche alla *validity as applied*, la quale si riferisce alle applicazioni del metodo in questione alle circostanze del caso concreto: tali applicazioni devono avvenire secondo procedure idonee a garantirne l’affidabilità, sotto la supervisione di un esperto dotato di competenze specifiche e di sufficiente esperienza. Viene qui in rilievo la categoria giuridica dello “strumento di prova”, che in dottrina è stata definita come l’insieme degli «apparati conosciti-

¹²⁵Oltre al fatto che il giudizio sul metodo scientifico non è affatto agevole o lineare per un soggetto che, appunto, non padroneggia i fondamenti della disciplina interessata, bisogna tenere conto del fatto che la giurisprudenza tende a “depotenziare” le conseguenze del mancato rispetto dei protocolli internazionali in vigore presso la comunità scientifica di riferimento, affermando che tali violazioni non cagionano l’inutilizzabilità dell’elemento di prova, ma influenzano soltanto le modalità della sua valutazione (cfr., da ultima, Cass. pen., sez. II, sent. 20 giugno 2024 n. 27813, in *CED Cass.*, m. 286745).

vi (principi e metodologie della scienza teorica, metodiche della scienza applicata, tecnologie, procedure di indagine tecniche e di valutazioni costruite sulla scorta di esperienze pratiche specializzate, apparecchiature con cui queste risorse sono utilizzate) che esorbitano dal sapere comune quanto a competenza teorica o pratica e richiedono perciò il ricorso a un esperto»¹²⁶. Sembra corretto affermare che proprio questo sia il dominio privilegiato della metrologia forense, la quale stabilisce le procedure utili per garantire la taratura e la riferibilità degli strumenti utilizzati nelle misurazioni che assumono rilievo in sede giudiziaria. La metrologia forense, dunque, fornisce gli strumenti utili per esprimere e per valutare il livello di incertezza associato inevitabilmente a qualsiasi operazione di misura.

3.3.3 I “DUE STADI” DELLA VALUTAZIONE PROBATORIA E LA METROLOGIA FORENSE

Alla luce di quanto esposto, e per concludere, la metrologia forense, indicando i metodi e i criteri necessari per esprimere adeguatamente il livello di incertezza associato a ogni misurazione, esercita la propria influenza sui due momenti fondamentali della valutazione probatoria, i quali debbono rimanere concettualmente distinti¹²⁷.

Il primo riguarda l'apprezzamento del singolo esito probatorio, rispetto al quale occorre valutare l'idoneità a contribuire alla ricostruzione dei fatti oggetto di prova dello strumento tecnico-scientifico utilizzato per introdurre nel processo un determinato dato conoscitivo (*rectius*: elemento di prova). In questo primo stadio, occorre valutare sia l'idoneità dello strumento di prova in sé (la c.d. *foundational validity*), sia il suo corretto utilizzo in relazione all'oggetto di prova e ai dati fattuali che sono stati assunti (la c.d. *validity as applied*).

Nella seconda fase, invece, l'organo giurisdizionale è chiamato a valutare non il singolo elemento di prova, bensì l'intero patrimonio gnoseologico a sua disposizione per emettere una determinata decisione. È importante sottolineare la diversità dei due momenti valutativi perché, mentre nella prima fase il giudice è vincolato in termini di razionalità dalle regole ricavabili dall'esperienza e dalla cultura tecnico-scientifica di riferimento, nel secondo stadio cambia il quadro giuridico rilevante. In tal caso, infatti, l'organo giurisdizionale soggiace a regole di pura origine legale e di matrice eminentemente politica, come quella delineata dall'art. 533 c.p.p.

Si badi bene: ciò non significa negare qualsiasi ruolo ai principi e agli insegnamenti della metrologia forense nella fase della valutazione probatoria complessiva. Per avvedersi di ciò,

¹²⁶In questi termini, testualmente, [Dominioni, 2007], p. 967.

¹²⁷Cfr. [Ubertis, 2021], p. 111 ss., il quale distingue il «giudizio assertorio di conclusione probatoria», concernente il singolo mezzo di prova, dalla «valutazione probatoria complessiva», connotata «dall'utilizzo combinato dell'intero patrimonio conoscitivo giudiziario ai fini dell'emissione della pronuncia» (*ivi*, p. 117).

è sufficiente rammentare il disposto dell'art. 530 comma 2 c.p.p., in base al quale il giudice pronuncia sentenza di assoluzione anche «quando manca, è insufficiente o è contraddittoria la prova che il fatto sussiste, che l'imputato lo ha commesso, che il fatto costituisce reato o che il reato è stato commesso da persona imputabile». Ebbene, come nel giudizio sulla insufficienza o contraddittorietà della prova testimoniale si riflette (tra le altre) anche la valutazione in merito alla attendibilità soggettiva del testimone e alla coerenza e alla completezza della sua narrazione, analogamente nel giudizio sulla insufficienza o contraddittorietà della prova scientifica confluisce (pure) la valutazione sull'autorevolezza dell'esperto, sull'idoneità epistemologica dello strumento di prova utilizzato e sulle concrete modalità della sua applicazione ai fatti di causa¹²⁸.

I due stadi valutativi, dunque, seppur abbiano oggetto e criteri ispiratori differenti, nondimeno appaiono logicamente connessi, secondo variabili che non possono essere stabilite rigidamente *a priori*, essendo dipendenti dallo specifico contesto probatorio di riferimento.

¹²⁸L'analogia è tratta da [Dominioni, 2007], p. 994.

4

LINEE GUIDA

In questo capitolo, sulla base di quanto esposto nei capitoli precedenti, verranno delineate sintetiche linee guida, specifiche per i tecnici (periti e consulenti) e per gli operatori del diritto.

4.1 LINEE GUIDA PER I TECNICI¹²⁹

4.1.1 ANALISI DELLA SCENA DEL CRIMINE

L'analisi della scena del crimine per identificare, raccogliere, conservare, analizzare e interpretare le tracce lasciate dalla vittima o dall'autore deve concentrarsi solo sulla ricerca di tali tracce, senza alcuna selezione in base a preferenze inconsce dettate da *bias* cognitivi ed evitando atteggiamenti verificazionisti.

L'analisi della scena del crimine deve evitare selezioni basate su preferenze inconsce dettate da *bias* cognitivi e deve evitare atteggiamenti verificazionisti. L'influenza inconscia delle esperienze acquisite in precedenza gioca talvolta un ruolo determinante nel commettere errori e pertanto l'analisi della scena del crimine deve concentrarsi esclusivamente sulla ricerca di tracce e prove, sospendendo, durante il sopralluogo, ogni giudizio e rifiutando qualsiasi ricostruzione dei fatti affrettata.

Molti crimini irrisolti e molti errori giudiziari sono stati viziati da atteggiamenti verificazionisti che hanno portato investigatori e pubblici ministeri a seguire una pista predefinita e a cercare solo le prove che confermassero l'ipotesi investigativa. Una rigorosa valutazione metrologica delle possibili alternative nell'analisi delle tracce e delle possibili prove a cui sottoporle può evidenziare le attività che portano a risultati più affidabili.

Un altro fattore molto importante da controllare è quello legato all'emotività. Riuscire a rimanere imperturbabili, anche di fronte a scene destabilizzanti, è fondamentale. Inoltre,

¹²⁹Il Par. 4.1 è a cura di Alessandro Ferrero e Dario Petri con il contributo di Gabriella Di Paolo.

l'emotività è una variabile che influenza il ricordo e può falsare la ricostruzione di ciò che si è svolto sulla scena del crimine.

4.1.2 RILEVAZIONE DELLE TRACCE CON TECNICHE ADEGUATE E RELATIVA DOCUMENTAZIONE

Nel riconoscere, individuare, raccogliere e preservare le tracce del reato e/o le prove rilevanti devono essere applicati adeguati protocolli per evitare ogni contaminazione e deve essere redatta una dettagliata verbalizzazione di quanto rilevato e delle azioni eseguite.

Nel riconoscere, individuare, raccogliere e preservare le tracce del reato e/o le prove rilevanti è essenziale che gli esperti:

- adottino protocolli operativi e tecniche adeguati a scongiurare il rischio di contaminazione o danneggiamento, evitando errori che potrebbero compromettere l'intero processo investigativo;
- redigano una dettagliata e precisa documentazione della scena del crimine e delle attività eseguite, avvalendosi tra l'altro di rilievi fotografici e planimetrie così da fornire tutti gli elementi essenziali per le successive analisi.

In questa fase, avvalersi di laboratori e tecnici accreditati secondo la UNI CEI 17025 [UNI CEI EN ISO/IEC 17025, 2018] garantisce (a meno di grossolane e riprovevoli inadempienze di chi esegue i rilievi) che vengano seguite procedure approvate dall'organismo accreditante che le ha giudicate adeguate allo scopo prefisso. Inoltre, la norma prevede che ogni eventuale scostamento dalle procedure approvate o dalle condizioni operative previste dalle procedure sia adeguatamente documentata e le eventuali ripercussioni, in termini di contributi di incertezza sui risultati ottenuti, siano valutati e chiaramente presentati.

Aver seguito rigorosamente procedure prestabilite avrebbe, per esempio, evitato errori come quello del caso di Perugia, in cui il gancio del reggiseno della vittima venne repertato in ritardo e raccolto con le mani, sia pure protette da un guanto, invece che con una pinzetta. La possibile contaminazione che ne è derivata ha reso inutilizzabile questo reperto.

4.1.3 LA CONSERVAZIONE DEI REPERTI

Una volta avvenuta la raccolta, repertazione e analisi delle tracce, l'esperto conserva i reperti adottando tutte le cautele tecniche necessarie ad assicurare l'integrità degli elementi raccolti, anche in vista di ulteriori analisi/accertamenti.

Particolare attenzione va posta nella conservazione del reperto per evitare che possa essere contaminato nel periodo intercorso tra la sua individuazione e il momento in cui viene analizzato. Inoltre, se la traccia viene individuata a distanza di tempo dal momento in cui si è formata, particolare attenzione deve essere posta nell'individuare le possibili cause di degrado che possono essere intervenute, ad esempio dovute all'esposizione ad agenti atmosferici, per valutarne l'impatto sull'affidabilità delle analisi che verranno condotte sui reperti.

Non è questa la sede per addentrarsi in un'analisi dei differenti fenomeni che possono alterare la traccia nel periodo di tempo intercorso tra la sua formazione e la sua valutazione. È tuttavia opportuno ricordare che, in presenza di alterazioni, note o ipotizzate, possono essere auspicabilmente seguite due strade:

- nel caso in cui l'alterazione subita dalla traccia sia nota e sia possibile tenerne conto applicando opportuni fattori correttivi, li si applica, valutando l'incertezza sulla correzione e considerandola tra i contributi all'incertezza;
- nel caso in cui le alterazioni, benché non note, siano ragionevolmente ipotizzabili, l'effetto che possono avere sul risultato della valutazione deve essere quantificato come contributo di incertezza sul risultato stesso. I metodi da seguire sono quelli tipici della metrologia che la GUM definisce «utilizzo giudizioso dell'insieme di informazioni disponibili per una valutazione [...] dell'incertezza tipo» e che «richiede capacità di approfondimento basata sull'esperienza e conoscenze generali, nonché una perizia che può essere appresa con la pratica» [JCGM 100, 2008].

4.1.4 ANALISI DELLE TRACCE E IDENTIFICAZIONE DELL'INFORMAZIONE TARGET (IL C.D. MISURANDO)

Nell'identificare quale proprietà della traccia sia di maggiore interesse nel caso specifico, quando si prospettano due o più possibili misurandi diversi, l'esperto orienta la sua scelta tenendo presente quale dei due risulta più idoneo a restituire l'informazione cercata o può essere misurato con minore incertezza.

Facendo riferimento al modello di misura introdotto al Par. 2.2.2 e alle Figg. 2 e 3 che hanno graficamente descritto i passi del processo investigativo, il primo passo da compiere è identificare il misurando, cioè la proprietà più idonea a restituire l'informazione utile a supportare la successiva decisione.

Questo primo passo è molto critico e può condizionare l'intero iter giudiziario. Un caso emblematico è quello del delitto di Perugia del 2007, in cui si privilegiò la ricerca del profilo genetico nelle tracce repertate sull'arma del delitto, invece che accertarne la natura biologica [Ferrero & Scotti, 2023]. Questa considerazione si ritrova nella sentenza emessa a seguito del secondo ricorso in Cassazione¹³⁰, in cui la Suprema Corte censura la scelta «di privilegiare l'indagine volta all'individuazione del profilo genetico nelle tracce repertate sul coltello, piuttosto che accertarne la natura biologica, posto che l'esigua quantità dei campioni non consentiva un doppio accertamento: l'esame qualitativo avrebbe, infatti, “consumato” il campione o reso inutilizzabile per ulteriori indagini. Opzione assai discutibile, in quanto l'individuazione di tracce ematiche, riferibili alla Kercher, avrebbe consegnato al processo un dato di formidabile rilievo probatorio, certificando incontrovertibilmente l'utilizzo dell'arma per la consumazione dell'omicidio. L'accertata presenza della stessa in casa del Sollecito, con il quale conviveva la Knox, avrebbe consentito, poi, ogni possibile deduzione in merito. Invece, la riscontrata imputabilità delle tracce a profili genetici della Knox si risolve in un dato non univoco ed anzi indifferente, posto che la giovane statunitense conviveva con il Sollecito, dividendosi tra la sua abitazione e quella di via della Pergola».

