

A modelagem matemática da detecção de furfural e ácido láctico em pães fermentados

Volodymyr V. Tkach^{1*}, Marta V. Kushnir¹, Sílvio C. de Oliveira², Olga V. Luganska³, Iryna M. Korniienko⁴, Larysa S. Yastremska⁴, Olena O. Kuznetsova⁴, Yana G. Ivanushko⁵, Petro I. Yagodynets¹, Yuksel Akinay⁶, Necdet Karakoyun⁶, José I. Ferrão da Paiva Martins⁷, Maria João Monteiro⁸

¹ Universidade Nacional de Chernivtsi, 58012, Rua de Kotsyubyn's'ky, 2, Chernivtsi, Ucrânia

² Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Av. Sen. Felinto. Müller, 1555, C/P. 549, 79074-460, Campo Grande, MS, Brazil

³ Universidade Nacional de Zaporizhzhia, 69600, Rua de Zhukovsky, 66, Zaporizhzhya, Ucrânia

⁴ Universidade Nacional de Aviação da Ucrânia, 03058, Av. Lyubomyr Huzar, 1, Kiev, Ucrânia

⁵ Universidade Estatal de Medicina de Bucovina, 58001, Praça Teatral, 9, Chernivtsi, Ucrânia

⁶ Universidade Yüzüncü Yıl de Vã, 65090, Bardakçı, Campus Universitário Yüzüncü Yıl, Tuşba, Vã, Turquia

⁷ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 4200-465, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, Porto, Portugal

⁸ Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, 5001-801, Folhadela, Vila Real, Portugal

*Correio eletrônico: nightwatcher2401@gmail.com

Recebido: 10 de março de 2023

Revisado: 8 de abril de 2024

Aceto: 15 de abril de 2024

RESUMO

Introdução: A concentração de furfural e ácido láctico é importante para as propriedades nutricionais e parafarmacêuticas dos pães. Neste trabalho, realiza-se uma análise teórica da detecção eletroanalítica de ambos os compostos em pães. **Metodologia:** O processo da detecção eletroanalítica de furfural e ácido láctico em pães fermentados no ânodo, modificado pelo oxihidróxido de cobalto, tem sido desenvolvido e analisado do ponto de vista teórico. O modelo matemático correspondente foi desenvolvido e analisado mediante a teoria de estabilidade linear e análise de bifurcações. **Resultados e discussão:** Foi comprovada a eficiência do elétrodo de oxihidróxido de cobalto na detecção eletroanalítica de ambos os analitos em meio ligeiramente ácido. O oxihidróxido de cobalto pode ser estabilizado pelo polímero

condutor básico, para compensar o pH do pão. Quanto ao comportamento oscilatório, este é menos provável que nos casos semelhantes, haja vista a fraca ionização do ácido láctico e do ácido furoico – produto da oxidação do furfural. **Conclusões:** Ação catalítica do composto de cobalto facilita a obtenção e manutenção do estado estacionário estável neste sistema e, por conseguinte, providencia a fácil leitura de sinal analítico.

Palavras-chave: furfural, ácido láctico, pão fermentado, sensor eletroquímico, estado estacionário estável

SUMMARY

The mathematical modeling for furfural and lactic acid determination in fermented breads

Introduction: The furfural and lactic acid concentration is important for the nutraceutical and parapharmaceutical properties of bread. In this work, a theoretical analysis of the electroanalytical detection of both compounds in bread has been given. **Methodology:** The process of electroanalytical detection of furfural and lactic acid in fermented breads at the anode, modified by cobalt oxyhydroxide, has been developed and analyzed from a theoretical point of view. The corresponding mathematical model was developed and analyzed using linear stability theory and bifurcation analysis. **Results and discussion:** The efficiency of the cobalt oxyhydroxide electrode in the electroanalytical detection of both analytes in a slightly acidic medium was proven. Cobalt oxyhydroxide can be stabilized by the basic conductive polymer to compensate for the pH of the bread. As for the oscillatory behavior, this is less likely than in similar cases, given the weak ionization of lactic acid and furoic acid – the product of furfural oxidation. **Conclusions:** Catalytic action of the cobalt compound facilitates obtaining and maintaining stable steady state in this system and, therefore, provides easy reading of analytical signal.

