

RESSALVA

**Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo deste
documento será
disponibilizado somente a
partir de 04/09/2026.**

BRENDA CLARA GOMES RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS PARA TRATAMENTO DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS COMPLEXOS**

Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” (UNESP), no Instituto de
Química de Araraquara.

Supervisora: Dra. Juliana Ferreira de Brito

PROGRAMA DE PÓS-DOCTORADO DA UNESP

Araraquara

2025

RESUMO

O presente estudo investigou a eletrooxidação (EO) como pré-tratamento para lignina extraída do bagaço de cana-de-açúcar, visando sua aplicação na digestão anaeróbia (DA) para recuperação energética. A lignina, um dos principais componentes estruturais da biomassa lignocelulósica, apresenta baixa biodegradabilidade, dificultando sua conversão biológica. A EO foi aplicada em diferentes densidades de corrente (20 a 60 mA cm⁻²), com o objetivo de promover a quebra de ligações poliméricas da lignina e facilitar sua degradação por microrganismos anaeróbios. Os resultados mostraram que a EO favoreceu a solubilização da lignina e a liberação de compostos fenólicos e ácidos orgânicos de menor peso molecular, aumentando sua biodisponibilidade para a microbiota metanogênica. Ensaios de Potencial Bioquímico de Metano (BMP) revelaram que os tratamentos intermediários (30–50 mA cm⁻²) apresentaram melhor equilíbrio entre solubilização e inibição microbiológica, com aumento significativo na produção de metano em relação à lignina não tratada. Em particular, o ensaio com 60 mA cm⁻² (L60) alcançou a maior produção acumulada de metano (343 mL), superando até mesmo o controle sem lignina. A caracterização dos compostos intermediários indicou que, apesar da formação de compostos potencialmente inibitórios como vanilina e ácido gálico, suas concentrações permaneceram abaixo dos limites críticos. Conclui-se que a eletrooxidação é uma estratégia promissora para melhorar a biodegradabilidade da lignina e integrá-la de forma mais eficiente aos sistemas de biorrefinaria, contribuindo para a valorização de resíduos e para o fortalecimento da economia circular no setor sucroenergético.

Palavras chaves: Biometano, Composto fenólicos, Biomassa Recalcitrante, Aumento da biodegradabilidade, Energias renováveis.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, com sua matriz energética contendo 47% de fontes renováveis, se destaca em escala mundial, superando a média internacional de apenas 15%. A indústria da cana-de-açúcar, em particular, desempenha um papel vital nesse cenário, com uma produção estimada em cerca de 663 milhões de toneladas para a safra 2025/26. Em que o foco dessa produção está na obtenção de dois principais produtos: açúcar e etanol. Com o processamento dessa commodity, além dos produtos primários de interesse, são gerados subprodutos sem valor agregado [1].

Dentre os subprodutos, o bagaço da cana-de-açúcar destaca-se como um dos mais importantes para a indústria sucroalcooleira, devido ao montante gerado e sua composição. Para cada tonelada de cana processada, cerca de 280 kg são gerados de bagaço, ou seja, quase 30% de bagaço é gerado no processamento da cana-de-açúcar. Além disso, o bagaço é um resíduo fibroso, apresentando cerca de 46% de fibras (aproximadamente 50% de celulose, 25% de hemicelulose e 25% de lignina) e cerca de 50% de umidade [1–3].

Um dos maiores desafios para a utilização integral do bagaço é a remoção e reaproveitamento da lignina, considerada como resíduo ou subproduto de baixo valor. Mas na tendência de sustentabilidade, a lignina ganha cada vez mais destaque para se tornar uma alternativa de biomassa a combustíveis de produtos fósseis [4]. A lignina apresenta uma oportunidade e um desafio, já que sua estrutura complexa e composição química representam obstáculos desde a designificação da biomassa até sua utilização efetiva. Em termos de produção, para cada tonelada seca de biomassa (bagaço de cana), são produzidos cerca de 250 kg de lignina (cerca de 25% da composição da matéria vegetal), ou cerca de 70 kg de lignina por tonelada de cana processada (cerca de 7% da safra). Nesse aspecto, devido à base de carbono ter sua propriedade inativa, a lignina, na maioria dos atuais processos de Biorrefinarias, é queimada para produzir calor e energia [5].