Quando, come in questo caso, si prospettano due o più possibili misurandi idonei a fornire l'informazione cercata, l'analisi dei possibili contributi di incertezza può utilmente indirizzare la scelta verso la proprietà che può essere misurata con la minore incertezza.

4.1.5 ANALISI DELLE TRACCE E PROCESSI DI MISURA

Nell'analisi delle tracce, quando intervengono processi di misura, l'esperto valuta accuratamente i diversi contributi di incertezza.

L'analisi delle tracce è la parte in cui, più propriamente, intervengono i processi di misura. Vanno quindi accuratamente valutati i diversi contributi all'incertezza, tra cui i più importanti sono:

¹³⁰Cass., sez. V, sent. 27 marzo 2015 n. 36080.

- il contributo dovuto al campionamento, se la traccia è diffusa e ne vengono analizzati alcuni campioni, come ad esempio sostanze inquinanti in acqua o aria, o sostanze tossiche presenti nell'organismo;
- i contributi dovuti alle grandezze di influenza, come temperatura, umidità, raggi UV, ...;
- il contributo di incertezza di definizione che può, in alcuni casi, come in quello della misura di concentrazione di alcol nel sangue attraverso la misura della concentrazione di alcol nell'espriato, essere il contributo dominante;
- il contributo di incertezza strumentale, a cui contribuiscono le incertezze di taratura degli strumenti impiegati e l'incertezza introdotta dall'operatore.

Giova qui ricordare l'importanza di una corretta taratura che deve essere eseguita garantendo la riferibilità metrologica dei risultati ottenuti e, quindi, realizzata da laboratori accreditati secondo la UNI CEI 17025 [UNI CEI EN ISO/IEC 17025, 2018], come visto al Par. 2.4.2.

Il contributo dell'operatore deve essere attentamente valutato con opportune procedure di confronti intra-laboratorio in grado di quantificare la dispersione dei risultati forniti dai diversi operatori su uno stesso campione analizzato, e attraverso confronti inter-laboratorio (o anche *proficiency test*) in grado di valutare le prestazioni dei singoli laboratori nell'analisi di uno stesso campione.

4.1.6 INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI: NON ESISTONO CERTEZZE!

Nella valutazione e interpretazione dei risultati gli esperti evitano di esprimersi in termini di assoluta certezza e dichiarano l'incertezza associata alle informazioni fornite sotto forma di risultati di misura.

La valutazione e interpretazione dei risultati delle analisi effettuate è estremamente critica ed è spesso all'origine di errori giudiziari.

Deve essere necessariamente evitata una valutazione data con assoluta certezza, perché impossibile da ottenere, alla luce di quanto finora presentato, in particolare nel Cap. 2 di questo documento. Devono essere analizzati tutti i contributi di incertezza identificati e quantificati nelle fasi precedenti, combinandoli tra loro secondo i metodi visti al Par. 2.3.3.

L'analisi dei contributi di incertezza e la loro combinazione è essenziale quando il risultato della misura deve essere confrontato con un valore limite e con un altro risultato di misura, perché solo in tal modo è possibile valutare la probabilità di prendere una decisione errata basata sul risultato di misura, come visto al Par. 2.3.4.

4.1.7 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI: COMUNICARE LA SCIENZA IN MODO ADEGUATO

Quando chiamati ad illustrare i risultati del loro operato, gli esperti comunicano gli aspetti tecnico-scientifici (risultati, metodiche, leggi scientifiche) in modo rigoroso, ma utilizzando un linguaggio adeguato ai loro interlocutori.

Nella presentazione dei risultati è necessario che i tecnici (periti e/o consulenti) considerino che i loro interlocutori non sono altrettanto esperti della materia. Per agevolare la loro comprensione, è quindi necessario:

- mantenere una rigorosa proprietà di linguaggio: imprecisioni lessicali, termini e definizioni inconsistenti con la normativa (VIM e GUM in primis) possono generare fraintendimenti, errate comprensioni dei risultati e financo generare false certezze;
- spiegare nel modo più chiaro ed esaustivo possibile, evitando dettagli tecnici inutili, le ipotesi alla base dei metodi seguiti e delle eventuali elaborazioni eseguite, in modo che siano chiari i rispettivi limiti di validità;
- illustrare i differenti contributi di incertezza e dove gli stessi hanno avuto origine, mettendo chiaramente in evidenza tutte le informazioni utilizzate per valutarli e, ove necessario, anche le informazioni mancanti all'origine di alcuni contributi di incertezza;
- esprimere i dati quantitativi eventualmente disponibili (per esempio valori probabilitativi) in forma numerica, evitando espressioni ambigue e non oggettive, come poco probabile, molto probabile, estremamente probabile, etc. Qualora venisse espressamente richiesto di esprimersi in tal modo, chiarire che il dato numerico è l'unico dato oggettivo, ed espressioni come quelle sopra esposte sono invece caratterizzate da forte soggettività;
- illustrare i risultati ottenuti in forma grafica, ove possibile. Per esempio, illustrare la probabilità di decisione errata nella forma mostrata in Fig. 9 rende molto chiaramente l'impatto che una probabilità del 26,7% può avere sulla correttezza della decisione, perché mostra visivamente come l'area colorata (che rappresenta il dubbio) si rapporta all'intera area sottesa dalla curva (che rappresenta la totale certezza).

4.2 LINEE GUIDA PER GLI OPERATORI DEL DIRITTO¹³¹

4.2.1 FASE INVESTIGATIVA

La tempestiva individuazione degli esperti forensi

L'autorità giudiziaria assicura l'intervento tempestivo sulla scena del crimine di esperti forensi competenti e prontamente disponibili.

Poiché la lontananza fisica dello scienziato forense dalla scena del crimine e/o il suo intervento in una fase successiva all'individuazione, alla rilevazione e talvolta anche alla raccolta delle tracce (o di qualcuna di esse), può determinare la perdita irreversibile di informazioni utili alla ricostruzione dei fatti, incidendo in modo irreversibile sulla quantità ed anche sulla qualità delle tracce raccolte, l'autorità giudiziaria dovrebbe assicurare intervento tempestivo sulla scena del crimine di esperti forensi competenti e prontamente disponibili¹³².

La conservazione dei reperti

La polizia giudiziaria assicura la corretta conservazione dei reperti raccolti, adottando presidi idonei a scongiurare il rischio di alterazione degli stessi, secondo le buone prassi tecnico-scientifiche quali i protocolli per le catene di custodia.

Durante il periodo che va dal rilevamento della traccia sino alla sua interpretazione/valutazione in sede giudiziaria possono intervenire fenomeni in grado di alterarla significativamente e in modo irreparabile. Pertanto, la polizia giudiziaria e le persone idonee di cui si avvale devono porre particolare attenzione nella conservazione del reperto. Ciò non è accaduto, per esempio, nel caso dell'omicidio per soffocamento di Liliana Resinovich, occorso a Trieste nel gennaio del 2022. In relazione a tale caso, la consulente tecnica Marina Baldi, genetista forense incaricata dai familiari della vittima, ha rilevato che, in occasione delle operazioni condotte sulla scena del crimine e rendicontate nella consulenza tecnica collegiale della Procura della Repubblica triestina¹³³, gli operatori

¹³¹Il Par. 4.2 è a cura di Giulia Barone, Luca Pressacco e Riccardo Roscini-Vitali, con il contributo di Gabriella Di Paolo. Pur trattandosi di un lavoro frutto di una riflessione congiunta, Giulia Barone ha redatto i Par. 4.2.1 e 4.2.2; Riccardo Roscini-Vitali ha redatto il Par. 4.2.3; Luca Pressacco ha redatto il Par. 4.2.4.

¹³²In questo senso si esprime anche la Dichiarazione di Sydney sulle scienze forensi, presentata nel 2021 dall'*International Association of Forensic Science*. In argomento si vedano [Barone, 2025] (in particolare p. 577) e [Roux et al., 2022].

¹³³Trattasi di consulenza radiologico-forense e medico-legale.

intervenuti sul posto¹³⁴ avrebbero commesso l'errore di lasciare all'interno del "sacco salma" il cordino usato per stringere i sacchetti di plastica in cui era stata trovata avvolta la testa della Resinovich, omettendo di considerare che il cordino sarebbe stato contaminato dai fluidi corporei cadaverici, rendendo, di conseguenza, impossibile analizzare le tracce di DNA maschile comunque trovate sul cordino stesso.

4.2.2 L'AMMISSIONE DELLA PROVA TECNICO-SCIENTIFICA

L'indagine sull'idoneità probatoria della prova tecnico-scientifica

In sede di ammissione della prova tecnico-scientifica, il giudice deve valutarne l'idoneità probatoria in base ai criteri della validità fondazionale (*foundational validity*) e della validità in campo (*validity as applied*), verificando cioè, rispettivamente, la validità della metodologia o della teoria alla base della prova specialistica in esame e la possibilità di una concreta e corretta applicazione della medesima al caso di specie.

Come suggerito dal PCAST Report [PCAST, 2016], per l'accertamento della validità fondazionale, occorre verificare che la metodica sia stata sottoposta a test empirici da parte di gruppi di ricerca indipendenti e che tali test: a) abbiano dimostrato la ripetibilità e la riproducibilità del metodo; e b) abbiano fornito stime in ordine all'accuratezza del metodo e cioè alla frequenza con cui perviene ad una conclusione errata ed in ordine al fatto che lo stesso sia adeguato all'uso che se ne intende fare. Per verificare la validità in campo occorre invece appurare la capacità dell'esperto forense di applicare in modo affidabile la metodologia al caso concreto e che lo stesso esprima in modo scientificamente valido il proprio convincimento in ordine al valore probatorio degli elementi riscontrati.

In una prospettiva metrologica, l'affidabilità del metodo e quindi la capacità dello stesso di fornire risultati ripetibili, riproducibili e accurati è espressa dall'incertezza di misura e, in particolare in questa fase, dai contributi dati dall'incertezza di definizione, dalla ripetibilità e riproducibilità del processo di misura¹³⁵. La validità in campo può invece essere stimata attraverso l'incertezza strumentale (ossia la componente di incertezza

¹³⁴Precisamente, il personale della Squadra Mobile della locale Questura, con il Dirigente, il personale del Gabinetto della Polizia Scientifica, il personale della Squadra Volante e di più squadre dei Vigili del Fuoco, tutti coordinati dal Sostituto Procuratore della Repubblica di Trieste, anch'egli presente sul posto.

¹³⁵Avere a disposizione dati quantitativi consente anche, nel caso fossero disponibili metodi alternativi, di valutare quello che, nel caso in esame, garantisce una più alta affidabilità.

derivante dal sistema di misura che si intende impiegare, operatore incluso) e la disponibilità della documentazione relativa agli *audit* di accreditamento (laddove presenti) del laboratorio nel quale dovrebbero essere effettuate le analisi o, più in generale, eseguite le operazioni peritali.

Nella fase di ammissione, fermi restando i parametri normativi di cui agli artt. 187, 190 e 493 c.p.p., è dunque onere delle parti (pubblica accusa, difesa o altre parti private) che richiedono l'ammissione di prove tecnico-scientifiche basate su operazioni di misurazione, fornire informazioni adeguate circa:

- l'incertezza di definizione;
- la ripetibilità della misura;
- la riproducibilità della misura;
- l'incertezza derivante dallo strumento e/o dal sistema di misurazione che si intende impiegare;
- gli esiti e relazioni degli *audit* di qualità interni ed esterni condotti nel laboratorio all'interno del quale dovrebbero essere effettuate le operazioni peritali.

Il giudice, da parte sua, deve procedere a una valutazione di questi profili al fine di assumere una decisione razionale e correttamente fondata in ordine all'ammissione della prova, seppur nella prospettiva prognostica tipica di tale fase.

La nomina di periti e consulenti tecnici con comprovate conoscenze in materia di metrologia forense

Il giudice e le parti devono valutare l'opportunità di nominare – ciascuno per quanto di propria competenza – periti e consulenti tecnici dotati di specifiche competenze nel settore della metrologia forense, eventualmente affiancando un esperto di metrologia forense alle specifiche discipline che vengono in rilievo nel caso di specie (ad es. tramite la nomina di un collegio peritale).

Considerato il ruolo fondamentale assunto dalla metrologia forense in ogni fase del procedimento probatorio, al fine di assicurare la corretta acquisizione dell'evidenza scientifica e di garantire all'organo giurisdizionale la conoscenza di tutte le informazioni necessarie per una sua compiuta valutazione, il giudice e le parti dovrebbero nominare quali periti e consulenti, per quanto possibile, esperti con le necessarie conoscenze metrologiche oppure dovrebbero affiancare un esperto di metrologia forense alle specifiche

discipline che vengono in rilievo nel caso di specie (ad es. tramite la nomina di un collegio peritale).

La formulazione del quesito peritale in chiave metrologica

Il giudice e le parti – ciascuno per quanto di propria competenza – formulano i quesiti rivolti a periti, consulenti e polizia scientifica in modo tale che, nell'adempimento dell'incarico loro affidato, gli esperti valutino, indichino e spieghino i contributi di incertezza associati alle misurazioni di volta in volta effettuate.

Poiché la conoscenza dell'incertezza di misura, ed eventualmente delle sue componenti più significative, risulta indispensabile anche ai fini della valutazione della prova specialistica, è necessario che nella formulazione del quesito peritale, il giudice richieda al perito di valutare, indicare e spiegare i contributi di incertezza associati alle misurazioni di volta in volta effettuate. I profili in questione possono emergere anche grazie al contributo fornito dalle parti in sede di formulazione dei quesiti peritali.

