

## Una visione d'insieme della comunità elettrochimica Italiana

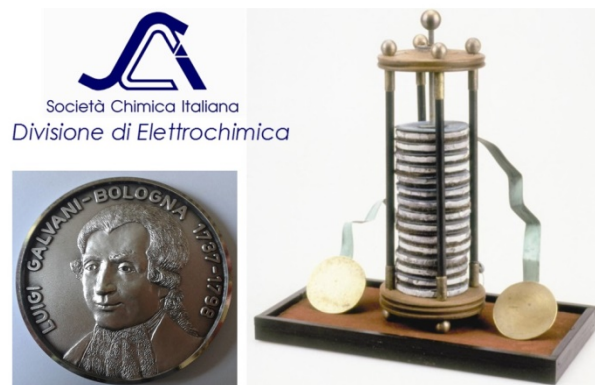
Marco Musiani

IENI CNR Padova

Presidente della Divisione di Elettrochimica della SCI

[m.musiani@ieni.cnr.it](mailto:m.musiani@ieni.cnr.it)

Questo articolo presenta inizialmente la storia, le principali attività e la composizione della Divisione di Elettrochimica della SCI, essenziale punto di riferimento della comunità elettrochimica nazionale. Nella seconda parte vengono riassunti alcuni recenti risultati di ricerca che dimostrano la rilevanza delle attività svolte dagli elettrochimici italiani in settori di vitale importanza quali l'energia, l'ambiente, i materiali e la salute.



### An Overview on the Italian Electrochemical Community

This paper reports first on history, main activities and composition of the Electrochemistry Division of the Italian Chemical Society (SCI), an essential landmark for the electrochemical community. Then, in the second part, some recent research results are summarized to prove the relevance of the activities carried out by Italian electrochemists in key scientific domains like energy, environment materials and health.

Questo articolo trae origine dall'invito che mi è stato rivolto, in quanto presidente della Divisione di Elettrochimica della SCI (DE-SCI), di presentare la comunità elettrochimica italiana ai colleghi francofoni convenuti a Roma per le *Journées d'Electrochimie* (JE 2015 - Roma, 6-10 luglio 2015). Riassumendo il contenuto della mia conferenza, in questo articolo, descrivo brevemente la storia della Divisione di Elettrochimica della SCI, le sue attività principali, le sue interazioni con società elettrochimiche internazionali, la distribuzione degli elettrochimici sul territorio nazionale. Proseguo con brevi sezioni dedicate alla didattica dell'elettrochimica in Italia ed alle realtà industriali del settore. Nella parte finale dell'articolo esamino i principali interessi scientifici degli elettrochimici italiani e metto in luce alcuni dei principali risultati di ricerca ottenuti nell'ultimo quinquennio, selezionati tenendo conto principalmente degli articoli scientifici più citati.

La Divisione di Elettrochimica della SCI è un punto di riferimento privilegiato per la comunità elettrochimica nazionale anche se, al pari dell'intera Società, ha difficoltà a raccogliere con continuità l'adesione e il sostegno di tutti i docenti, ricercatori e tecnici che, in università, enti di ricerca ed aziende, si occupano della disciplina. Nello specifico, esiste un problema di identità. Gli elettrochimici italiani attivi in dipartimenti di chimica e chimica industriale sono considerati (e si considerano) a volte chimici fisici, altre volte chimici analitici. Quelli che operano in dipartimenti di ingegneria non sempre vedono la SCI come società scientifica di riferimento.

La nascita della DE-SCI si può fare risalire all'iniziativa di un comitato promotore composto da Giuseppe Bianchi, Luisa Peraldo Bicelli e Giovanni Serravalle che ne proposero la costituzione nel 1974, ben 65 anni dopo la nascita della SCI. Questa nascita tardiva è tanto più sorprendente se si considera che l'Italia fu uno dei paesi che contribuirono alla fondazione del CITCE (*Comité International de Thermodynamique et de Cinétique Electrochimiques*) nell'immediato dopoguerra (Bruxelles, 30 marzo 1949), divenuto nel 1970 l'*International Society of Electrochemistry*. Come si legge in un articolo di Marcel Pourbaix e Pierre Van Rysselberghe [1], Roberto Piontelli, Università Statale di Milano, fu uno dei fondatori del CITCE, elencati nella Tab. 1. Fu anche l'organizzatore del secondo congresso del CITCE (Milano, 1950) e, come scrive ancora Marcel Pourbaix, "trasformò il nostro piccolo comitato in una vera associazione internazionale" [2]. Antecedente alla nascita della DE-SCI è anche la prima presidenza italiana dell'ISE (all'epoca ancora CITCE), quella di Giuseppe Bianchi (1969), alla quale hanno fatto seguito la presidenza di Patrizio Gallone (1979-80) e quella di Sergio Trasatti (1989-90).