Uma alternativa viável para um novo caminho de gestão da lignina, obtida do bagaço da cana de açúcar, seria a digestão anaeróbia (DA) para o reaproveitamento energético. Essa tecnologia já é difundido no setor sucroenergético do Brasil, com produção de 135 milhões de Nm³ de biogás por ano (considerando vinhaça, torta de filtro, bagaço e palha) [6], e pode oferecer

uma estratégia promissora para o reaproveitamento energético da lignina. Este processo biotecnológico permite a transformação de subprodutos agrícolas em biogás, um recurso energético renovável composto principalmente por metano (cerca de 70%) e dióxido de carbono (cerca de 30%) a partir da interação sintrófica entre uma variedade de microrganismos, assegurando uma conversão eficiente da matéria orgânica [7].

Com a capacidade de converter matérias orgânicas complexas em metano na ausência de oxigênio, a DA surge como uma solução para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), o gerenciamento eficiente de resíduos e a produção de biofertilizantes que favorecem o retorno de nutrientes ao solo. A utilização da DA não só apoia a diversificação do portfólio energético brasileiro, como também fortalece a circularidade na indústria da cana-de-açúcar, alinhando-se às políticas nacionais de sustentabilidade e aos compromissos internacionais de conservação ambiental [8].

Dentro do contexto do aproveitamento da lignina, é apresentado desafios para sua conversão em biogás, devido a sua baixa biodegradabilidade decorrente da sua complexa estrutura polimérica [5]. A despolimerização da lignina é apontada como o método mais promissor para transformar a lignina em produtos de alto valor. O conceito fundamental por trás dessa técnica envolve a quebra da macromolécula de lignina em fragmentos menores, o que possibilita a criação de aplicações adicionais, como a produção de combustíveis e produtos químicos [9].

A despolimerização eficaz da lignina, para aplicações subsequentes que gere valor na cadeia produtiva, requer principalmente a quebra das ligações β -O-4 (ligações mais abundantes da macromolécula). Para isso, diversos métodos têm se mostrado viáveis, como rotas termoquímicas (pirólise, gaseificação, liquefação hidrotérmica e micro-ondas), processos químicos (catalisado por ácido, base, líquido iônico, fluido sub ou supercrítico, oxidação, dentre outros) e biotecnológicos (bacteriano, fúngicos ou enzimáticos) [10–15].

É importante observar que, apesar das mudanças nas estruturas químicas da lignina devido às técnicas de extração e às matérias-primas utilizadas, a busca por solventes adequados para a dissolução da lignina permanece desafiadora. A insolubilidade da lignina dificulta a utilização de

catalisadores heterogêneos para a despolimerização, e altas temperaturas e pressões frequentemente resultam em baixas taxas de rendimento [16,17].

Devido a isso, processos eletroquímicos (PE) têm emergido como alternativas mais sustentáveis e promissoras para a valorização da lignina. A utilização de um pré-tratamento baseado em PE podem ser aplicados para modificar a estrutura recalcitrante da lignina, aumentando assim a eficiência da DA. Dentre os PE, a eletrooxidação (EO) é um método que pode ser conduzido em temperaturas e pressões ambientes, sem adição de agentes oxidantes ou floculantes. Ressalta-se que a eletricidade pode ser fornecida por fontes de energia renováveis, até mesmo pelo biometano gerado na digestão, sendo que a unidade PE precisa dispor de fonte de alimentação (contínua), recipiente simples para a reação e eletrodos (ânodo e cátodo) [18–21].

O pré-tratamento por EO pode proporcionar a quebrar das ligações químicas complexas da lignina, o que pode resultar na redução de seu peso molecular e na exposição de grupos funcionais reativos. Isso pode facilitar a ação dos microrganismos anaeróbios, que podem degradar mais eficientemente a lignina e seus componentes, otimizando a geração de biogás e aumentando a produção de metano. Com isso, a aplicação deste tipo de pré-tratamento tem o propósito de melhorar a biodegradabilidade da lignina e aumentar o potencial da conversão desta biomassa em compostos químicos valorizados pela indústria química, bioenergia e materiais avançados. A inclusão do pré-tratamento electrocatalítico nas biorrefinarias do Brasil poderia melhorar a sustentabilidade global das operações, maximizando a utilização de todos os componentes da biomassa da cana-de-açúcar e contribuindo para uma economia circular mais robusta.