Analogamente, in occasione del conferimento dell'incarico al proprio consulente tecnico, le parti dovrebbero richiedere allo stesso di valutare, indicare e spiegare i suddetti parametri metrologici, pena il rischio di svolgere operazioni e rilievi la cui attendibilità potrebbe in seguito essere posta in discussione.

4.2.3 L'ACQUISIZIONE DELLA PROVA TECNICO-SCIENTIFICA

Il contributo metrologico nella valutazione di ripetibilità dell'accertamento tecnico

Il pubblico ministero, con l'ausilio della polizia scientifica o dei consulenti tecnici che lo stesso abbia nominato, adotta un approccio metrologico al fine di valutare se e in quale misura l'accertamento tecnico da compiere sia o meno ripetibile.

La metrologia forense può fornire al pubblico ministero elementi utili ai fini della valutazione di ripetibilità dell'accertamento tecnico. Si pensi al caso dell'individuazione e del rilevamento dell'impronta dattiloscopica: un approccio metrologico può aiutare la pubblica accusa a cogliere la possibilità del contesto/ambiente di riferimento di contaminarla in modo irreversibile, e quindi a risolversi a favore della irripetibilità dell'accertamento tecnico.

Ciò assicurerebbe inoltre l'attivazione delle garanzie difensive dettate nell'art. 360 c.p.p. e riconosciute, appunto, per i soli accertamenti tecnici non ripetibili: tra queste, il diritto dei difensori e dei consulenti tecnici di partecipare agli accertamenti e formulare osservazioni e riserve (art. 360 comma 3 c.p.p.), nonché il diritto della persona sottoposta alle indagini di formulare riserva di promuovere incidente probatorio (art. 360 comma 4 c.p.p.).

La definizione degli aspetti metrologici in sede di acquisizione della prova tecnico-scientifica

Il pubblico ministero e i difensori delle parti private contribuiscono alla definizione degli aspetti metrologici durante l'acquisizione della prova tecnico-scientifica.

In sede di acquisizione della prova tecnico-scientifica, il pubblico ministero e i difensori delle parti private dovrebbero concorrere alla definizione degli aspetti metrologici pertinenti. Coadiuvate dai rispettivi consulenti tecnici, la parte pubblica e i difensori potrebbero ad esempio presenziare e partecipare attivamente alle operazioni peritali, proponendo al perito o ai suoi ausiliari specifiche indagini metrologiche e/o formulando osservazioni e riserve in merito all'approccio metrologico impiegato.

Così facendo, il pubblico ministero e i difensori potrebbero contribuire a dare attuazione al principio del contraddittorio nella formazione della prova (art. 111 comma 4 primo periodo Cost.), nonché a «far conoscere la verità» al giudice (art. 226 comma 1 c.p.p.) includendo nel risultato di misura il suo grado di incompletezza.

L'indicazione degli aspetti metrologici all'interno dei documenti di output

Nei documenti di output sono indicati tutti gli aspetti metrologici relativi all'acquisizione della prova tecnico-scientifica.

La polizia giudiziaria, il pubblico ministero, i difensori delle parti private e il giudice dovrebbero assicurare che nella documentazione che rappresenta gli esiti delle operazioni tecnico-scientifiche compiute (es.: verbale delle operazioni compiute; relazione del consulente tecnico; relazione peritale) siano analiticamente indicate le informazioni rilevanti nella prospettiva metrologica, in quanto esse contribuiscono alla definizione dei limiti delle conoscenze acquisite.

Per esempio, il pubblico ministero dovrebbe assicurare che il consulente tecnico nominato renda evidente, all'interno della propria relazione, la conformità dei processi sperimentali impiegati/applicati rispetto a quelli prescritti dalla disciplina di settore o dalla migliore scienza ed esperienza dell'ambito di volta in volta interessato. In tal modo, si potrebbe assicurare una piena ed effettiva valutazione del grado di attendibilità della prova tecnico-scientifica.

4.2.4 LA VALUTAZIONE DELLA PROVA TECNICO-SCIENTIFICA

La valutazione della prova tecnico-scientifica nella prospettiva della metrologia forense

La corretta applicazione dei principi e dei metodi della metrologia forense è indispensabile per rendere la valutazione della prova tecnico-scientifica razionale e comprensibile.

Nella fase di valutazione della prova l'organo giurisdizionale deve tenere adeguatamente in considerazione le informazioni rilevanti in chiave metrologica per valutare razionalmente il grado di persuasività e il peso da attribuire agli elementi di prova derivanti da operazioni di misurazione. In particolare, devono essere considerate le incertezze associate a ciascuna misurazione per comprendere se esse assumano un effettivo rilievo – nonché, eventualmente, entro quali limiti – per la ricostruzione dei fatti.

Quando occorre valutare una prova tecnico-scientifica, affinché tale deliberazione avvenga secondo moduli razionali e intellegibili, è necessario esaminare sia la validità fondazionale, sia la validità in campo, secondo le indicazioni fornite dal PCAST Report [PCAST, 2016]. Mentre nella fase di ammissione della prova l'attenzione si concentra sulla validità fondazionale, all'esito delle operazioni e dei rilievi giova stabilire se le applicazioni del metodo adottato siano state realizzate secondo procedure idonee a garantirne l'affidabilità, sotto la supervisione di un esperto dotato di competenze specifiche e di sufficiente esperienza. Rilevano, dunque, sia le qualità soggettive degli esperti coinvolti, sia le caratteristiche dello strumento di prova e del sistema di misura impiegato sul campo. Tale verifica deve essere svolta alla luce dei contributi emersi dal contraddittorio tra le parti nelle precedenti fasi di ammissione e di assunzione della prova, nonché nella discussione che precede la deliberazione dell'organo giurisdizionale.

Cultura metrologica e giustificazione della decisione

Nella motivazione della decisione, l'organo giurisdizionale considera i principi e i metodi della metrologia forense per giustificare i criteri adottati e i risultati ottenuti nella valutazione della prova tecnico-scientifica.

La metrologia fornisce indicazioni preziose per valutare l'attendibilità e la persuasività di elementi di prova tecnico-scientifici, derivanti da operazioni di misurazione.

Nel caso in cui tali elementi siano determinanti per il giudizio sull'imputazione, allora l'incertezza associata alle operazioni di misurazione incide direttamente sulla decisione finale. La quantificazione dell'incertezza, infatti, si traduce immediatamente nell'individuazione dei margini di dubbio con cui l'organo giurisdizionale deve confrontarsi. Naturalmente, la valutazione circa la ragionevolezza del dubbio – imposta dall'art. 533 c.p.p. – rimane di esclusiva competenza dell'organo giurisdizionale.

La situazione appare più complessa quando l'elemento di prova tecnico-scientifico si inserisce in un contesto probatorio composito, come avviene nella maggior parte dei c.d. processi indiziari. In queste ipotesi, la valutazione dell'incertezza insita nelle operazioni di misurazione deve essere posta in relazione agli ulteriori elementi di prova rilevanti per la ricostruzione dei fatti, in modo da saggiare l'attendibilità e la persuasività di ciascuna informazione. L'esistenza di un determinato fatto non dovrebbe essere desunta da elementi di prova connotati da margini di incertezza significativi, se non in presenza di riscontri adeguati.

CASI DI STUDIO

5.1 ETILOMETRO¹³⁶

Un ambito nel quale le valutazioni metrologiche assumono piena dignità giuridica, in quanto disciplinate preventivamente *ex lege*, è quello relativo all'accertamento della guida in stato di ebrezza mediante l'uso di strumenti di misura, che consentono di graduarne gravità e rilevanza con corrispondente proporzionale determinazione della pena sulla base di diverse soglie normate. I casi che verranno proposti in questo paragrafo relativi a questo reato sono due.

5.2 IL CASO DI GENOVA

Il primo caso riguarda una fattispecie criminosa datata 2013¹³⁷, ove il soggetto, fermato alla guida di uno scooter verso le 3 del mattino, veniva sottoposto a test alcolimetrico che restituiva i seguenti due risultati:

- 1,56 g/l;
- 1,51 g/l.

Il test veniva effettuato dagli agenti mediante l'uso di etilometro in dotazione Dräger Alcotest 7110 Standard IR / IR + EC e il risultato di entrambe le misurazioni veniva stampato su due distinti scontrini, poi inseriti nel fascicolo del PM. In considerazione della fattispecie, inquadrabile nella ipotesi più severa tra quelle disciplinate dal legislatore, unitamente all'aggravante della commissione dell'illecito in ore notturne, il presunto reo veniva citato in giudizio dinanzi al Tribunale monocratico di Genova con l'accusa di aver commesso il reato di cui all'art. 186 comma 2 lett. c e comma 2-*sexies* Codice della Strada.

¹³⁶I Par. da 5.1 a 5.3 sono a cura di Veronica Scotti.

¹³⁷È opportuno evidenziare che, nelle more, l'orientamento giurisprudenziale è mutato e ad oggi ammette come valida contestazione da parte dell'imputato le carenze documentali o relative all'omologazione come argomentazioni idonee alla pronuncia di proscioglimento – vedi Cass. pen., sez. IV, sent. n. 14446 del 14 aprile 2025

5.2.1 IL CASO: L'ACCUSA E I FATTI DA ACCERTARE

Il processo vedeva l'imputato accusato dell'illecito di cui all'art. 186 comma 2 lett. c del Codice della Strada, con l'aggravante di cui all'art. 186 comma 2-sexies, fondandosi sulla seconda misurazione effettuata dagli agenti di Polizia Locale, minore (1,51 g/l) della prima (1,56 g/l) ma pur sempre riconducibile nella fattispecie più grave di guida in stato di ebrezza. L'accertamento in sede processuale aveva ad oggetto l'effettivo stato alcolico del soggetto, al momento del rilievo, con lo specifico obiettivo di determinare precisamente il tasso alcolemico che, in virtù dei differenti valori previsti *ex lege*, avrebbe potuto configurare fattispecie diverse, suddivise secondo le soglie normativamente stabilite. Atteso che la prova in ordine a tali fatti, peraltro normativamente prevista dal combinato disposto degli artt. 186 CdS e 379 Reg. Attuativo, doveva (e deve tuttora) essere fornita dallo strumento di misura utilizzato per i rilievi eseguiti dagli agenti, l'intero processo non poteva che riguardare l'etilometro, che ha costituito oggetto sia di valutazioni tecniche che di testimonianze in sede dibattimentale.

5.2.2 GLI ACCERTAMENTI TECNICO-SCIENTIFICI COMPIUTI

Considerato che elementi percettivi dell'agente responsabile della rilevazione, quali la percezione di alito vinoso, l'osservazione dell'equilibrio precario del soggetto e simili, non avrebbero potuto costituire elemento di prova, viste le precise soglie di tasso alcolemico definite *ex lege* e misurate con apposita apparecchiatura, in sede dibattimentale è stata ammessa, oltre alla testimonianza dell'agente in ordine alla gestione dello strumento, anche la consulenza di due esperti relativamente all'etilometro.

In sede processuale, in assenza del libretto metrologico (non prodotto dal PM), dello strumento specifico utilizzato per l'accertamento e della documentazione relativa al suo status metrologico¹³⁸, l'unica soluzione percorribile, per la verifica della correttezza delle misurazioni effettuate, era l'analisi del manuale d'uso dello strumento, che obbligatoriamente ai sensi del DM 196/1990 deve accompagnare l'etilometro. Il manuale d'uso riportava, per il range dei valori misurati, un'accuratezza dell'1,5%, corrispondente a una incertezza tipo di 0,023 g/l per il valore misurato di 1,51 g/l. Inoltre, sempre per quel range, riportava una deriva di $\pm 0,02$ g/l per ciascun mese trascorso dall'ultima taratura, fino a sei mesi dalla taratura (intervallo di taratura consigliato dal costruttore che suggeriva 6 mesi e massimo 12). In assenza del libretto metrologico, che avrebbe fornito quanto meno l'informazione relativa all'ultima verifica di ta-

¹³⁸È opportuno evidenziare che, nelle more, l'orientamento giurisprudenziale è mutato e ad oggi ammette come valida contestazione da parte dell'imputato le carenze documentali o relative all'omologazione come argomentazioni idonee alla pronuncia di proscioglimento – vedi Cass. pen., sez. IV, sent. n. 14446 del 14 aprile 2025.

ratura, si è assunto che fosse trascorso un solo mese da tale controllo, in modo da ipotizzare cautelativamente condizioni sfavorevoli per l'imputato.

Ipotizzando una distribuzione di probabilità normale per i possibili valori attribuibili al misurando, i dati forniti dal costruttore dell'etilometro portavano a valutare, a un mese dall'ultima taratura¹³⁹, per la semi-ampiezza dell'intervallo di possibili valori (data dall'incertezza estesa con fattore di copertura $k=2$) 1,45 g/l. Laddove l'ipotesi iniziale relativa al tempo trascorso dall'ultima verifica avesse dato tempi più estesi dall'ultimo controllo, anziché un solo mese, la semi-ampiezza dell'intervallo dei possibili valori attribuibili al misurando sarebbe ulteriormente allargato, con conseguente maggior favore per l'imputato.

Dai valori ottenuti, trascurando la deriva, ma considerando l'incertezza con cui è noto, per il singolo individuo, il valore del coefficiente che consente di ottenere il tasso di alcol nel sangue avendo misurato il tasso di alcol nel respiro [Ferrero & Scotti, 2023]¹⁴⁰, ferma l'ipotesi di distribuzione normale, si è potuto calcolare la probabilità che, con un valore misurato di 1,51 g/l, il valore del misurando fosse inferiore a 1,50 g/l. La probabilità così calcolata, risultava essere del 32,5% lasciando quindi al giudice eventuale margine per soppesare tale dato e considerarlo come ragionevole dubbio o meno.