<b>Tab. 1</b> <b>Fondatori del CITCE (Comité International de Thermodynamique et de Cinétique Electrochimiques), divenuto ISE (International Society of Electrochemistry) nel 1970</b>	
<b>Nazione</b>	<b>Scienziati</b>
Belgio	C. Boute J. Gillis A. Juliard M. Pourbaix (Segretario Generale-Tesoriere)
Stati Uniti	P. Delahay P. Van Rysselberghe (Presidente)
Regno Unito	J. O'M. Bockris T.P. Hoar
Francia	G. Charlot G. Valensi
<b>Italia</b>	<b>R. Piontelli</b>
Paesi Bassi	W.G. Burgers
Cecoslovacchia	J. Heyrovsky (Premio Nobel 1959 per la Chimica)

<b>Tab. 2</b> <b>Presidenti della Divisione Electrochimica SCI</b>	
<b>Anni</b>	<b>Presidente</b>
1975-1977	Filippo Accascina
1978-1980	Giovanni Serravalle
1981-1983	Giordano TrabANELLI
1984-1989	Rolando Guidelli
1990-1992	Elio Vianello
1993-1995	Bruno Scrosati
1996-1998	Marina Mastragostino
1999-2001	Sergio Trasatti
2002-2004	Aldo Magistris
2005-2007	Sandra Rondinini
2008-2010	Achille De Battisti
2011-2013	Aldo Magistris
2014-2016	Marco Musiani

La Tab. 2 elenca i presidenti che si sono succeduti alla guida della Divisione. Fra questi, per il loro prestigio scientifico internazionale e per il servizio reso alla Divisione, Rolando Guidelli, Bruno Scrosati e Sergio Trasatti sono stati premiati, nel 2007, con il Sigillo d'oro della SCI. Gli stessi scienziati figurano in posizione eminente nell'elenco degli elettrochimici italiani che hanno ottenuto riconoscimenti da società scientifiche internazionali, quali i premi elencati in Tab. 3 e la qualifica di *Fellow dell'Electrochemical Society - ECS* (Trasatti e Scrosati), *Fellow dell'ISE* (Scrosati e Guidelli) o *Honorary Member dell'ISE* (Trasatti).

<b>Tab. 3</b> <b>Premi attribuiti da società scientifiche internazionali ad elettrochimici italiani (2005-2014)</b>			
<b>Anno</b>	<b>Premio</b>	<b>Società Scientifica</b>	<b>Premiato</b>
2005	Katsumi Niki Prize for Bioelectrochemistry	ISE	Rolando Guidelli
2005	Oronzio and Niccolò De Nora Foundation Prize of ISE on Electrochemical Technology and Engineering	ISE	Marco Panizza
2006	Volta Award	ECS	Bruno Scrosati
2006	Hans-Jürgen Engell Prize	ISE	Monica Santamaria
2007	Olin Palladium Medal	ECS	Sergio Trasatti
2007	Oronzio and Niccolò De Nora Foundation Prize of ISE on Electrochemical Energy Conversion	ISE	Priscilla Reale
2009	Giulio Milazzo Prize	BES*	Rolando Guidelli
2014	Jaroslav Heyrovsky Prize for Molecular Electrochemistry	ISE	Flavio Maran

\*BES = Bioelectrochemical Society

Le attività della Divisione di Electrochimica comprendono:

- l'organizzazione di un congresso nazionale che si svolge annualmente come evento indipendente, denominato Giornate dell'Electrochimica Italiana, o all'interno del congresso della Società.
- l'organizzazione di scuole di elettrochimica destinate a personale in formazione e giovani ricercatori e tecnici, con cadenza approssimativamente triennale.
- l'assegnazione di premi per i migliori laureati magistrali e dottori di ricerca, conferiti ogni anno.
- l'assegnazione della Medaglia Luigi Galvani (Fig. 1), destinata a premiare uno scienziato che abbia fornito eccezionali contributi al progresso della scienza elettrochimica. La medaglia è assegnata dal consiglio direttivo della Divisione e, per regolamento, non può essere attribuita ad un italiano. Il prestigioso albo d'oro della Medaglia Galvani è riportato nella Tab. 4.