Com isso, a utilização da lignina para conversão biológica em energia renovável na presença de pré-tratamento eletroquímico é uma proposta inovadora e ainda pouco explorada. Assim, a aplicação do pré-tratamento por EO em escala de bancada foi testada para posteriormente o produto final ser submetido ao processo de DA em reatores em batelada, a fim de avaliar a produção de biometano e compostos secundários, com o intuito de verificar a maior biodegradabilidade da lignina.

2. OBJETIVOS

mitigação de subprodutos inibitórios, resultando em aumento significativo na produção de metano em comparação à lignina não tratada.

Destaca-se que a maior densidade de corrente testada (60 mA cm^{-2}) resultou na conversão mais eficiente da lignina e na maior produção acumulada de metano, superando inclusive o controle sem lignina. No entanto, cuidados devem ser tomados para evitar a mineralização excessiva, que pode reduzir a disponibilidade de substrato e comprometer a geração de biogás ao longo do tempo. A identificação de compostos fenólicos e derivados furânicos reforça a necessidade de monitoramento dos intermediários potencialmente inibitórios nos sistemas anaeróbios.

De forma geral, o pré-tratamento com EO melhora a digestibilidade de resíduos ricos em lignina e está alinhado com práticas sustentáveis de gestão de resíduos, possibilitando a recuperação energética mais eficiente de biomassas agroindustriais. Estes achados apoiam a integração de tecnologias baseadas em EO em biorrefinarias brasileiras, promovendo uma bioeconomia circular e ampliando o leque de substratos viáveis para a produção de energia renovável. Pesquisas futuras devem abordar a escalabilidade dos sistemas de EO, a otimização do design reacional e a estabilidade operacional em regime contínuo, a fim de validar a viabilidade industrial desta abordagem.

6. ORIENTAÇÕES

Nada consta.

7. DISCIPLINAS MINISTRADAS COM A RESPECTIVA CARGA HORÁRIA E/OU A REALIZAÇÃO DE ATIVIDADES DE EXTENSÃO.

Nada consta.

8. COMENTÁRIOS DO SUPERVISOR

O período de desenvolvimento do pós-doc da Dra. Brenda Clara Gomes Rodrigues foi muito enriquecedor não apenas para a pós-doutoranda, mas para todo o grupo de pesquisa. A Dra. Brenda agregou grandemente ao grupo com o seu conhecimento sobre caracterização e manipulação de resíduos reais, planejamento experimental e tratamento de dados. Ela colaborou de forma intensa com a dissertação de mestrado do discente Leanderson Araújo da Silva

e desenvolveu um trabalho brilhante ainda que muito fora da sua trajetória e conhecimento científico. Além dos trabalhos desenvolvidos no período, enviamos também novos projetos em parceria.