In sede di istruttoria è stata enfatizzata la mancanza del certificato di taratura, unico documento che avrebbe potuto fornire contezza del funzionamento dello strumento, con conseguente precisazione del fatto che l'ipotesi di lavoro era funzionale esclusivamente a fornire una spiegazione dei dati di misura, in un'ottica peraltro di sfavore per l'imputato. Infatti, l'assenza del certificato di taratura non consentiva di escludere errori sistematici e, pertanto, non c'erano elementi per poter escludere con totale certezza che la reale concentrazione di alcol non fosse inferiore a 0,8 g/l.

In virtù del livello di dettaglio con cui è stata disposta la disciplina normativa di tali strumenti, che farebbe propendere per una adeguata gestione degli aspetti tecnici, salvo il caso in cui sia l'utente a contestare specificatamente il malfunzionamento dello strumento, essi si ritengono funzionanti; conseguentemente, risulta fondato l'accertamento effettuato con il loro utilizzo. Tuttavia, in sede giudiziale, frequentemente non si tiene conto dell'inconsistenza, sotto il profilo metrologico, dei controlli previsti dal regolamento di riferimento (DM 196/1990) dovuta sia ad aspetti relativi agli organismi che effettuano le verifiche, sia con riguardo a carenze del procedimento di controllo stesso.

¹³⁹Il costruttore si riferisce sempre al termine tecnico taratura e non alle verifiche periodiche condotte da organismi autorizzati a ciò *ex lege*.

¹⁴⁰Si ricorda che si assume, per questo coefficiente, un valore nominale di 2300 e che studi effettuati su una popolazione di circa 800 individui hanno permesso di valutare una variazione del valore di tale coefficiente, da individuo a individuo, caratterizzata da uno scarto tipo dell'11%.

5.2.3 LA DECISIONE DEL GIUDICE

Al termine della discussione il PM formulava le proprie conclusioni al giudice, chiedendo di derubricare il capo di imputazione da art. 186 comma 2 lett. c CdS a art. 186 comma 2 lett. b e disponendo la conseguente condanna, mentre la difesa dell'imputato chiedeva l'assoluzione *ex art. 530 comma 2 c.p.p.*

Il giudice, non ritenendo provate criticità tecniche relative all'etilometro utilizzato per i rilievi, anzi attribuendo rilevanza alle dichiarazioni del teste sentito in dibattimento (uno degli agenti accertatori) che confermava l'assoggettamento dell'apparecchio a periodici controlli con invio dello strumento a Roma, affermava la penale responsabilità dell'imputato. Tuttavia, sebbene avesse rigettato le argomentazioni difensive relative all'incertezza di misura dato che «postulando l'assoluta incertezza circa la correttezza di qualsivoglia misurazione mediante etilometro, finisce per porre in discussione l'impianto sul quale si fonda l'accertamento del reato in contestazione e, conseguentemente, il criterio a tale fine predeterminato dal legislatore», accoglieva la tesi del consulente della difesa con riguardo al parametro della deriva e condannava l'imputato per il reato di cui all'art. 186 comma 2 lett. b.

5.2.4 I POSSIBILI CONTRIBUTI DI UN CORRETTO USO DELLA CULTURA METROLOGICA AL CASO

Nonostante la trattazione esaustiva della tematica, corredata dalle allegazioni scientificamente valide, la sentenza ha valorizzato esclusivamente la deriva dello strumento, considerandola come elemento rilevante ai fini della rideterminazione del reato in senso favorevole all'imputato, atteso il valore misurato pari a 1,51 g/l *in liminis* tra due differenti fattispecie.

In particolare il giudice, affermando che l'incertezza di misura minava l'impianto normativo che si fondava su solide basi tecniche in relazione a comprovate leggi scientifiche di riferimento per la misurazione con etilometro, ha dimostrato di avere parzialmente raccolto le argomentazioni del consulente. Infatti, nella propria relazione, così come durante l'escussione, il consulente ha indicato specificatamente i parametri metrologici da considerare nel caso di specie, esponendo puntualmente il metodo e i conseguenti valori (*rectius* intervallo di valori) da assegnare alla misurazione effettuata e posta a base del processo. Il percorso seguito dal consulente per la corretta interpretazione dei dati di misura, corredata dall'incertezza di misura e dalla probabilità con cui tale stima si potesse considerare attendibile, non ha tuttavia convinto il giudicante. Solamente il parametro della deriva ha costituito oggetto di interesse e rilievo ai fini del giudizio, seppure costituisca solo una parte di un ragionamento più complesso.

Il risultato del ragionamento del giudice, che fonda le proprie motivazioni sulla sola deriva, coincide astrattamente con quello che si sarebbe avuto nel caso di accoglimento completo delle argomentazioni del consulente della difesa, che ponevano il dubbio della sussistenza di un valore inferiore a 1,51 g/l con una probabilità del 32% mentre nulla riferivano circa la soglia tra 0,5 e 0,8 (o inferiore a 0,5 g/l), talché la logica avrebbe suggerito di situare il valore di misura tra 0,8 e 1,51 g/l. Ne deriva che nella fattispecie in esame la fattispecie può tutto sommato essere considerata equilibrata, ma per puro caso e in virtù del fatto che la misura posta a base del procedimento si poneva sulla linea di confine tra due differenti ipotesi criminose. Infatti, qualora il valore misurato fosse stato di 1,52 g/l l'eventuale applicazione della sola deriva non avrebbe condotto al medesimo effetto.

5.3 IL CASO DI TORINO

La fattispecie, risalente al 2019, vedeva un soggetto al volante di un veicolo, in orario notturno, perdere il controllo e uscire dalla sede stradale. Sottoposto al test alcolimetrico con etilometro mediante due misurazioni si riscontravano i seguenti valori:

- 1,79 g/l;
- 1,88 g/l.

Nel caso in esame, il rilievo con etilometro avveniva, come da verbale delle FFOO intervenute, un'ora dopo l'incidente e quasi un'ora e mezza dopo l'ingestione di bevanda alcolica.

5.3.1 IL CASO: L'ACCUSA E I FATTI DA ACCERTARE

In considerazione della relazione delle FFOO l'imputato veniva accusato del reato di cui all'art. 186 commi 1 e 2 lett. c, 2-bis e 2-sexies Codice della Strada, perché si poneva alla guida in stato di ebbrezza, in orario notturno e causando autonomo incidente stradale. La pattuglia intervenuta sul posto procedeva agli accertamenti delle circostanze, incluso l'eventuale stato di ebbrezza, verificato dapprima con prova di alcol blow e, successivamente, mediante alcol test attraverso etilometro marca Dräger modello 7110 MK3 matricola ARWB0051.

I fatti da accertare riguardavano sia l'orario preciso del verificarsi del sinistro, contestato dalla difesa rispetto alle dichiarazioni contenute nella relazione CNR delle FFOO, sia la corretta misurazione del tasso alcolemico. Per tale ragione il Tribunale ammetteva le consulenze della difesa, sia medica che metrologica, acquisendo la documentazione dell'etilometro (in specie il libretto metrologico e di manutenzione e uso).

5.3.2 GLI ACCERTAMENTI TECNICO SCIENTIFICI COMPIUTI

Le due tipologie di consulenze, medica e tecnica, si corroboravano a vicenda, in quanto già i risultati derivanti dall'alcol test presentavano anomalie non compatibili con le valutazioni mediche. Infatti, le due misurazioni, effettuate a distanza di 10 minuti l'una dall'altra, restituivano valori incompatibili con la fase metabolica di smaltimento dell'alcol, dal momento che il secondo valore misurato dall'etilometro, significativamente maggiore del primo, non poteva essere giustificabile con l'ingestione di alcol avvenuta un'ora e mezza prima della misura. Tale incongruenza, sebbene utile a sostenere la discutibilità dei risultati forniti dallo strumento utilizzato, non risultava sufficiente a minarne l'affidabilità. Si rendeva quindi necessaria l'analisi della documentazione dell'etilometro, in specie del libretto metrologico, da cui si desumeva:

- assenza di accreditamento del Centro Superiore Ricerche e Prove Autoveicoli e Dispositivi (CSRPAD);
- tempistica di taratura (*rectius* verifica, visto le norme di legge) superiore rispetto a quella consigliata dal costruttore;
- errori pressoché nulli dell'etilometro su tutte le scale a partire da una certa data; tale circostanza risulta, tecnicamente, talmente improbabile da poter essere pacificamente ritenuta impossibile;
- numerose riparazioni effettuate sull'etilometro prima dell'accertamento del reato oggetto di procedimento;
- assoggettamento dell'etilometro a riparazione, nei due mesi successivi all'accertamento del reato oggetto di causa, che ha imposto il definitivo ritiro dello strumento in quanto non più funzionante e non riparabile.

Viste le numerose problematiche tecniche già emergenti dall'esame del libretto metrologico, non si è resa necessaria una consulenza più estesa su possibili scenari alternativi, con relativi calcoli dell'incertezza di misura dello strumento utilizzato per l'accertamento, che si dimostrava palesemente inaffidabile per le ragioni elencate sopra.

5.3.3 LA DECISIONE DEL GIUDICE

Sulla base delle consulenze e dell'esito dell'istruttoria, la difesa ha chiesto l'assoluzione dell'imputato, ritenendo lo strumento non funzionante correttamente, così come il PM. Il giudice, accogliendo la tesi della difesa, affermava che «deve ritenersi che assumano rilevanza decisiva

ai fini di una pronuncia assolutoria le segnalate criticità del macchinario di misurazione del tasso alcolemico. Ed infatti, deve in questa sede trovare applicazione, ritenendosi condivisibile e appropriato al caso concreto, l'orientamento giurisprudenziale secondo cui: «in tema di guida in stato di ebbrezza, allorquando l'alcoltest risulti positivo, costituisce onere della pubblica accusa fornire la prova del regolare funzionamento dell'etilometro, della sua omologazione e della sua sottoposizione a revisione» (cfr. Cass. pen., sez. IV, sent. 6 giugno 2019 n. 38618, in CED Cass, m. 277189).

Nel solco di detto orientamento, altra pronuncia (cfr. Cass. pen., sez. IV, sent. 12 dicembre 2019 n. 3201/2020, in CED Cass, m. 278032) ha affermato il principio secondo cui: «in tema di guida in stato di ebbrezza, è configurabile a carico del pubblico ministero l'onere di fornire la prova dell'omologazione dell'etilometro e della sua sottoposizione alle verifiche periodiche previste dalla legge nel caso di contestazione da parte dell'imputato del buon funzionamento dell'apparecchio. (Nella fattispecie, di ammissione al rito abbreviato non condizionato, la Corte ha ritenuto invece l'implicita accettazione dell'imputato all'utilizzazione degli scontrini dell'alcoltest, non avendo eccepito nulla in proposito e non avendo sollecitato l'assunzione di una prova contraria)». Secondo tale ultima decisione, che appare equilibrata e condivisibile, all'attribuzione dell'onere della prova in capo all'accusa circa l'omologazione e l'esecuzione delle verifiche periodiche sull'apparecchio utilizzato per l'alcoltest deve fare riscontro un onere di allegazione da parte del soggetto accusato avente ad oggetto la contestazione specifica del buon funzionamento dell'apparecchio.

Scrivendo quindi il giudice: «Stando così le cose, non può negarsi che la difesa dell'imputato abbia pienamente soddisfatto l'onere, su di essa incombente, di allegare gli specifici elementi di criticità del buon funzionamento dell'apparecchio, ricavando detti profili non già su considerazioni congetturali e di scarsa verificabilità, bensì su dati tecnici emergenti dal libretto metrologico».

Sulla base delle motivazioni sopra riportate, il giudice ha concluso che: «In assenza di affidabilità della rilevazione mediante etilometro, come detto, non può che presumersi il livello di alcol nel sangue, in *favor rei*, al momento della guida, al di sotto della soglia di punibilità minima e mandarsi assolto l'imputato perché il fatto non è previsto dalla legge come reato, la condotta di guida essendo al più censurabile per la violazione amministrativa di cui alla lettera a) della norma citata».

5.3.4 I POSSIBILI CONTRIBUTI DI UN CORRETTO USO DELLA CULTURA METROLOGICA AL CASO

Nel caso di specie, l'apporto della metrologia è stato determinante in quanto ha fornito la base di valutazione per il giudice in ordine alla complessiva affidabilità dell'intero strumento e non solo della singola misura effettuata con il medesimo. Le considerazioni metrologiche, sebbene non abbiano esplicitamente considerato l'incertezza sul risultato della misura, hanno comunque analizzato l'affidabilità del risultato stesso sulla base di tutte le informazioni disponibili; hanno inoltre dimostrato di rappresentare un fondamentale elemento anche in un ambito come quello, dettagliatamente normato, relativo agli etilometri. Significativa, in quest'ottica, appare la considerazione del giudice circa il pieno soddisfacimento dell'onere, in capo alla difesa, di allegare gli specifici elementi di criticità del buon funzionamento dell'apparecchio, elementi ottenuti a partire dall'analisi metrologica dei dati di misura e del libretto metrologico.

5.4 IL CASO LORANDI¹⁴¹

La vicenda giudiziaria in esame riguarda il processo svoltosi davanti alla Corte di Assise di Brescia per l'omicidio di Clara Bugna, trovata morta presso la propria abitazione in data 10 febbraio 2007.