Fig. 1  
Medaglia Galvani, assegnata dalla Divisione di Elettrochimica ad uno scienziato che abbia fornito eccezionali contributi al progresso della scienza elettrochimica

Tab. 4  
Albo d'oro della Medaglia Luigi Galvani

Anno	Vincitore
1986	Roger Parsons, Regno Unito
1988	Heinz Gerischer, Germania
1991	Brian E. Conway, Canada
1992	Allen J. Bard, USA
1994	Marcel Pourbaix, Belgio
1997	Jean Michel Savéant, Francia
1998	Colin Vincent, Regno Unito
2000	Dieter Kolb, Germania
2002	Alejandro J. Arvia, Argentina
2004	Royce W. Murray, USA
2007	Christian Amatore, Francia
2009	Michael Grätzel, Svizzera
2011	Akira Fujishima, Giappone
2015	Philip Bartlett, Regno Unito

La Divisione di Elettrochimica ha accordi di collaborazione con l'International Society of Electrochemistry (ISE), firmato nel 2001, e con il Groupe d'Electrochimie de la Societ  Chimique de France, firmato quest'anno, durante le Journées d'Electrochimie.

I soci della Divisione, cos  come i soci italiani dell'ISE, sono distribuiti in maniera eterogenea sul territorio nazionale. Alcuni dati sono riassunti nella Tab. 5. A fine 2014, due terzi dei soci della Divisione e tre quarti dei soci ISE erano concentrati in Piemonte, Lombardia, Veneto ed Emilia. Fra le regioni con nulla o insufficiente presenza di soci si devono purtroppo contare regioni molto popolate, come Campania e Puglia, e regioni, come la Toscana, con una tradizione di ricerca elettrochimica di alto livello, anche in tempi recenti.

Tab. 5  
Distribuzione geografica dei soci della Divisione di Elettrochimica della SCI e dei soci italiani dell'ISE

Regione (popolazione in milioni)	Soci DE-SCI effettivi + aderenti	Soci ISE
Abruzzo (1,3)	3 + 1	0
Basilicata (0,6)	2 + 1	2
Calabria (2,0)	0 + 1	0
Campania (5,9)	0 + 3	0
Emilia (4,4)	8 + 2	23
Friuli (1,2)	0 + 0	0
Lazio (5,9)	12 + 8	4
Liguria (1,6)	3 + 0	2
Lombardia (10,0)	28 + 4	30
Marche (1,6)	4 + 1	0
Molise (0,3)	0 + 0	0
Piemonte (4,6)	9 + 3	6
Puglia (4,1)	0 + 1	2
Sardegna (1,7)	1 + 2	5
Sicilia (5,1)	7 + 0	9
Toscana (3,8)	2 + 5	3
Trentino Alto Adige (1,1)	0 + 0	1
Umbria (0,9)	0 + 2	0
Valle d'Aosta (0,1)	0 + 0	0
Veneto (4,9)	21 + 5	21

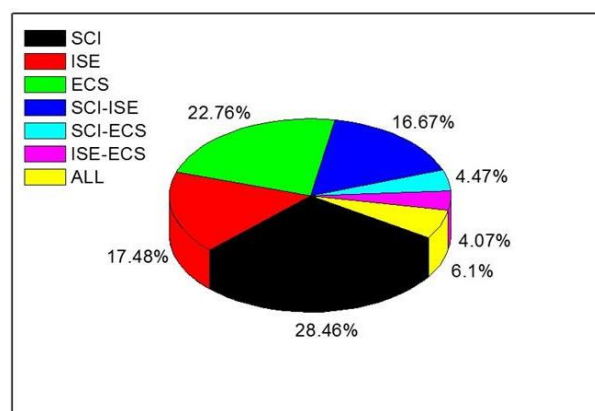
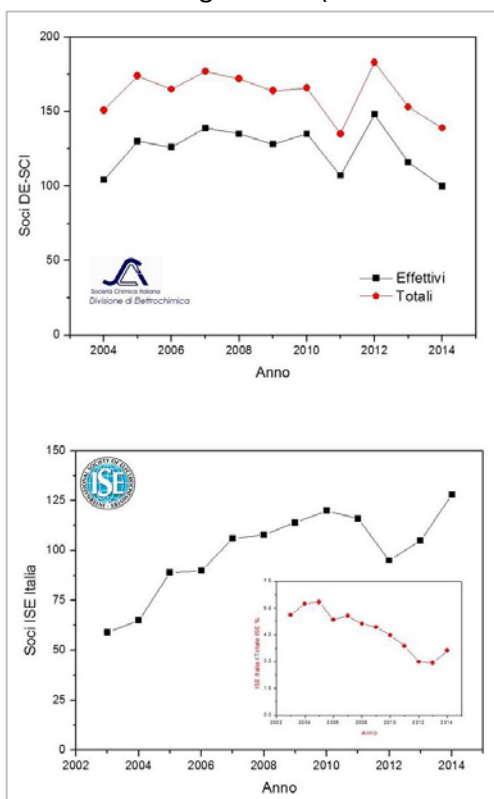