Keywords: furfural, lactic acid, sourdough bread, electrochemical sensor, stable steady state

RESUMEN

El modelado matemático de la detección de furfural y ácido láctico en panes fermentados

Introducción: La concentración de furfural y ácido láctico es esencial para las propiedades nutricéuticas y parafarmacéuticas del pan. En este trabajo se realiza un análisis teórico de la detección electroanalítica de ambos compuestos en panes.

Metodología: Se ha desarrollado y analizado desde un punto de vista teórico el proceso de detección electroanalítica de furfural y ácido láctico en pan fermentado en el ánodo, modificado por oxihidróxido de cobalto. El modelo matemático correspondiente fue desarrollado y analizado utilizando la teoría de estabilidad lineal y análisis de bifurcaciones.

Resultados y discusión: Se confirmó la eficiencia del electrodo de oxihidróxido de cobalto en la detección electroanalítica de ambos analitos en un medio ligeramente ácido. El oxihidróxido de cobalto puede estabilizarse mediante el polímero conductor básico para compensar el pH del pan. Ya el comportamiento oscilatorio es menos probable que en casos similares, dada la débil ionización del ácido láctico y del ácido furoico, producto de la oxidación del furfural.

Conclusiones: La acción catalítica del compuesto de cobalto facilita la obtención y el mantenimiento de un estado estable en este sistema y, por tanto, proporciona una fácil lectura de la señal analítica.

Palabras-clave: furfural, ácido láctico, pan de masa madre, sensor electroquímico, estado estacionario estable

INTRODUÇÃO

O Império Otomano, que existiu entre os anos 1299 e 1922, foi um dos maiores impérios no mundo. Na sua maior extensão, em 1687, o Império controlou 5,2 milhões de quilómetros quadrados, em que viveram 30 000 000 de pessoas, ou seja, uma em cada vinte e cinco pessoas no mundo de então viveu no Império Otomano [1-3]. O auge do Império foi durante o reino do sultão Solimão I o Legislador (Kanuni). Na Turquia ele é apelidado de Legislador, por organizar o Kanunname (Código de Leis do Império). O código abrangia quase todas as áreas, inclusive a produção de pão. A lei previu que a farinha passasse pelo coador de poro minúsculo e que o pão fosse bem passado e não desse nenhum cheiro diferente do “cheiro a pão”.

O cheiro a pão é produzido pelo furfural (Fig. 1 à esquerda) – produto da fermentação das pentoses e hexoses na forma de furanose. É um aldeído, formado durante a fermentação natural e artificial da massa [4-7]. Outro produto importante da fermentação é o ácido láctico [8-10], que é produto da fermentação da glicose pelas bacilas como *L. bulgaricus*, *L. delbrueckii*, *L. acidophilus*, estreptococo *S. thermophilus* (cuja atividade aumenta quando o pão se esquenta) e bifidobactério *B. infantis* e *B. lactis*. O 5-hidroximetilfurfural, produto da fermentação de hexofuranoses, aparece em méis.

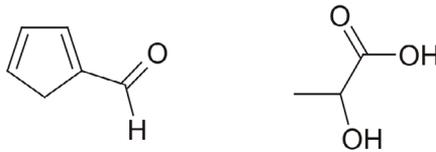


Figure 1. Furfural e ácido láctico

Além da fermentação de pão, os bifidobactérios mencionados são usados em formulações farmacêuticas [11, 12] para tratamento de algumas infecções gastrointestinais e diarreias.