5.4.1 L'ACCUSA E I FATTI DA ACCERTARE

Secondo l'imputazione formulata dal pubblico ministero, Bruno Lorandi avrebbe cagionato la morte della propria moglie, Clara Bugna, a Nuvolera (BS) il 10 febbraio 2007, strozzandola e strangolandola con la cintura dell'accappatoio, aggredendola mentre la stessa era a letto, verosimilmente addormentata e comunque incapace di opporre resistenza attiva. Sempre secondo il pubblico ministero, Lorandi, dopo avere commesso il delitto e al fine di conseguire l'impunità per lo stesso, avrebbe simulato le tracce di una rapina commessa da ignoti ai danni di Bugna. In particolare, Lorandi avrebbe spostato il corpo di Bugna dal letto, posizionandolo sul pavimento del soggiorno, e, *inter alia*¹⁴², avrebbe posizionato l'asse da stiro in cucina, acceso il ferro da stiro e collocato tre camicie stirate nel medesimo locale e una ancora da stirare sull'asse da stiro.

¹⁴¹Il Par. 5.4 è a cura di Riccardo Roscini-Vitali.

¹⁴²Lorandi avrebbe aperto un cassetto e un'anta della credenza del soggiorno, al cui interno erano stati occultati, a detta di Lorandi stesso, € 5.000,00 in contanti, non rivenuti in sede di sopralluogo, e avrebbe acceso la televisione posta in cucina.

Lorandi è stato accusato, per la prima condotta, del delitto di omicidio (art. 575 c.p.) e, per la seconda condotta, del delitto di simulazione di reato (art. 367 c.p.).

Con riguardo, in particolare, alla simulazione di reato, il fatto da accertare è consistito nello stabilire se e quando il ferro da stiro fosse stato acceso e, in quest'ultimo caso, nel verificare se l'elettrodomestico avesse stirato o fosse, invece, rimasto sempre in *stand by*.

5.4.2 GLI ACCERTAMENTI TECNICO-SCIENTIFICI COMPIUTI

Per accertare il fatto, il pubblico ministero si è avvalso di consulenti tecnici, nominati ai sensi dell'art. 359 comma 1 c.p.p., ai quali ha chiesto di verificare se fosse possibile rilevare i dati dei consumi energetici intervenuti il 10 febbraio 2007 in casa Lorandi e quale elettrodomestico avesse potuto generarli.

Con riguardo al primo quesito, i consulenti tecnici hanno effettuato tre letture del contatore. La prima, c.d. canonica, ha permesso la lettura delle curve di carico dall'istante dell'ultima sincronizzazione. La seconda e la terza, eseguite tramite un'altra procedura, hanno consentito di leggere tutte le celle di memoria in cui era stata registrata la curva di carico. I consulenti hanno quindi verificato se i dati rilevati dalle ultime due letture fossero sovrapponibili, concludendo che gli stessi erano tra loro congruenti e uguali. Tali operazioni hanno portato all'elaborazione della curva di carico.

Nell'ambito del secondo quesito, i consulenti tecnici hanno analizzato la curva di carico, individuando un picco di consumo tra le 6:30 e le 6:45 del 10 febbraio 2007, che hanno ritenuto attribuibile all'accensione del ferro da stiro. I consulenti hanno poi eseguito un esame della curva dei consumi di *background*, confrontandola con eventi temporali noti (il primo ingresso della polizia giudiziaria in casa Lorandi) e tenendo conto del massimo ritardo dovuto alla sincronizzazione da remoto (da 3 minuti e 20 secondi a 5 minuti), nonché alcune simulazioni di accensione del ferro da stiro. Ciò ha consentito di restringere la finestra temporale di accensione dell'elettrodomestico tra le 6:36 e le 6:41. Infine, i consulenti hanno eseguito delle prove di stiro, dalle quali hanno dedotto che la mattina del 10 febbraio 2007 il ferro da stiro, seppure acceso, non aveva stirato ed era invece rimasto sempre in *stand by*.

Vale la pena precisare che l'ing. Valenti, primo consulente tecnico nominato dal pubblico ministero poi sostituito, aveva evidenziato sin da subito che non era possibile associare il consumo di un elettrodomestico a un dato istante temporale. Ciò in quanto, secondo il Valenti, l'operazione di sincronizzazione avrebbe provocato la reinizializzazione delle informazioni contenute nel contatore, così rendendo impossibile estrarre il dato del consumo di energia in maniera affidabile dal punto di vista della connotazione temporale.

Ciò precisato, gli accertamenti tecnico-scientifici compiuti dai consulenti nominati dal pubblico ministero in sostituzione dell'ing. Valenti hanno rilevato che: (i) «il ferro da stiro è stato acceso [...] nel quarto d'ora tra le 6:30 e le 6:45 quando è stato riscontrato un consumo di 1188 W»; (ii) «tenendo conto delle medie mobili, il ferro da stiro è stato acceso alle 6,36 (ora del contatore) e alle 6:39-6:42 (ora del Galileo Ferraris)»; (iii) «il ferro da stiro, se fosse stato acceso e, poi, utilizzato per almeno venti minuti, avrebbe comportato un consumo di energia elevato non solo nel primo quarto d'ora ma anche nei quarti d'ora successivi»; (iv) «il ferro da stiro di casa Lorandi è rimasto sempre in posizione *stand by* e non è stato effettivamente utilizzato come si desume dalla media del consumo dei quarti d'ora successivi al primo».

5.4.3 LA DECISIONE DEL GIUDICE

La Corte di Assise di Brescia ha ritenuto di condividere le conclusioni formulate, a suo avviso «in maniera logica, analitica e scientificamente corretta», all'interno della consulenza tecnica del pubblico ministero e ha condannato l'imputato alla pena dell'ergastolo.

L'esito della consulenza tecnica ha avuto certamente una sua importanza significativa nella formazione del convincimento della Corte di Assise rispetto alla colpevolezza del Lorandi almeno con riguardo al delitto di simulazione di reato. È proprio sulla base di detta consulenza che la Corte di Assise è «giun[ta] ad una conclusione certa ed univoca»: «Clara, quel mattino del 10 febbraio 2007, non si è mai alzata per stirare e quella del ferro da stiro è una messa in scena posta in essere dalla sola persona che aveva interesse a dimostrare che Clara avesse stirato mentre egli si trovava al lavoro. Questa persona è il marito Lorandi Bruno». Secondo la Corte di Assise, «l'ora di accensione del ferro da stiro, tra le 6:30 e le 6:45, e verosimilmente tra le 6:36 e le 6:41, conferma [infatti] che, una volta escluso che Clara si fosse alzata dal letto, l'unica persona ancora presente in casa era il marito; il mancato utilizzo del ferro da stiro, in contrasto con la presenza di quasi quattro camicie già stirate, conferma che la messa in scena era finalizzata a spostare nel tempo la collocazione del fatto suicidario/omicidiario allontanando qualsiasi sospetto dall'unica persona che tale interesse aveva in quanto dopo una certa ora era sicuramente andata al lavoro»¹⁴³.

La Corte di Assise ha dunque dichiarato il Lorandi colpevole dei delitti ascrittigli e lo ha condannato alla pena dell'ergastolo con sentenza confermata dalla Corte di Assise di Appello di Brescia¹⁴⁴ e dalla Corte di Cassazione¹⁴⁵.

¹⁴³Ass. Brescia, 7 maggio 2008, n. 2.

¹⁴⁴Ass. app. Brescia, 28 maggio 2009.

¹⁴⁵Cass. pen., sez. I, sent. 9 dicembre 2009 n. 1081. Cass. pen., sez. V, sent. 20 novembre 2020 n. 1969 ha, infine, rigettato la richiesta di revisione presentata dalla difesa di Lorandi.

5.4.4 I POSSIBILI CONTRIBUTI DI UN CORRETTO USO DELLA CULTURA METROLOGICA AL CASO

Un approccio metrologicamente corretto avrebbe consentito di esprimere, con riguardo ai dati di consumo, un'incertezza di misura in grado di porre in dubbio quanto ritenuto, invece, certo dall'autorità giudiziaria, ossia che il ferro da stiro fosse stato acceso e fosse rimasto sempre in *stand by*.

Segnatamente, nell'accertare se e quando il ferro da stiro fosse stato acceso prima che Lorandi uscisse di casa, i consulenti tecnici del pubblico ministero avrebbero dovuto considerare l'incertezza di misura derivante dai seguenti fattori¹⁴⁶:

- la risoluzione temporale del contatore elettrico, pari a quindici minuti. Tale risoluzione rende il contatore uno strumento non idoneo a valutare uno scarto temporale di pochi minuti;
- la sincronizzazione del timer del contatore elettrico effettuata periodicamente da remoto dal fornitore di energia elettrica¹⁴⁷. Tale sincronizzazione porta inevitabilmente con sé un disallineamento temporale;
- la presenza di altri elettrodomestici accesi che si attivano a intervalli e non hanno un consumo costante (come, per esempio, il frigorifero). Tale compresenza può falsare l'individuazione univoca del momento di accensione di un elettrodomestico;
- l'inattendibilità della lettura, effettuata da remoto, dei dati di consumo registrati nella memoria del contatore. All'epoca il programma di lettura da remoto non era stato ancora validato dall'azienda sviluppatrice¹⁴⁸. L'unico modo per ottenere, all'epoca, una lettura affidabile consisteva nel prelievamento fin da subito del contatore¹⁴⁹, con realizzazione in laboratorio di una copia forense della memoria interna e successiva analisi di tale copia.

¹⁴⁶Al netto del fatto che il metodo più appropriato a tale scopo sarebbe stato l'impiego di una simulazione Monte Carlo, come evidenziato nel Par. 2.3.3.

¹⁴⁷Si tratta della c.d. sincronizzazione forte.

¹⁴⁸Nella fattispecie, il programma di lettura da remoto non era stato ancora validato completamente né dall'azienda che lo aveva sviluppato (IBM) né dal distributore di energia elettrica che ne era proprietario (ASM Brescia) e presentava un bug che causava il disallineamento del marker temporale associato ai dati di consumo rispetto al momento effettivo in cui il consumo si era verificato. Tant'è che il consulente tecnico stesso del pubblico ministero ha dichiarato che «un'estrazione dei dati ancora presenti sui registri delle curve di carico darebbe risultati inaffidabili sulla collocazione temporale dei consumi».

¹⁴⁹Considerato che il contatore elettrico è basato su una struttura di computer.

A riprova dell'inattendibilità della ricostruzione temporale dei consumi, va evidenziato che il consulente tecnico cui la difesa del Lorandi si era rivolta ai fini della richiesta di revisione, ha rilevato che il 14 febbraio 2007 – giorno in cui non risultavano accessi della polizia giudiziaria e l'appartamento, sottoposto a sequestro probatorio, era vuoto – i consumi elettrici tra le 16:00 e le 22:00 sarebbero stati, in base a tale ricostruzione, costantemente superiori al kilowatt, come mostra il grafico di Fig. 11, mentre avrebbero dovuto essere non superiori a un paio di centinaia di watt essendo consumi di background. Tale picco di consumi non poteva quindi che essere imputato a un'errata ricostruzione temporale, irrimediabilmente alterati dai primi due tentativi di lettura da remoto effettuati dai consulenti tecnici del pubblico ministero.

Nell'accertare se il ferro da stiro fosse stato, oltreché acceso, anche utilizzato, i consulenti tecnici del pubblico ministero avrebbero dovuto inoltre considerare l'incertezza di misura derivante dai seguenti fattori:

- la variabilità della tensione di alimentazione, che nel normale funzionamento può variare di +/- 10 per cento rispetto al valore nominale. Tale variabilità influenza i consumi durante l'utilizzo di un elettrodomestico in modo quadratico e, quindi, i tempi di accensione e spegnimento, fondamentali nel determinare se e come un elettrodomestico viene utilizzato;
- la quantità di acqua inserita nella caldaia, dato ricavabile dal segno del calcare presente all'interno della caldaia stessa, supponendo che normalmente una persona carichi sem-

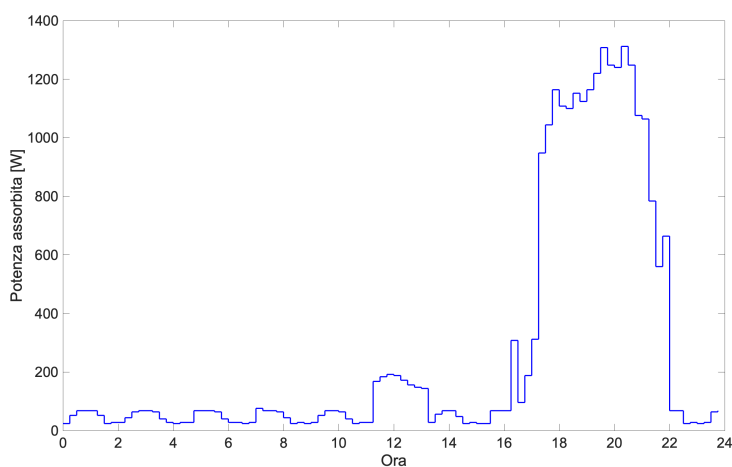


Figura 11: Consumi elettrici attribuiti alla giornata del 14 febbraio 2007

pre la stessa quantità di acqua. Tale quantità è, infatti, in grado di influenzare i tempi di accensione e spegnimento di un elettrodomestico;

- la temperatura dell'acqua inserita nella caldaia, dato ricavabile chiedendo al fornitore idrico informazioni in merito alla temperatura media dell'acqua erogata in quel periodo dell'anno. Tale temperatura rappresenta, infatti, una grandezza di influenza;
- le sequenze e i materiali oggetto dell'operazione di stiratura. I consulenti tecnici si sono limitati a stirare solo alcuni tessuti, invece di stirare la sequenza esatta di indumenti trovati già stirati sulla scena del crimine.