Fig. 2  
Appartenenza degli elettrochimici italiani alle principali societ  scientifiche del settore: Divisione di Elettrochimica della SCI, International Society of Electrochemistry (ISE), Electrochemical Society (ECS)

Combinando i soci della Divisione, quelli dell'ISE e quelli dell'*Electrochemical Society* (Sezione Europea) si raggiunge un totale di circa 250 unità. La Fig. 2 mostra la ripartizione nelle varie Società. Solo il 6% è simultaneamente iscritto alle tre società, mentre il 69% appartiene ad una sola di esse. Il più alto grado di sovrapposizione si osserva fra SCI ed ISE.

Un confronto dell'evoluzione del numero di soci della Divisione, durante l'ultimo decennio dimostra una sostanziale stagnazione (i dati 2015 sono comunque già migliori di quelli dell'anno precedente), in evidente



contrasto con la crescita del numero dei membri ISE, nello stesso periodo (Fig. 3). Va però osservato che il peso relativo dell'elettrochimica italiana nell'ISE è diminuito, perché nel nostro paese l'elettrochimica non ha attratto gli investimenti che altrove hanno determinato una spettacolare crescita della disciplina (l'ISE è passata in un decennio da poco più di 1.000 ad oltre 3.500 soci attivi).

Fig. 3 Confronto fra l'evoluzione nel tempo del numero di soci SCI, Divisione di Elettrochimica, e soci ISE

La crescita della Divisione è inibita anche dal modesto spazio riservato all'insegnamento dell'elettrochimica nelle università italiane. Nei corsi di laurea triennali, elementi di base di elettrochimica vengono insegnati solo nell'ambito dei corsi di chimica fisica o chimica analitica. Questa posizione marginale dell'elettrochimica nell'insegnamento universitario penalizza le carriere degli specialisti del settore e spinge i giovani ricercatori a preferire altre discipline. È un sintomo della bassa visibilità della disciplina anche il fatto che nessuno degli istituti del CNR nei quali si svolge ricerca elettrochimica di qualità abbia la parola "elettrochimica" nel proprio nome, favorendo altre parole chiave quali energetica, materiali, nanostrutture.

In ambito industriale, la più importante realtà nazionale è costituita dalle Industrie De Nora, la sola azienda con *core business* elettrochimico iscritta all'AIRI (Associazione Italiana di Ricerca Industriale). Presente con i suoi impianti in Europa, in Asia e nelle Americhe, De Nora ha centri di ricerca in Italia, USA e Giappone, nei quali operano circa 100 ricercatori. Costruita la propria fama grazie ai DSA (*Dimensionally Stable Anodes*), De Nora si rivolge ora a mercati diversificati che comprendono la purificazione dell'acqua, l'agricoltura, l'elettrodeposizione in ambito elettronico, lo sfruttamento delle risorse minerarie, la qualità del cibo. Le industrie De Nora interagiscono largamente col mondo accademico italiano ed internazionale, attraverso la Fondazione Oronzio e Niccolò De Nora che, fra le altre attività, sponsorizza premi della nostra Divisione, dell'ISE e dell'ECS, destinati principalmente a giovani elettrochimici.

Un elenco, non esaustivo, di altre importanti imprese del panorama nazionale non può non comprendere Engitec (impianti e processi per il recupero di metalli non ferrosi), FIAMM (Batterie al piombo), Solvay (membrane per batterie e celle a combustibile), Chemical Newtech (cloro-soda, trattamento delle acque). È presente anche un gran numero di imprese galvaniche la cui società scientifica di riferimento è però l'AIFM (Associazione italiana di finitura metalli).