Quanto ao furfural, ele é um nutricêutico e antioxidante, que também serve como ponto de partida para obtenção de vários fármacos (como furosemida). O ácido láctico, por sua vez, além de ser um componente alimentar, é um produto de metabolismo humano. Ele também é usado em formulações farmacêuticas como substância principal corretor de metabolismo. A concentração de ambos os produtos é importante para a manutenção da homeostase. Destarte, o desenvolvimento de um método para a quantificação de ambos os compostos é realmente atual [13-15].

Ambos os compostos são eletroativos, haja vista o possuírem grupos funcionais oxidantes e redutores [14-16]. Assim, tanto os processos anódicos como catódicos são-lhe compatíveis. No caso de um processo anódico, o uso do oxihidróxido de cobalto, um material semiconductor, que se vê como alternativa ao dióxido de titânio, poderia ser usado para a detecção do furfural e ácido láctico em pães fermentados.

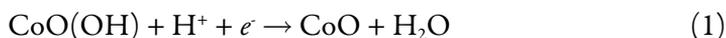
Sem embargo, tanto a oxidação das moléculas orgânicas pequenas, como a síntese do oxihidróxido de cobalto, soem acompanhar-se pelas instabilidades eletroquímicas [17-19], que influenciam o desempenho eletroanalítico do sensor. Isto pode levar à dificuldade na interpretação do sinal analítico do sensor.

Assim, o objetivo geral deste trabalho é avaliar, do ponto de vista mecanístico teórico, o comportamento do sistema com a detecção eletroanalítica do furfural e ácido láctico sobre o oxihidróxido de cobalto. O modelo matemático correspondente é analisado

mediante a teoria de estabilidade linear, para verificar as condições de estabilidade do estado estacionário (e, por conseguinte, do melhor desempenho do sensor), das instabilidades oscilatória e monotônica. Outrossim, far-se-á a comparação do comportamento deste sistema com o dos semelhantes [20, 21].

O SISTEMA E SEU MODELO

Durante a análise de massa fermentada, cujo pH é levemente reduzido, o oxihidróxido de cobalto, na ausência de analito, reduz-se conforme:



Nos valores inferiores de pH, o óxido de cobalto destrói-se, conforme:



Destarte, para estabilizar o oxihidróxido de cobalto, este deve ser depositado sobre um polieletrólito de cariz básico como quitosana, polianilina ou polímeros de corantes com nitrogênio piridínico. Como se mencionará abaixo, a matriz polimérica não deve ser assaz básica para ionizar os ácidos láctico, pirúvico e furoico – produto da oxidação do furfural.

A oxidação far-se-á pelo grupo aldeída no caso do furfural e pela hidroxila do ácido láctico. Destarte, o processo eletroanalítico realizar-se-á conforme a Fig. 2:

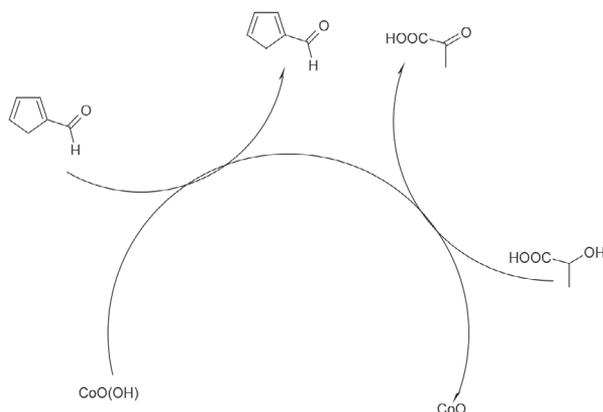
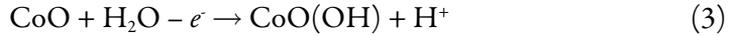


Figure 2. O processo eletroanalítico

Em meios ácido e neutro, o oxihidróxido de cobalto regenerar-se-á na etapa eletroquímica conforme (3):