In conclusione, si è al cospetto di un insieme di fattori che, se debitamente considerati, avrebbero potuto far sorgere un dubbio in merito al fatto che quella del ferro da stiro fosse davvero una «messa in scena [...] finalizzata a spostare nel tempo la collocazione del fatto suicidario/omicidiario»¹⁵⁰, con le conseguenti ricadute probatorie sull'accusa di simulazione di reato.

5.5 IL CASO TAFFI PAMIO¹⁵¹

Il caso in esame riguarda l'omicidio di Lida Taffi Pamio, avvenuto nella sua abitazione, a Mestre (VE), il 20 dicembre 2012.

Durante le indagini, i sospetti degli inquirenti si erano fin da subito orientati verso una vicina di casa della vittima, Monica Busetto, presso la cui abitazione era stata rinvenuta una collanina d'oro spezzata, ritenuta essere quella sottratta alla vittima il giorno dell'omicidio.

A distanza di quasi quattro anni, era però intervenuto un colpo di scena: una terza persona, Susanna Lazzarini (accusata dell'omicidio di Francesca Vianello, occorso a Mestre (VE) il 29 dicembre 2015), intercettata durante una conversazione con un parente, affermava di essere stata lei a uccidere non solo la Vianello, ma anche la Taffi Pamio, entrambe amiche di sua madre.

Interrogata ripetutamente dal pubblico ministero, la Lazzarini – che si trovava in custodia cautelare in carcere presso la Casa Circondariale di Montorio (VR), dove era detenuta anche la Busetto – inizialmente escludeva qualsivoglia coinvolgimento di quest'ultima nell'omicidio della Taffi Pamio. Durante l'interrogatorio del 24 febbraio 2016, la Lazzarini infatti dichiarava: «come faccio io, davanti a una persona che so che è innocente, a dire “ciao, sai tu sei qua dentro per sbaglio, perché sono stata io a commettere l'omicidio”?»; «no, l'ho fatto io [l'omicidio]»;

¹⁵⁰Ass. Brescia, 7 maggio 2008, n. 2.

¹⁵¹Il Par. 5.5 è a cura di Riccardo Roscini-Vitali.

«[la Busetto] non c'entra niente». Nel successivo interrogatorio del 5 luglio 2016, aggiungeva, con riguardo alla catenina d'oro sottratta alla Taffi Pamio: «l'ho buttata via [...] su dei bidoni dell'immondizia». Sempre rispetto alla catenina, durante l'interrogatorio dell'8 luglio 2016 infine precisava: «io sono convinta che era rotta dal gancio. Deve essersi strappato il gancio, comunque non in mezzo alla collana».

In occasione del quarto interrogatorio Lazzarini cambiava però improvvisamente versione. Dapprima affermava di essersi recata il 20 dicembre 2012 presso l'appartamento della Taffi Pamio per farle visita, e di avere sorpreso la Busetto intenta a uccidere l'anziana signora. La Busetto l'avrebbe quindi costretta ad aiutarla a portare a termine il proprio proposito omicidiario. In un secondo momento, dichiarava invece di essersi introdotta nell'appartamento per commettere un furto e di essere stata sorpresa dalla Busetto, che l'avrebbe aiutata a uccidere la Taffi Pamio vantandosi di sapere come fare essendo lei infermiera.

A fronte di tale quadro probatorio, la Busetto e la Lazzarini sono state entrambe accusate, in tempi diversi e nell'ambito di due distinti procedimenti penali, del delitto di omicidio (art. 575 c.p.).

5.5.1 L'ACCUSA E I FATTI DA ACCERTARE

Secondo l'imputazione formulata dal pubblico ministero nel processo a carico di Monica Busetto, quest'ultima avrebbe cagionato la morte di Lida Taffi Pamio, una sua vicina di casa, inferendole plurimi colpi di coltello.

Le indagini avevano preso avvio dall'analisi della scena del crimine, che aveva condotto all'individuazione dell'arma del delitto (un coltello con manico di legno, intriso di sangue), nonché al ritrovamento, accanto al corpo esanime della vittima, di una medaglietta e della fede del marito che la Taffi Pamio era solita portare al collo, infilate in una catenina d'oro, assente però dal luogo del delitto. A seguito di perquisizione presso l'abitazione della Busetto, dirimpettaia della vittima, la polizia giudiziaria aveva rinvenuto, custodita all'interno di un portagioie, una catenina d'oro spezzata lungo la maglia, che si ipotizza essere quella sottratta alla Taffi Pamio il giorno dell'omicidio.

Poiché sull'arma del delitto non erano state rilevate le impronte digitali della Busetto nè tracce genetiche a lei riconducibili, ai fini dell'accertamento della sua responsabilità diventava fondamentale stabilire se la catenina d'oro rinvenuta presso la sua abitazione fosse quella di proprietà della vittima Taffi Pamio.

5.5.2 GLI ACCERTAMENTI TECNICO-SCIENTIFICI COMPIUTI

Come anticipato, durante le indagini gli investigatori hanno perquisito l'appartamento della Busetto, dirimpettaia della Taffi Pamio. In tale occasione la polizia scientifica ha prelevato alcuni oggetti, tra cui uno zerbino, un paio di pantofole e una catenina d'oro spezzata della lunghezza di circa 58 cm rinvenuta all'interno di un portagioie contenente altri monili. Su quest'ultima, in particolare, si è concentrata l'attenzione degli inquirenti.

Al fine di accertare se sulla catenina fossero presenti tracce di DNA riconducibili alla vittima, il pubblico ministero ha nominato dei consulenti tecnici (art. 359 c.p.p.), scelti presso il Dipartimento di Medicina Legale dell'Università degli Studi di Padova. Tali consulenti hanno esaminato la catenina impiegando la c.d. tecnica dello strofinamento con tampone, consistente nello strofinare il reperto con un tampone e nell'analizzare quest'ultimo con un apposito kit. I consulenti hanno optato per tale metodo in luogo di quello c.d. della sospensione (consistente nell'analizzare il liquido in cui viene immerso il reperto), in quanto ritenuto a minore rischio di contaminazione. I tre test effettuati hanno dato esito negativo con riguardo alla presenza del DNA sia mitocondriale sia nucleare. Come anticipato, anche l'arma del delitto (intrisa di sangue) veniva analizzata, ma il DNA rinvenuto risultava appartenere solo alla vittima. Veniva quindi esclusa la presenza sul coltello di impronte digitali o tracce biologiche riconducibili alla Busetto.

Il pubblico ministero, evidentemente non soddisfatto dell'esito negativo, ha chiesto di ripetere l'accertamento alla Direzione Centrale Anticrimine - Servizio Polizia Scientifica - Divisione III - Laboratorio di Genetica Forense di Roma.

Alla stessa furono trasmessi tredici reperti. I primi dodici erano stati prelevati da casa Taffi Pamio e tra questi era presente il coltello con manico in legno impiegato per uccidere la vittima (reperto n. 12). Il tredicesimo reperto era stato invece prelevato da casa Busetto e corrispondeva alla catenina d'oro spezzata (reperto n. 13).

La nuova analisi del coltello, condotta con le stesse modalità precedenti, confermò pienamente gli esiti dei test effettuati dal Dipartimento di Medicina Legale di Padova (escludendo la presenza di impronte digitali o tracce biologiche riconducibili alla Busetto). Per l'analisi della catenina, il laboratorio di genetica forense di Roma applicò invece una metodologia differente: immerse singolarmente ciascun reperto in una provetta contenente del liquido, centrifugò la provetta e analizzò sia il liquido sia il tampone con cui aveva infine asciugato il reperto. Con riguardo alla catenina, il test sul tampone (reperto n. 13B) diede esito negativo. Nel relativo liquido (reperto n. 13A) fu invece rilevata la presenza di 3 pg di DNA. Il DNA in questione fu ricondotto al profilo genetico della Taffi Pamio a seguito dell'impiego della PCR (*Polyme-*

rase Chain Reaction), tecnica di biologia molecolare che consente di amplificare frammenti specifici di DNA.

Avendo la polizia scientifica di Roma impiegato, per l'analisi della catenina d'oro, una metodologia più sensibile, il pubblico ministero ha ritenuto più affidabili gli esiti del secondo accertamento, concludendo nel senso che fosse stata la Busetto a uccidere la Taffi Pamio. La "prova regina" dell'impostazione accusatoria era costituita dalla presenza di tracce di materiale genetico riconducibile alla vittima sulla catenina ritrovata in casa Busetto. Infatti, sia i consulenti tecnici di Padova sia la polizia scientifica di Roma avevano escluso la presenza, sull'arma del delitto, sia di impronte digitali sia di tracce biologiche riconducibili alla Busetto.

5.5.3 LA DECISIONE DEL GIUDICE

La Corte di Assise di Venezia ha ritenuto di condividere le conclusioni formulate dal pubblico ministero e il 22 dicembre 2014 ha condannato la Busetto alla pena di 24 anni di reclusione. La sentenza è stata poi riformata dalla Corte di Assise di Appello di Venezia, che il 18 novembre 2016 ha rideterminato la pena inflitta nell'ergastolo. A seguito di annullamento parziale della sentenza da parte della Corte di Cassazione con specifico riguardo al trattamento sanzionatorio, il 17 ottobre 2018 altra sezione della Corte di Assise di Appello di Venezia ha infine rideterminato la pena in complessivi 25 anni di reclusione.

Vale la pena evidenziare che nella sentenza del 5 dicembre 2018 di condanna della Lazzarini (processata separatamente da altro collegio giudicante) il giudice perveniva invece ad escludere che il coinvolgimento della Busetto avesse trovato adeguati riscontri: «in altri e decisivi termini, è certamente provato che la Lazzarini, recatasi, per depredarla, dalla anziana cosciente Taffi Pamio, ha soppresso quest'ultima. [...] Per contro, il ruolo di materiale compartecipe nel delitto in imputazione attribuito alla coimputata, giudicata separatamente, Busetto Monica, non ha trovato, alla stregua del compendio probatorio disponibile, adeguato riscontro».

5.5.4 I POSSIBILI CONTRIBUTI DI UN CORRETTO USO DELLA CULTURA METROLOGICA AL CASO

A differenza dei casi studio precedentemente esaminati, in quello di specie viene in rilievo – in quanto implicante un processo di misurazione – una classica metodica forense di comparazione delle caratteristiche (*Forensic Feature-Comparison Method*) cioè l'analisi del DNA. Anche in tale caso, una solida cultura metrologica avrebbe consentito agli operatori di considerare e presentare i margini di errore dell'analisi genetica, e, quindi, al pubblico ministero e al giu-

dice, di valutare diversamente l'attendibilità degli accertamenti tecnici eseguiti dalla polizia scientifica.

Per meglio comprendere tale aspetto, va rammentato che, per consentire di rendere conto dell'osservanza dei processi sperimentali, la norma tecnica UNI CEI EN ISO/IEC 17025 impone che ogni variazione rispetto a quanto stabilito dalle "procedure di prova" approvate dall'organismo accreditante sia riportata dall'operatore all'interno del "rapporto di prova", e che eventuali contributi di incertezza introdotti da tali variazioni siano valutati e quantificati. È possibile non rispettare le prescrizioni operative per l'acquisizione della prova tecnico-scientifica solamente se si è in grado di valutare come modalità e tempistiche diverse da quelle prescritte contribuirebbero, verosimilmente migliorandola, all'incertezza sul risultato ottenuto.