Gli elettrochimici italiani sono presenti in tutti i maggiori settori di ricerca. Confrontando i loro interessi con quelli dei colleghi di tutto il mondo, sulla base dell'appartenenza alle divisioni dell'ISE (elettrochimica analitica, bioelettrochimica, conversione ed accumulo di energia, scienza dei materiali, ingegneria elettrochimica, elettrochimica molecolare ed elettrochimica fisica) si riscontra un sostanziale parallelismo. Si può anche apprezzare la focalizzazione preferenziale dell'attività su energia e materiali, mentre è numericamente inferiore alla media mondiale la presenza di studiosi di bioelettrochimica, un settore in rapida espansione.

Per illustrare l'attività scientifica degli elettrochimici, nel seguito di questo testo, riassumo molto brevemente alcuni degli articoli di autori italiani, pubblicati nel periodo 2010-2014, selezionati in base al numero di citazioni ricevute (a marzo 2015). Sono escluse le reviews. Per fornire una rappresentazione ampia, quantunque incompleta, della comunità elettrochimica nazionale, viene discusso un massimo di due articoli per gruppo. Gli articoli sono raggruppati in base al loro tema.

Nell'articolo più citato, Scrosati e Hassoun [3], in collaborazione con un gruppo coreano, descrivono una batteria litio-aria che presenta notevole stabilità di prestazioni in cicli di carica-scarica. Il processo che si realizza durante la scarica è:  $\text{Li} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Li}_2\text{O}_2$ . Esso comporta la formazione, come intermedio, di un radicale anione  $\text{O}_2^{\cdot-}$ , molto reattivo, che attacca i comuni solventi (ad esempio propilene carbonato). Gli autori dimostrano, combinando risultati elettrochimici e diffrazione di raggi X, che l'interconversione fra Li e  $\text{Li}_2\text{O}_2$  può essere condotta reversibilmente impiegando come solvente il dimetil etere del tetra(etilene glicole) ed il Li triflato come elettrolita.

Identificare combinazioni solvente-elettrolita per batterie al litio che siano sicure e termicamente stabili è lo scopo dell'attività di altri gruppi. Un articolo pubblicato da autori delle università di Pavia, Torino e Palermo [4], propone l'impiego di un elettrolita gel risultante dalla combinazione di tre componenti: una membrana polimerica impregnata di una soluzione di un sale di litio, un liquido ionico e silice (mesoporosa o nano-strutturata). Questo materiale ha adeguate proprietà di stabilità termica, conduttività elettrica e numero di trasporto dello ione  $\text{Li}^+$ . In un altro articolo focalizzato sulla sicurezza delle batterie al Li, autori dell'università di Bologna [5] mostrano che l'aggiunta di un liquido ionico a temperatura ambiente ai tradizionali solventi organici (propilene carbonato e dimetilcarbonato) ne migliora significativamente la resistenza termica e ne abbassa l'infiammabilità, conservandone l'alta conduttività elettrica.

Per concludere la sezione riservata alle batterie, va citato l'articolo di Hassoun e Scrosati [6] che descrive un innovativo approccio alla preparazione di batterie litio-zolfo. Esse sono assemblate allo stato di completa scarica, impiegando compositi C/ $\text{Li}_2\text{S}$  e Sn/C 1:1 come catodo ed anodo rispettivamente, ed una membrana tipo gel impregnata di una soluzione di  $\text{LiPF}_6$  in etilene carbonato-dimetilcarbonato, saturata con  $\text{Li}_2\text{S}$ . In questo modo la dissoluzione del materiale attivo sotto forma di litio polisolfuro, che causa grave decadimento della capacità, è sostanzialmente eliminata. La batteria può essere caricata forzando la reazione  $8 \text{Li}_2\text{S} \rightarrow 16 \text{Li} + \text{S}_8$  e dimostra buona ciclabilità.