Este processo não inclui interação nem polimerização de cada um dos analitos. Outrossim, nenhuma reação lateral, capaz de comprometer a estabilidade dos analitos e(ou) modificador, se realiza. Assim, para descrever o comportamento deste sistema, assumindo umas suposições [18-21], nós descrevemos o comportamento deste sistema por um conjunto de três equações diferenciais de balanço:

$$\begin{cases} \frac{df}{dt} = \frac{2}{\delta} \left(\frac{\phi}{\delta} (f_0 - f) - f_1 \right) \\ \frac{dl}{dt} = \frac{2}{\delta} \left(\frac{A}{\delta} (l_0 - l) - l_1 \right) \\ \frac{dc}{dt} = \frac{1}{c} \left(\frac{1}{\delta} (f_1 + l_1 - c_1) \right) \end{cases} \quad (4)$$

Sendo f e l as concentrações pré-superficiais de furfural e ácido láctico, Φ e A são seus coeficientes de difusão, f_0 e l_0 as concentrações deles no interior da solução, e f_1 e l_1 as velocidades da sua oxidação pelo oxihidróxido de cobalto (5 – 6), C é a concentração superficial máxima do óxido de cobalto e c_1 é a velocidade da sua eletrooxidação (3, 7).

As velocidades das reações correspondentes são descritas como (5 – 7):

$$f_1 = k_{f1} f (1 - c)^2 \quad (5)$$

$$l_1 = k_{l1} l (1 - c)^2 \quad (6)$$

$$c_1 = k_{c1} c \exp \frac{f\varphi_0}{RT} \quad (7)$$

Sendo os parâmetros k as constantes das velocidades das respectivas reações, F é número de Faraday, φ_0 é salto do potencial, relativo ao potencial de carga zero, R é a constante universal de gases e T é temperatura do vaso.

Neste caso, o meio neutro ou ligeiramente ácido favorece a leitura fácil do sinal analítico e, por conseguinte, otimização no desempenho eletroanalítico do sensor, conforme se descreverá abaixo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para investigar o comportamento do sistema com a detecção eletroanalítica do furfural e ácido láctico no elétrodo, modificado pelo oxihidróxido de cobalto, analisamos o conjunto de equações diferenciais (4), junto com as relações algébricas (5 – 7) mediante a teoria de estabilidade linear. Os elementos estacionários do Jacobiano podem ser descritos conforme (8):

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Sendo:

$$a_{11} = \frac{2}{\delta} \left(-\frac{\Phi}{\delta} - k_{f1} (1-c)^2 \right) \quad (9)$$

$$a_{21} = 0 \quad (10)$$

$$a_{13} = \frac{2}{\delta} (2k_{f1} f(1-c)) \quad (11)$$

$$a_{21} = 0 \quad (12)$$

$$a_{22} = \frac{2}{\delta} \left(-\frac{\Lambda}{\delta} - k_{l1} (1-c)^2 \right) \quad (13)$$

$$a_{23} = \frac{2}{\delta} (2k_{l1} f(1-c)) \quad (14)$$

$$a_{31} = \frac{1}{c} (k_{f1} (1-c)^2) \quad (15)$$

$$a_{32} = \frac{1}{c} (k_{l1} (1-c)^2) \quad (16)$$

$$a_{33} = \frac{1}{c} \left(-2k_{f1} f(1-c) - 2k_{l1} (1-c) - k_{c1} \exp \frac{F\varphi_0}{RT} + jk_{c1} c \exp \frac{F\varphi_0}{RT} \right) \quad (17)$$

Observando os elementos da diagonal principal (9), (13) e (17) pode-se concluir que em no meio neutro e ligeiramente ácido (correspondente ao pão fermentado), *as oscilações eletroquímicas*, embora se deem, são menos prováveis que nos casos semelhantes, haja vista o baixo grau de ionização de cada um dos analitos e seus produtos de oxidação.