Pertanto, nell'accertare se fosse presente materiale biologico sulla collanina, la polizia scientifica incaricata dal pubblico ministero avrebbe dovuto considerare (e presentare alla pubblica accusa e al giudice) l'incertezza di misura derivante dai seguenti fattori:

- le modalità di repertazione di corpi del reato e di cose pertinenti al reato provenienti da luoghi differenti. Al momento del trasferimento dal Dipartimento di Medicina Legale di Padova al laboratorio di genetica forense di Roma, la polizia scientifica ha correttamente riposto in involucri individuali i singoli reperti, ma li ha introdotti congiuntamente in un'unica busta. In letteratura è invece noto che, soprattutto in presenza di quantità infinitesimali di DNA, come tali in grado di migrare da un oggetto all'altro per via aerea o per contatto con oggetti terzi, è importante tenere ben separati i reperti, in particolare se acquisiti da luoghi diversi¹⁵². Nell'eseguire la nuova repertazione, la polizia scientifica avrebbe quindi dovuto rispettare le procedure e mantenere del tutto separati i reperti prelevati da casa Taffi Pamio rispetto a quelli rinvenuti in casa Busetto. La conseguenza del mancato rispetto delle procedure può comportare contributi di incertezza, la cui mancata valutazione non permette di valutare l'affidabilità dei risultati dei test successivamente eseguiti sui reperti;
- le modalità di trasferimento dei reperti dal Dipartimento di Medicina Legale di Padova al laboratorio di genetica forense di Roma. Mentre i laboratori di genetica forense sono certificati e dovrebbero quindi seguire rigorosi protocolli, la stessa cosa non vale per la fase di trasferimento dei reperti. Il mancato rispetto di procedure relative al trasferimento dei reperti può introdurre nuovi contributi di incertezza di misura, in quanto si

¹⁵²V. [Gill, 2014].

rischia di non garantire l'integrità del reperto, e può quindi, per i motivi sopra esposti, impedire la corretta valutazione dell'affidabilità dei risultati dei successivi test;

- il metodo utilizzato per l'estrazione del materiale genetico e l'amplificazione di eventuali tracce di DNA. Il metodo della sospensione impiegato dalla polizia scientifica è indubbiamente più sensibile al rilevamento anche di tracce minime di materiale genetico rispetto al metodo dello strofinamento con tampone, ma proprio a causa della sua elevata sensibilità è anche più suscettibile all'individuazione di "falsi positivi"¹⁵³. Ciò significa che il test può indicare erroneamente la presenza di DNA che in realtà non è presente; anche tale aspetto avrebbe dovuto essere considerato, quantificato e presentato alle autorità inquirenti e giudicanti;
- le tempistiche di sanificazione tra un'analisi e l'altra dei reperti. All'interno del verbale di prosieguo accertamenti tecnici irripetibili la polizia scientifica non ha dato evidenza dell'intervenuta osservanza delle tempistiche di sanificazione tramite raggi UV tra l'analisi di un reperto e l'analisi di quello successivo, come previsto per il processo sperimentale in discussione. Inoltre, sul rispetto di tali tempistiche (pari a 20 minuti per ogni ciclo di sanificazione) sono stati espressi forti dubbi dalla difesa, attesa l'apparente non compatibilità tra il numero di reperti (ben tredici) analizzati nella mattinata di lavoro del 24 giugno 2013 e l'orario indicato per la conclusione delle operazioni tecniche (le ore 13:00). In ottemperanza alla norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025, secondo cui il laboratorio risultava accreditato¹⁵⁴, questa variazione rispetto alla procedura approvata e da seguire avrebbe dovuto essere segnalata e gli eventuali contributi di incertezza che ne derivavano avrebbero dovuto essere identificati, valutati e presentati al pubblico ministero e al giudice;
- la quantità del misurando. La polizia scientifica ha eseguito l'accertamento su una quantità di DNA pari a 3 pg, laddove i laboratori di analisi solitamente si astengono dall'utilizzare quantità di DNA inferiori a 50 pg, atteso che il peso del genoma umano custodito all'interno di una cellula è pari a 3,59 pg e una cellula pesa in media 300 volte di più (1 ng, ossia 1.000 pg). L'esigua quantità di materiale genetico rinvenuto ha costretto a eseguire numerosi cicli di amplificazione PCR, aumentando significativamente il ri-

¹⁵³Nell'ambito scientifico, un "falso positivo" si verifica quando un test o una procedura indica erroneamente la presenza di una condizione o di una caratteristica che in realtà non è presente. In altre parole, è un "falso allarme". Questo concetto è valido in vari ambiti, come la medicina, la statistica, la sicurezza informatica, etc.

¹⁵⁴Nel verbale di prosieguo accertamenti tecnici irripetibili, infatti, si dà conto del fatto che si trattava di «laboratorio [...] certificato ISO 9001:2008 ed accreditato ISO/IEC 17025 [...] con personale regolarmente qualificato».

schio di ottenere artefatti nel risultato dell'elettroforesi, cosa di cui non si è tenuto conto nell'analisi (e nella presentazione) dei risultati.

In conclusione, si è al cospetto di un insieme di fattori che, se debitamente considerati, avrebbero potuto generare una significativa incertezza di misura (e quindi un ragionevole dubbio ai sensi dell'art. 533 c.p.p.) rispetto a due distinti profili:

1. il primo riguarda la reale presenza di DNA sulla catenina, in quanto le tecniche della sospensione e dell'amplificazione PCR, ove applicate su quantità di materiale genetico troppo esigue, possono essere soggette a falsi positivi;
2. il secondo riguarda il fatto che il DNA rinvenuto sulla catenina (ammesso e non concesso che fosse davvero presente per i motivi indicati *sub a*) si trovasse sulla stessa a causa e/o in seguito all'evento omicidiario: la sua presenza potrebbe infatti essere stata frutto di una contaminazione causata dalle modalità di repertazione, trasferimento e analisi dei reperti.

CONCLUSIONI¹⁵⁵

Questo documento ha riassunto i risultati del progetto di ricerca biennale dal titolo *Verso una maggiore affidabilità della prova tecnico-scientifica per mezzo della metrologia forense. Un nuovo antidoto agli errori giudiziari*, finanziato nel 2022 dal PNRR (codice progetto 2022C9STX2).

Come evidenziato dal titolo, l'elemento centrale dell'intero progetto ha ruotato attorno all'impiego dei concetti e delle metodologie tipiche della metrologia in ambito forense. Sullo sfondo l'ipotesi che la cultura metrologica possa costituire un prezioso ausilio nella gestione della c.d. prova scientifica, in particolare (ma non soltanto) ai fini della valutazione dell'affidabilità dei risultati ottenuti tramite l'applicazione di tecniche e metodi delle scienze forensi, così minimizzando il rischio di "falsi positivi" (ossia, condanne ingiuste) nell'amministrazione della giustizia penale. In queste note conclusive si intende riassumere gli aspetti più significativi dei risultati ottenuti.

6.1 LA METROLOGIA: UN PREZIOSO ALLEATO PER COMPRENDERE E COMUNICARE I LIMITI INTRINSECI DELLA SCIENZA

L'incertezza è parte integrante della scienza moderna, che non è in grado di fornire "certezze" o "verità" assolute. La metrologia permette di comprendere, quantificare e comunicare l'incertezza e rappresenta un prezioso strumento per giungere a decisioni informate.

L'incertezza è parte integrante della scienza moderna. L'attualità espone il genere umano a situazioni di enorme complessità, e la scienza si è attrezzata con modelli sempre più raffinati (e con la necessaria potenza di calcolo) per analizzarli, senza però mai riuscire a fornire "certezze" o "verità" assolute. È infatti ormai unanimemente riconosciuto che l'incertezza è una componente intrinseca e inevitabile della scienza poiché non esiste disciplina sperimentale che possa dirsi del tutto libera da margini di errore.

¹⁵⁵Il Par. 6 è a cura di Alessandro Ferrero.

Ciò premesso, l'incertezza associata alle conclusioni a cui perviene la scienza è diventata, ormai da tempo, uno dei temi più complessi da gestire e comunicare, in tutti gli ambiti dell'agire umano.

La metrologia, con i suoi richiami a una costante e rigorosa valutazione dei limiti di validità della scienza, aiuta a comprendere, quantificare e comunicare l'incertezza. Essa può dunque rappresentare un prezioso alleato in tutti i contesti, come quello giudiziario, in cui i risultati forniti dalla scienza rappresentano la base per scelte e/o decisioni istituzionali.

6.2 LA METROLOGIA QUANTIFICA L'INCERTEZZA

Se le scienze forensi trattano un continuo di incertezze [Roux et al., 2022], la valutazione quantitativa dei vari contributi di incertezza è indispensabile per un corretto utilizzo delle evidenze scientifiche.

Il recente dibattito internazionale, ben sintetizzato dal PCAST report [PCAST, 2016] e dalla dichiarazione di Sidney [Roux et al., 2022], si è focalizzato sui metodi da impiegare per determinare la validità delle prove tecnico-scientifiche.

Elemento comune al dibattito è la quasi totale assenza di considerazioni quantitative, ancor più sorprendente in quanto la scienza non può prescindere da valutazioni quantitative e oggettive. Tutti i criteri identificati per assegnare validità a un metodo di scienza forense non contemplano una valutazione quantitativa sulla validità del metodo considerato, non consentendo, di fatto, di decidere su basi razionali quale metodo sia più appropriato per il caso considerato.

I metodi propri della metrologia consentono, come si è visto, di valutare l'incertezza del risultato di una misurazione ed è quindi possibile valutare, in modo quantitativo, il limite di validità del risultato di una prova scientifica.

6.3 LA METROLOGIA CONSENTE DI SELEZIONARE IL RILIEVO PIÙ AFFIDABILE

Nei casi in cui un fatto può essere ricostruito, in linea di principio, eseguendo rilievi sperimentali distinti, ma mutuamente esclusivi, la metrologia consente di valutare quello in grado di fornire risultati più affidabili.

Il PCAST report [PCAST, 2016] definisce la validità fondazionale di un metodo forense come la capacità del metodo stesso di essere, in linea di principio, affidabile. Si è visto, al Par. 2.2.3, che l'incertezza di definizione è in grado di fornire una valutazione quantitativa della validità fondazionale.

È pertanto possibile, in presenza di più metodi disponibili, valutare quale sia, per il caso concreto, il più affidabile e poi farne uso. Si tratta di un punto molto critico che può condizionare l'intero iter giudiziario.

Un caso esemplare è quello del delitto di Perugia, in cui, nell'analisi delle tracce repertate sull'arma del delitto, si privilegiò la ricerca del profilo genetico, apparentemente più affidabile, invece che accertarne la natura biologica [Ferrero & Scotti, 2023]. Se si fosse valutata l'incertezza del metodo, tenendo conto dell'esiguità del materiale biologico disponibile, ci si sarebbe immediatamente accorti della minore attendibilità di quest'ultimo metodo rispetto all'accertamento della natura biologica delle tracce e «sarebbe stato possibile consegnare al processo un dato dotato di formidabile rilievo probatorio»¹⁵⁶.

6.4 LA METROLOGIA CONSENTE DI QUANTIFICARE IL DUBBIO

Attraverso la valutazione dell'incertezza è possibile quantificare il dubbio che una decisione adottata sulla base di un risultato di misura sia errata.

Si è visto al Par. 2.3.4 che, quando il risultato di una misurazione è espresso in modo metrologicamente corretto, è possibile valutare il dubbio, espresso in termini probabilistici, che una decisione adottata sulla base di quel risultato non sia totalmente corretta.

Potrebbe sembrare che quanto affermato valga solo nei casi più semplici, ad esempio quando si tratta di accertare la guida in stato di ebbrezza o l'eccesso di velocità, in cui la decisione deriva direttamente dal confronto di un valore misurato con un limite di legge.

Si è però visto al Par. 2.3.3 che la metrologia definisce un metodo rigoroso per comporre diversi contributi di incertezza – e quindi di dubbio – e che questo metodo ha validità indipendentemente da come sono stati ottenuti i singoli contributi. Pertanto, la metrologia non è solamente uno “strumento” tecnico per definire e valutare l'affidabilità delle prove tecnico-scientifiche, ma offre una metodologia di valutazione del dubbio, incluso quello relativo a elementi di prova ottenuti con metodi tradizionali (ad esempio mediante le prove dichiarative), rendendo tale dubbio, per quanto possibile, oggettivo, quanto meno nel metodo seguito per valutarlo.

¹⁵⁶Cass. pen., sez. V, sent. n. 36080 del 27 marzo 2015.

6.5 LA CULTURA METROLOGICA COME ANTIDOTO AGLI ERRORI GIUDIZIARI

La cultura metrologica, attraverso la costante e rigorosa valutazione dei limiti di validità delle prove scientifiche, rappresenta un potente antidoto agli errori giudiziari.

È indubbio che lo sviluppo delle scienze forensi e dei metodi di valutazione delle tracce abbiano costituito un importante passo in avanti nella capacità di ricostruire i fatti in modo sempre più affidabile. È altrettanto indubbio – come ampiamente mostrato dall’analisi della letteratura – che questi stessi metodi, oltre a portare spesso a iter giudiziari discutibili, si sono talvolta rivelati la principale causa di clamorosi errori giudiziari.

L’analisi di questi casi sotto una prospettiva rigorosamente metrologica ha chiaramente evidenziato che la causa degli errori in cui è incorso il giudicante risiede in una scorretta – e talvolta inesistente – valutazione dei limiti di validità dell’informazione fornita.

La diffusione della cultura metrologica, basata sulla ricerca metodica delle possibili cause di incertezza e sulla rigorosa valutazione dei loro effetti sul risultato della misurazione, può pertanto costituire un potentissimo strumento a disposizione della pubblica accusa e del giudicante: in primo luogo, per chiedere ai tecnici incaricati dell’accertamento scientifico una rigorosa valutazione dei risultati ottenuti; in secondo luogo, per poter svolgere una rigorosa valutazione dell’affidabilità di questi risultati, basata sull’applicazione del dubbio metodico. In tal modo sarebbe possibile minimizzare (o comunque ridurre) il rischio di condanne ingiuste e, ancor prima, di accuse mal impostate e smentite, solo a distanza di anni, da sentenze di assoluzione, con buona pace della presunzione di innocenza e con danni esistenziali incommensurabili e irreparabili per le persone coinvolte.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [Aa.Vv., 2001] Aa.Vv. (2001). *Le indagini difensive*. Milano: Ipsoa.
- [A.a.Vv., 2011] A.a.Vv. (2011). *Scienza e processo penale*. Cedam: Padova.
- [A.a.Vv., 2022] A.a.Vv. (2022). *Prova scientifica e processo penale*. Cedam: Padova.
- [Adorno, 1997] Adorno, R. (1997). Sull'incompatibilità del consulente tecnico nominato dal pubblico ministero ex art. 359 c.p.p. *Cassazione penale*, (7-8), 2149-2155.
- [Aprile & Silvestri, 2002] Aprile, E. e Silvestri, P. (2002). *La formazione della prova penale dopo le leggi sulle indagini difensive e sul "giusto processo"*. Milano: Giuffrè.
- [Barone, 2025] Barone, G. (2025). La metrologia forense: il convitato di pietra nell'incontro tra scienza forense e procedimento penale? *Cassazione penale*, (pp. 574–586).
- [Basile, 2018] Basile, F. (2018). L'utilizzo di conoscenze scientifiche nel processo penale, tra junk science e "legittima ignoranza" del giudice. *Studium Iuris*, (2), 172-177.
- [Berger, 2000] Berger, M. (2000). Expert testimony: the supreme court's rules. *Science & Technology*, (pp. 58 ss.).
- [Bernstein & Jackson, 2004] Bernstein, D. e Jackson, J. (2004). The daubert trilogy in the states. *Jurimetrics*, (pp. 351 ss.).
- [BIPM CIPM, 1999] BIPM CIPM (1999). *Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes – MRA*. Disponibile su: <https://tinyurl.com/59f3byu5>.
- [Caianiello, 2022] Caianiello, M. (2022). *L'ammissione della prova scientifica nel processo italiano*, (pp. 189-2003). Cedam: Padova.
- [Canzio, 2022] Canzio, G. (2022). *La motivazione della sentenza e la prova scientifica: "reasoning by probabilities"*, (pp. 3-19). Cedam: Padova.
- [Capone, 2018] Capone, A. (2018). *La motivazione della sentenza*, (pp. 297 ss.). Giappichelli: Torino.
- [Carlizzi, 2019] Carlizzi, G. (2019). *La valutazione della prova scientifica*. Milano: Giuffrè.