Importanti attività di ricerca puntano allo sviluppo di materiali elettrolitici per celle a combustibile. Il gruppo di Di Noto, Università di Padova [7], descrive membrane per PEMFC che possono essere utilizzate a temperature fino a 155 °C. Esse consistono di una combinazione di Nafion 117 neutralizzate con trietilammina e impregnate con un liquido ionico (trietilammonio triflato). Nel campo delle SOFC, un articolo del gruppo di Traversa, Università di Roma «Tor Vergata» [8] dimostra che elettroliti solidi a base di bario zirconato dopato con ittrio, cresciuti epitassialmente su  $\text{MgO}$  o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mediante deposizione laser pulsata hanno prestazioni superiori a quelle dei migliori conduttori di ossigeno noti ( $\text{Ce}_{0,8}\text{Gd}_{0,2}\text{O}_{1,9-\delta}$  o  $\text{La}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{Mg}_{0,2}\text{O}_3$ ), a temperature di 400-700 °C.

Nel campo dell'elettrocatalisi, è degno di nota l'articolo in cui Rondinini, Vertova e Minguzzi, Università di Milano [9], in collaborazione col prestigioso gruppo della *University of Texas at Austin* di A.J. Bard, propongono l'impiego di diagrammi dinamici potenziale-pH per rappresentare l'attività catalitica di diversi materiali. Questi diagrammi consentono di riassumere, in documenti di facile consultazione, la dipendenza dell'attività catalitica dalle condizioni d'impiego e di confrontare diversi catalizzatori.

Un argomento di ricerca attivamente studiato in vari dipartimenti di ingegneria (in particolare nelle università di Palermo, Cagliari, Roma e Genova) è l'impiego di tecnologie elettrochimiche per il recupero ambientale. A titolo di esempio, si può citare il lavoro di Panizza ed Oturan [10] che hanno mostrato come la mineralizzazione di un colorante organico (rosso di alizarina) possa essere realizzata in modo quantitativo col metodo elettro-Fenton. La riduzione bieletronica dell'ossigeno ad  $\text{H}_2\text{O}_2$  in presenza di  $\text{Fe}^{2+}$  porta alla formazione di radicali  $\text{OH}^{\cdot}$  in grado di attaccare substrati organici ed ossidarli a  $\text{CO}_2$  con elevata efficienza. Il  $\text{Fe}^{2+}$  viene continuamente rigenerato per riduzione dello ione  $\text{Fe}^{3+}$  prodotto nella reazione  $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^- + \text{OH}^{\cdot}$ .

Il gruppo di Paolucci e Marcaccio, Università di Bologna, ha pubblicato articoli che illustrano le potenzialità dell'elettrochimica molecolare nei settori della elettrocatalisi e dell'elettroanalitica. Risultato di una collaborazione fra gruppi di Austria, Spagna e Italia, il primo articolo [11] descrive un sofisticato metodo di preparazione di anodi elettrocatalitici per l'evoluzione di ossigeno. Essi consistono di nanotubi di carbonio modificati con dendrimeri, ad essi legati in modo covalente, i quali, grazie ad una interazione elettrostatica, fissano clusters tetra-rutenato. L'evoluzione di ossigeno avviene con TOF (*turn over frequency*) comparabile a quella osservata in catalisi omogenea. Le sovratensioni e le pendenze di Tafel misurate sono elevate, al confronto dei migliori catalizzatori disponibili e,



congiuntamente ad una insufficiente stabilità, escludono immediate ricadute applicative. Tuttavia, il lavoro è una importante *proof of concept*.

In un altro articolo [12], pubblicato in collaborazione con ricercatori olandesi e tedeschi, il gruppo dell'Università di Bologna, descrive sintesi e caratterizzazione di complessi di iridio (III) in grado di generare elettrochemiluminescenza (ECL). I composti descritti hanno tutte le proprietà richieste per l'impiego nella determinazione di specie di interesse biologico, ovvero: segnali ECL stabili e intensi in condizioni fisiologiche, presenza di siti di bioconiugazione, buona solubilità in acqua. Intensi segnali ECL sono osservati in ambiente aprotico con la cosiddetta procedura di annichilazione: modulando velocemente il potenziale in un campo che comporta sia l'ossidazione che la riduzione degli Ir(III)-complessi, si osserva per reazione dei rispettivi prodotti nello strato di diffusione, la ricostituzione del composto iniziale allo stato eccitato con conseguente emissione di luce. In ambiente acquoso, di preminente interesse applicativo, il campo di potenziale in cui il solvente è stabile è troppo ristretto per consentire ossidazione e riduzione. Si ricorre allora ad un co-reattivo (2-dibutilammino etanolo - DBAE). Per ossidazione simultanea di un complesso di Ir(III) e di DBAE, e successiva reazione fra i loro prodotti di ossidazione, si genera la specie eccitata che produce luminescenza.