O único fator responsável pelo comportamento oscilatório são as influências da etapa eletroquímica na força iônica, capacitância e impedância da dupla camada elétrica, que provocam câmbios cíclicos no valor da corrente elétrica (neste caso, trata-se de um sensor amperométrico). Embora geralmente as oscilações sejam de alta frequência e pequena amplitude, o seu formato vai depender da natureza do eletrólito de suporte e do polímero condutor usado como matriz. Esta dependência foi observada experimental [18, 19] e teoricamente [20, 21].

Para investigar a estabilidade do estado estacionário mediante a aplicação do critério Routh-Hurwitz, simplificamos o determinante, introduzindo as novas variáveis e reescrevendo o determinante como (18):

$$\frac{4}{\delta^2 c} \begin{vmatrix} -\varphi \Xi & 0 & P \\ 0 & -\lambda - t & \Sigma \\ \Xi & T & -P - \Sigma - \Omega \end{vmatrix} \quad (18)$$

Abrindo os parêntesis e aplicando o requisito $\text{Det } J < 0$, saliente do critério, obtemos, após trocar os signos pelos opostos, o requisito de estabilidade de estado estacionário como (19):

$$\varphi(\lambda P + \lambda \Sigma + \lambda \Omega + TP) + \Xi(\lambda \Sigma + \lambda \Omega + T\Omega) > 0 \quad (19)$$

O que define um processo eficiente, controlado pela difusão dos dois analitos. A influência do fator cinético aumenta, quando os efeitos do processo eletroanalítico na dupla camada elétrica se expressam com maior intensidade.

Como citado anteriormente, neste processo eletroanalítico a estabilidade dos analitos e do modificador não é comprometida pelas reações laterais. Assim, a estabilidade do estado estacionário corresponder-se-á à linearidade da dependência entre a concentração de cada um dos analitos e a corrente, o que permitirá a fácil leitura do sinal analítico.

Quanto ao *limite de detecção*, este é correspondente à instabilidade monotônica, que se define sob condição $\text{Det } J = 0$, ou (20):

$$\varphi(\lambda P + \lambda \Sigma + \lambda \Omega + TP + T\Omega) + \Xi(\lambda \Sigma + \lambda \Omega + T\Omega) > 0 \quad (20)$$

Os ésteres do ácido láctico podem ser detectadas por este meio, já que o compósito CoO(OH) – polímero condutor realiza a separação dos picos.

No caso do pH ligeiramente alcalino, a detecção de ambos os compostos pode realizar-se. Entretanto, o lactato, o piruvato como produto da oxidação do lactato e o íon furoato como produto da oxidação do furfural, ficarão presentes em forma iônica, influenciando a dupla camada elétrica. Destarte, as velocidades das reações (5 – 6) reescrever-se-ão incluindo uma parte exponencial, presente em [20, 21].

Quanto ao *processo catódico*, este é mais favorável para o meio ácido, correspondente aos pães fermentados e às formulações farmacêuticas. Neste caso, o oxihidróxido de vanádio bivalente, ou um polímero condutor são sugeridos como modificadores de eletrodo. Assim, o comportamento do sistema será descrito pelo conjunto (21):

$$\begin{cases} \frac{df}{dt} = \frac{2}{\delta} \left(\frac{\Phi}{\delta} (f_0 - f) - f_2 \right) \\ \frac{dl}{dt} = \frac{2}{\delta} \left(\frac{\Lambda}{\delta} (l_0 - l) - l_1 \right) \\ \frac{dc}{dt} = \frac{1}{v} (f_1 + f_2 + l_1 - c_1) \end{cases} \quad (21)$$

Considerando as duas possibilidades de redução do furfural.

Este processo é ainda mais compatível e descrever-se-á num dos nossos próximos trabalhos.