- [Chiavario, 2003] Chiavario, M. (2003). *Commento al nuovo codice di procedura penale*, volume II. Torino: Utet.
- [Consolo, 1990] Consolo, O. (1990). *Perito ed interprete - Dir. proc. pen.*, volume XIII. Roma: Istituto dell'Enciclopedia Italiana fondata da Giovanni Treccani.
- [Conte & Loforte, 2006] Conte, M. e Loforte, R. (2006). *Gli accertamenti tecnici nel processo penale*. Milano: Giuffrè.
- [Conti, 2008] Conti, C. (2008). Iudex peritus peritorum e ruolo degli esperti nel processo penale. *Diritto penale e processo*, (pp. 29-36).
- [Conti, 2019] Conti, C. (2019). Scienza controversa e processo penale: la cassazione e il “discorso sul metodo”. *Diritto penale e processo*, (pp. 848-861).
- [Cossignani, 1997] Cossignani, M. (1997). I consulenti tecnici del p.m. tra limiti normativi e distorsioni applicative. *Diritto penale e processo*, (3), 2149-2155.
- [Dean, 1992] Dean, G. (1992). *Consulenza tecnica*, volume VI. Torino: Utet, Digesto delle discipline penalistiche.
- [Decisione Quadro 2009/905/GAI, 2009] Decisione Quadro 2009/905/GAI (2009). *Decisione Quadro 2009/905/GAI del Consiglio UE: Accredimento dei fornitori di servizi forensi che effettuano attività di laboratorio*. Disponibile su: <https://tinyurl.com/2eayzxsj>.
- [Di Paolo, 2017] Di Paolo, G. (2017). *L'art. 546, comma 1, lett. e): verso un nuovo modello normativo di motivazione “in fatto” della sentenza penale?*, (pp. 241 ss.). Wolters-Kluwer, CEDAM: Milano.
- [Dominioni, 2005] Dominioni, O. (2005). *La prova scientifica nel processo penale. Gli strumenti scientifico-tecnici nuovi o controversi e di elevata specializzazione*. Milano: Giuffrè.
- [Dominioni, 2007] Dominioni, O. (2007). Prova scientifica - diritto processuale penale. In *Enciclopedia del Diritto - Annali - III*. Milano: Giuffrè.
- [Ferrero et al., 2015] Ferrero, A., Petri, D., Carbone, P., e Catelani, M. (2015). *Measurement Models and Uncertainty*, (pp. 1-45). Wiley - IEEE Press: Hoboken, NJ, USA.
- [Ferrero & Salicone, 2006] Ferrero, A. e Salicone, S. (2006). Measurement uncertainty. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 9(3), 44-51.

- [Ferrero & Scotti, 2023] Ferrero, A. e Scotti, V. (2023). *Metrologia forense. Un'introduzione ai principi della metrologia per magistrati, avvocati e periti forensi*. Esculapio Ingegneria. Bologna: Società Editrice Esculapio.
- [Focardi, 2003a] Focardi, F. (2003a). *La consulenza tecnica extraperitale delle parti private*. Padova: Cedam.
- [Focardi, 2003b] Focardi, F. (2003b). *La consulenza tecnica extraperitale delle parti private*. Padova: Cedam.
- [Fortuna et al., 2007] Fortuna, E., Giustozzi, R., Fassone, E., e S., D. (2007). *Manuale pratico del processo penale*. Padova: Cedam.
- [Frigo, 1988] Frigo, G. (1988). Il consulente tecnico della difesa nel nuovo processo penale. *Cassazione penale*, (12), 2177-2191.
- [Gennari, 2022] Gennari, G. (2022). *I criteri di ammissione della prova scientifica nel contesto internazionale*, (pp. 157-188). Cedam: Padova.
- [Gianniti, 2005] Gianniti, P. (2005). *La valutazione della prova peritale*. Torino: Utet.
- [Gill, 2014] Gill, P. (2014). *Misleading DNA Evidence: Reasons for Miscarriages of Justice*. Londra: Elsevier.
- [Giunta, 2020] Giunta, F. (2020). I consulenti delle parti sono uguali davanti al giudice (ma quello del pm è più credibile). *Discrimen*, (pp. 1-3).
- [Gualtrieri, 2002] Gualtrieri, P. (2002). *Le investigazioni del difensore*. Padova: Cedam.
- [Imwinkelried, 2012] Imwinkelried, E. J. (2012). Forensic metrology: The new honesty about the uncertainty of measurements in scientific analysis. *UC Davis Legal Studies Research Paper No. 317*.
- [ISO/IEC 99, 2007] ISO/IEC 99 (2007). *ISO/IEC Guide 99:2007. International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*.
- [ISO/IEC Guide 98-3, 2008] ISO/IEC Guide 98-3 (2008). *ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*.

- [JCGM 100, 2008] JCGM 100 (2008). *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, (GUM 1995 with minor corrections)*. Joint Committee for Guides in Metrology.
- [JCGM 101, 2008] JCGM 101 (2008). *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. Joint Committee for Guides in Metrology.
- [JCGM 200, 2012] JCGM 200 (2012). *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 2008 with minor corrections)*. Joint Committee for Guides in Metrology.
- [Kostoris, 1993] Kostoris, R. (1993). *I consulenti tecnici nel processo penale*. Milano: Giuffrè.
- [Kostoris, 2020] Kostoris, R. (28 settembre 2020). Una grave mistificazione inquisitoria: la pretesa fede privilegiata del responso del consulente tecnico dell'accusa. *Sistema penale*.
- [Mendoza et al., 1994] Mendoza, R., Marcon, G., e Marcon, L. (1994). *La perizia e la consulenza nel processo penale*. Padova: Cedam.
- [Mura, An. & Mura, Al., 2018] Mura, An. e Mura, Al. (2018). *Probabilità e prova penale. Profili epistemologici nel contesto giurisprudenziale*, (pp. 241-293). Giappichelli: Torino.
- [PCAST, 2016] PCAST (2016). *Report to the President – Forensic Science in Criminal Courts: Ensuring Scientific Validity of Feature – Comparison Methods*. Disponibile su: <https://tinyurl.com/abv5mufh>.
- [Perchinunno, 1968] Perchinunno, V. (1968). Limiti ed effetti dell'attività del coadiutore peritale non autorizzato. *Rivista italiana di diritto e procedura penale*.
- [Pressacco, 2025] Pressacco, L. (2025). Il cosiddetto “PCAST report” e l'evoluzione delle discipline forensi nel recente dibattito nordamericano. *Cassazione penale*, (pp. 1358 – 1364).
- [Regolamento (EC) No 765/2008, 2008] Regolamento (EC) No 765/2008 (2008). *Regolamento (CE) n. 765/2008 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 9 luglio 2008, che pone norme in materia di accreditamento e vigilanza del mercato per quanto riguarda la commercializzazione dei prodotti e che abroga il regolamento (CEE) n. 339/93*. Disponibile su: <https://tinyurl.com/5ak9dhw4>.
- [Rivello, 2014] Rivello, P. (2014). *La prova scientifica*. Milano: Giuffrè.

- [Rivello, 2017] Rivello, P. (2017). La necessità di evitare l'ingresso della junk science nelle aule giudiziarie: un ripensamento circa alcune ricorrenti affermazioni. *Diritto penale contemporaneo*, (pp. 19-30).
- [Roux et al., 2022] Roux, C., Bucht, R., Crispino, F., De Forest, P., Lennard, C., Margot, P., Miranda, M. D., NicDaeid, N., Ribaux, O., Ross, A., e Willis, S. (2022). The sydney declaration – revisiting the essence of forensic science through its fundamental principles. *Forensic Science International*, 332, 111182.
- [Sacks, 2000] Sacks, M. (2000). The aftermath of daubert: an evolving jurisprudence of expert evidence. *Jurimetrics*, (pp. 229 ss.).
- [Salvinelli, 1991] Salvinelli, R. (1991). La perizia medico legale nel nuovo codice di procedura penale. *Giustizia penale*, (7), 389-399.
- [Siracusano et al., 1990] Siracusano, D., Galati, A., Tranchina, G., e Zappalà, E. (1990). *Diritto processuale penale*, volume I. Milano: Giuffrè.
- [Spangher, 2008] Spangher, G. (2008). *Trattato di procedura penale*, volume II. Torino: Utet.
- [Spangher, 2020] Spangher, G. (2020). La cassazione giustifica la “disparità delle armi”. *Giurisprudenza italiana*, (12), 2777-2778.
- [Sterlocchi, 2011] Sterlocchi, C. (2011). *Gli standards di ammissibilità della prova scientifica nel processo statunitense*, (pp. 397-413). Cedam: Padova.
- [Taormina, 1972] Taormina, C. (1972). Natura giuridica della perizia e riflessi sui poteri di accertamento del perito. *Foro italiano*, (10), 389-407.
- [Taormina, 2007] Taormina, C. (2007). *Il regime della prova nel processo penale*. Torino: Giappichelli.
- [Tonini, 2011] Tonini, P. (2011). La cassazione accoglie i criteri daubert sulla prova scientifica. riflessi sulla verifica delle massime di esperienza. *Diritto penale e processo*, (pp. 1341-1347).
- [Tonini & Cecchi, 2023] Tonini, P. e Cecchi, M. (2023). *Nozione e definizione di prova scientifica*, (pp. 17-40). Giuffrè: Milano.
- [Ubertis, 1995] Ubertis, G. (1995). *La prova penale. profili giuridici ed epistemologici*. Torino: Utet.

- [Ubertis, 2007] Ubertis, G. (2007). *La prova scientifica e la nottola di Minerva*, (pp. 83-91). Cedam: Padova.
- [Ubertis, 2019] Ubertis, G. (2019). Il giudice la scienza e la prova. *Cassazione penale*, (pp. 4111-4119).
- [Ubertis, 2021] Ubertis, G. (2021). *Profili di epistemologia giudiziaria*. Milano: Giuffré.
- [UNI CEI 70098-3, 2016] UNI CEI 70098-3 (2016). *UNI CEI 70098-3:2016. Incertezza di misura - Parte 3: Guida all'espressione dell'incertezza di misura*.
- [UNI CEI 70099, 2008] UNI CEI 70099 (2008). *UNI CEI 70099:2008. Vocabolario Internazionale di Metrologia - Concetti fondamentali e generali e termini correlati (VIM)*.
- [UNI CEI EN ISO/IEC 17025, 2018] UNI CEI EN ISO/IEC 17025 (2018). *UNI CEI 17025:2018. Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e taratura*.
- [Vickers, 2005] Vickers, L. (2005). Daubert, critique and interpretation: what empirical studies tell us about the application of daubert. *University of San Francisco Law Review*, (pp. 137 ss.).
- [Vicoli, 2000] Vicoli, D. (2000). Consulenza tecnica extraperitale, diritto alla prova e patrocinio a spese dello stato. *Giurisprudenza italiana*, (3), 575-578.

Il presente Libro Bianco si propone di offrire una sintesi dei risultati più significativi del progetto di ricerca biennale *Verso una maggiore affidabilità della prova tecnico-scientifica per mezzo della metrologia forense. Un nuovo antidoto agli errori giudiziari* (codice progetto 2022C9STX2), finanziato dall'Unione europea – Next Generation EU, nell'ambito del bando PRIN 2022 del Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR). Come evidenziato dal titolo, l'elemento centrale dell'intero progetto ha ruotato attorno all'impiego dei concetti e delle metodologie tipiche della metrologia in ambito forense. L'idea di fondo è che la cultura metrologica possa costituire un prezioso ausilio nella gestione della c.d. prova scientifica, in particolare (ma non soltanto) ai fini della valutazione dell'affidabilità dei risultati ottenuti tramite l'applicazione di tecniche e metodi delle scienze forensi, così da minimizzare il rischio di “falsi positivi” (ossia, di condanne ingiuste) nell'amministrazione della giustizia penale.

Curatori:

Gabriella Di Paolo è professore ordinario di Diritto processuale penale presso la Facoltà di Giurisprudenza dell'Università di Trento.

Alessandro Ferrero è professore ordinario di Misure elettriche ed elettroniche presso il Politecnico di Milano.

Dario Petri è professore ordinario di Misure elettriche ed elettroniche presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Trento.