All'elettrochimica molecolare si riferiscono anche le ricerche di Gennaro, Università di Padova, sulla polimerizzazione per trasferimento radicalico, finalizzata ad ottenere polimeri quasi-monodispersi, con alte masse molecolari. In un articolo pubblicato con ricercatori americani, Gennaro [13] descrive come il rapporto fra la forma attiva (che propaga la polimerizzazione) e quella "dormiente" di un complesso di Cu può essere controllata attraverso il potenziale d'elettrodo. La massa molecolare aumenta linearmente con la conversione, mentre la distribuzione diventa progressivamente più stretta. Il potenziale controlla la velocità del processo, ma non ha influenza su massa molecolare e distribuzione.

In collaborazione con gruppi del CNRS di Parigi e dell'Università di Gainesville, Florida, Musiani, CNR Padova [14], analizza le formule che permettono la determinazione della capacità effettiva di elettrodi che presentano, in misure d'impedenza, comportamenti "non ideali" caratterizzati da elementi ad angolo di fase costante (CPE), con angolo diverso dai 90° tipici dei condensatori ideali. Partendo dall'ipotesi che il comportamento CPE tragga origine da proprietà non omogenee del sistema, viene dimostrato che formule diverse devono essere usate per il calcolo della capacità quando le proprietà siano distribuite lungo la superficie dell'elettrodo o normalmente ad esso, lungo lo spessore di strati sottili che lo rivestono. Gli stessi autori mostrano che un comportamento CPE è osservato quando la resistività di un film varia lungo il suo spessore secondo una legge di potenza [15] e propongono una formula per il calcolo della costante dielettrica, noto lo spessore, o dello spessore, nota la costante dielettrica, che fornisce risultati in ottimo accordo con determinazioni indipendenti. I concetti sviluppati in [15] trovano applicazioni in settori tecnologici quali i trattamenti di superficie e la protezione anti-corrosione di metalli e leghe.

Questa breve rassegna, che pure esclude molti articoli di notevole valore, a causa delle restrizioni di spazio e del criterio di selezione basato sul numero di citazioni, che può penalizzare attività particolarmente originali, è sufficiente ad illustrare l'importante contributo che l'elettrochimica porta a settori di vitale importanza quali l'energia, l'ambiente, i materiali e la salute.

---

### BIBLIOGRAFIA

<sup>1</sup>M. Pourbaix, P. Van Rysselberghe, *Electrochim. Acta* 2000, **45**, xiii-xvi (riprodotto da *Publications du Centre Belge d'Etude de la Corrosion*, 1953, **3**, 89).

<sup>2</sup>M. Pourbaix, *Electrochim. Acta*, 2000, **45**, xvii-xx (riprodotto da *Electrochim. Acta*, 1971, **16**, 173).

<sup>3</sup>H.G. Jung *et al.*, *Nature Chemistry*, 2012, **4**, 879.

<sup>4</sup>S. Ferrari *et al.*, *J. Power Sources*, 2010, **195**, 559.

<sup>5</sup>C. Arbizzani *et al.*, *J. Power Sources*, 2011, **196**, 4801.

<sup>6</sup>J. Hassoun, B. Scrosati, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2010, **49**, 2371.

<sup>7</sup>V. Di Noto *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, 2010, **132**, 2183.

<sup>8</sup>D. Pergolesi *et al.*, *Nature Materials*, 2010, **9**, 846.

<sup>9</sup>A. Minguzzi *et al.*, *Chemical Science*, 2012, **3**, 217.

<sup>10</sup>M. Panizza, M.A. Oturan, *Electrochim. Acta*, 2011, **56**, 7084.

<sup>11</sup>F.M. Toma *et al.*, *Nature Chemistry*, 2010, **2**, 826.

<sup>12</sup>S. Zanarini *et al.*, *Chemistry European J.*, 2011, **17**, 4640.

<sup>13</sup>A.J.D. Magenau *et al.*, *Science*, 2011, **332**, 81.

<sup>14</sup>B. Hirschorn *et al.*, *Electrochim. Acta*, 2010, **55**, 6218.

<sup>15</sup>B. Hirschorn *et al.*, *J. Electrochem. Soc.*, 2011, **157**, C452.