CONCLUSÕES

Da análise do processo com a determinação do furfural e do ácido láctico, foi possível concluir que a ação catalítica do composto de cobalto facilita a obtenção e manutenção do estado estacionário estável neste sistema e, por conseguinte, a fácil leitura de sinal analítico. O processo eletroanalítico é controlado pela difusão, não sendo, porém, dispensável o fator cinético. Quanto ao comportamento oscilatório, este é possível neste sistema. Ele é causado pelos efeitos periódicos na estrutura da dupla camada elétrica

NOTA DE AGRADECIMENTO

Volodymyr V. Tkach agradece à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro o seu apoio nos tempos difíceis para a Ucrânia e a sua ciência.

CONFLITOS DE INTERESSE

Os autores não têm conflitos de interesse a declarar.

REFERÊNCIAS

1. D. A. Howard, *A History of the Ottoman Empire*, Cambridge University Press, 2017. URL: <https://calvin.edu/directory/publications/a-history-of-the-ottoman-empire>
2. B. Punar, *Kanun and Sharia: Ottoman Law in Şeyhülislam Fatwas from Kanunname of Budin to the Kanunname-i Cedid*, Master of Arts in History Thesis, Istanbul Şehir University, Istanbul, 2015, 139 p. URL: <https://core.ac.uk/download/38326457.pdf>
3. F.G. Karagöz, *The evolution of Kânûnnâme writing in the 16th and 17th century- Ottoman Empire : a comparison of Kânûn-i 'Osmânî of Bayezid II and of Kânûnnâme-i Cedîd*, Master's Thesis, Department Of History, Bilkent University, Ankara, 2010, 446 p. URL: <https://repository.bilkent.edu.tr/items/b6950d1c-1e9a-47ab-933b-4a284ca3ddc2>
4. A. Jaswal, P.P. Singha, T. Mondal, Furfural – a versatile, biomass-derived platform chemical for the production of renewable chemicals, *Green Chemistry*, **21**, 510-551 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1039/D1GC03278J>
5. C. Liu, T. Cai, X. Yin, J. Liang, S. Jia, X. Zhang, J. Xu, J. Hu, J. Jiang, K. Wang, A sustainable and profitable biorefinery strategy for efficiently converting lignocellulose to furfural, glucose and phenolic compounds, *Green Chemistry*, **21**, 8494-8502 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1039/D2GC03231G>
6. P. Brazdauks, D. Godina, M. Puke, Direct furfural production from deciduous wood pentosans using different phosphorus-containing catalysts in the context of biorefining, *Molecules*, **27**(21), 7353 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3390/molecules27217353>
7. D. Soukoup-Carne, X. Fan, J. Estéban, An overview and analysis of the thermodynamic and kinetic models used in the production of 5-hydroxymethylfurfural and furfural, *Chemical Engineering Journal*, **442**(Part 2), 136313 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136313>

8. J. Kim, Y-M. Kim, V.R. Lebaka, Y.-J. Wee, Lactic acid for green chemical industry: Recent advances in and future prospects for production technology, recovery, and applications, *Fermentation* (Basel), **8**(11), 609 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3390/fermentation8110609>
9. J. Campos, L. García-Tejada, J. Bao, G. Liden, Fed-batch strategies for biodegradation in production of optically pure lactic acid from softwood hydrolysate using *Pediococcus acidilactici*, *Process Biochemistry*, **125**, 162-170 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.12.027>
10. D. Yankov, Fermentative lactic acid production from lignocellulosic feedstocks: From source to purified product, *Frontiers in Chemistry*, **10**, 823005 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.823005>
11. I.P. Kaur, K. Chopra, A. Saini, Probiotics: potential pharmaceutical applications, *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, **15**(1), 1-9 (2002). Doi: [https://doi.org/10.1016/s0928-0987\(01\)00209-3](https://doi.org/10.1016/s0928-0987(01)00209-3)
12. C. Moubareck, F. Gavini, L. Vaugien, M.J. Butel, F. Doucet-Populaire, Antimicrobial susceptibility of bifidobacteria, *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, **55**(1), 38-44 (2005). Doi: <https://doi.org/10.1093/jac/dkh495>
13. J. Li, M. Zhang, F. Dowell, D. Wang, Rapid determination of acetic acid, furfural, and 5-hydroxymethylfurfural in biomass hydrolysates using near-infrared spectroscopy, *ACS Omega*, **3**(5), 5355-5361 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00636>
14. T. Shinomura, T. Sumiya, M. Ono, T. Itoh, T.-a. Hanaoka, An electrochemical biosensor for the determination of lactic acid in expiration, *Procedia Chemistry*, **6**, 46-51 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proche.2012.10.129>
15. X. Zou, Z. Deng, H. Chen, Z. Zheng, L. Ji, Y. Chen, M. Sun, S. Ouyang, Z. Yuan, P. Zhao, *et al.*, Dual-signal colorimetric and electrochemical sensor of dopamine based on nanocomposite of cobalt oxyhydroxide/carbon black, *Journal of Electrochemical Society*, **170**, 017503 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/acb237>
16. A. Stadnik, E.M. Caldas, A. Galli, F.J. Anaissi, Eletrodo modificado com [CoO(OH)] coloidal aplicado na detecção de ácido oxálico, *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*, **7**(2), 122-129 (2015). Doi: <https://doi.org/10.17807/orbital.v7i2.572>

17. J.S. Bonini, F.Q. Mariani, E. Guimarães de Castro, A. Galli, R. Marangoni, F.J. Anaissi, Partículas de CoO(OH) dispersas em pasta de carbono aplicado na eletrooxidação de compostos fenólicos, *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*, **7**(4), 318-326 (2015). Doi: <https://doi.org/10.17807/orbital.v7i4.780>
18. I. Das, N.R. Agrawal, S.A. Ansari, S.K. Gupta, Pattern formation and oscillatory polymerization of thiophene, *Indian Journal of Chemistry*, **47**(A), 1798-1803 (2018). URL: <https://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/2565>
19. K. Aoki, I. Mukoyama, J. Chen, Competition between Polymerization and Dissolution of Poly(3-methylthiophene), *Russian Journal of Electrochemistry*, **40**, 280-285 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1023/B:RUEL.0000019665.59805.4c>
20. V.V. Tkach, M.V. Kushnir, S.C. de Oliveira, I.M. Shevchenko, V.M. Odyntsova, V.M. Omelyanchik, L.O. Omelyanchik, O.V. Luganska, V.V. Kopyika, Z.O. Kormosh, *et al.*, Theoretical description for anti-COVID-19 drug molnupiravir electrochemical determination over the poly(1,2,4-triazole)-co-squaraine dye composite with Cobalt (III) oxyhydroxide, *Biointerface Research in Applied Chemistry*, **13**(1), 74 (2023). Doi: <https://doi.org/10.33263/BRIAC131.074>
21. V.V. Tkach, M.V. Kushnir, O.V. Ahafonova, M.P. Mytchenok, A.V. Bocharov, P.Y. Kovalchuk, S.C. De Oliveira, P.I. Yagodynets, Z.O. Kormosh, L. Vaz dos Reis, *et al.*, The theoretical description for the electrochemical determination of 4-4'-dihydroxyazobenzene, assisted by a composite of squaraine dye with cobalt (III) oxyhydroxide in pair with cobalt (IV) oxide, *Mediterranean Journal of Chemistry*, **10**(6), 619-624 (2020). Doi: <https://doi.org/10.13171/mjc10602007011465vvt>

COMO CITAR ESTE ARTIGO

V.V. Tkach, M.V. Kushnir, S.C. de Oliveira, O.V. Luganska, I.M. Korniienko, L.S. Yastremska, O.O. Kuznetsova, Y.G. Ivanushko, P.I. Yagodynets', Y. Akinay, N. Karakoyun, J.I.F. da Paiva-Martins, M.J. Monteiro, A modelagem matemática da detecção de furfural e ácido láctico em pães fermentados, *Rev. Colomb. Cienc. Quím. Farm.*, **53**(3), 686-697 (2024). Doi: <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v53n3.119134>