9. REFERENCIAS

- [1] CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, Acompanhamento da Safra Brasileira - Cana-de-açúcar, 13 (2025) 1–54. <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cana-de-acucar/arquivos-boletins/1o-levantamento-safra-2025-26/boletim-cana-de-acucar-4o-levantamento-2025-26> (accessed May 27, 2025).
- [2] S. Ezhumalai, V. Thangavelu, Kinetic and optimization studies on the bioconversion of lignocellulosic material into ethanol, 2010.
- [3] M.C. Palacios-Bereche, R. Palacios-Bereche, A. V. Ensinas, A.G. Gallego, M. Modesto, S.A. Nebra, Brazilian sugar cane industry – A survey on future improvements in the process energy management, *Energy* 259 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124903>.
- [4] T. Wang, H. Li, X. Diao, X. Lu, D. Ma, N. Ji, Lignin to dispersants, adsorbents, flocculants and adhesives: A critical review on industrial applications of lignin, *Ind Crops Prod* 199 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116715>.
- [5] C. Li, X. Zhao, A. Wang, G.W. Huber, T. Zhang, Catalytic Transformation of Lignin for the Production of Chemicals and Fuels, *Chem Rev* 115 (2015) 11559–11624. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00155>.
- [6] CIBiogas, O biogás no setor sucroenergético – Benefícios e Desafios, (2024). <https://cibiogas.org/blog/o-biogas-no-setor-sucroenergetico-beneficios-e-desafios/> (accessed May 22, 2024).
- [7] B.C.G. Rodrigues, B.S. de Mello, L.C. Grangeiro, A. Sarti, K.J. Dussán, Microbial Degradation in the Biogas Production of Value-Added Compounds, in: *Environmental and Microbial Biotechnology*, Springer, Singapore, 2021: pp. 47–90. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0518-5_3.
- [8] ONU, COP28: Climate action can't wait, COP28 (2023). https://www.un.org/climatechange/cop28?gclid=CjwKCAiA04arBhAkEiwAuNOSltZNaWNYecwqsK4YftdoUa_I-b9BoTmbn_qNj9fAUspTs_uNWQC62xoCc3QQAuD_BwE (accessed November 24, 2023).
- [9] X. Wu, M. De bruyn, K. Barta, A Diamine-Oriented Biorefinery Concept Using Ammonia and Raney Ni as a Multifaceted Catalyst, *Chemie Ingenieur Technik* 94 (2022) 1808–1817. <https://doi.org/10.1002/cite.202200091>.
- [10] G.E. Klinger, Y. Zhou, J.A. Foote, A.M. Wester, Y. Cui, M. Alherech, S.S. Stahl, J.E. Jackson, E.L. Hegg, Nucleophilic Thiols Reductively Cleave Ether Linkages in Lignin Model Polymers and Lignin, *ChemSusChem* 13 (2020) 4394–4399. <https://doi.org/10.1002/cssc.202001238>.

- [11] M.P. Pandey, C.S. Kim, Lignin Depolymerization and Conversion: A Review of Thermochemical Methods, *Chem Eng Technol* 34 (2011) 29–41. <https://doi.org/10.1002/ceat.201000270>.
- [12] A.J. Ragauskas, G.T. Beckham, M.J. Bidy, R. Chandra, F. Chen, M.F. Davis, B.H. Davison, R.A. Dixon, P. Gilna, M. Keller, P. Langan, A.K. Naskar, J.N. Saddler, T.J. Tschaplinski, G.A. Tuskan, C.E. Wyman, Lignin Valorization: Improving Lignin Processing in the Biorefinery, *Science* (1979) 344 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1246843>.
- [13] R. Rinaldi, R. Jastrzebski, M.T. Clough, J. Ralph, M. Kennema, P.C.A. Bruijninx, B.M. Weckhuysen, Paving the Way for Lignin Valorisation: Recent Advances in Bioengineering, Biorefining and Catalysis, *Angewandte Chemie International Edition* 55 (2016) 8164–8215. <https://doi.org/10.1002/anie.201510351>.
- [14] R. Sun, Lignin Source and Structural Characterization, *ChemSusChem* 13 (2020) 4385–4393. <https://doi.org/10.1002/cssc.202001324>.
- [15] Z. Xiang, W. Han, J. Deng, W. Zhu, Y. Zhang, H. Wang, Photocatalytic Conversion of Lignin into Chemicals and Fuels, *ChemSusChem* 13 (2020) 4199–4213. <https://doi.org/10.1002/cssc.202000601>.
- [16] R. Patel, P. Dhar, A. Babaei-Ghazvini, M. Nikkhah Dafchahi, B. Acharya, Transforming lignin into renewable fuels, chemicals, and materials: A review, *Bioresour Technol Rep* 22 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101463>.
- [17] H. Ramzan, M. Usman, F. Nadeem, M. Shahzaib, M. Ur Rahman, R.R. Singhania, F. Jabeen, A.K. Patel, C. Qing, S. Liu, G. Piechota, N. Tahir, Depolymerization of lignin: Recent progress towards value-added chemicals and biohydrogen production, *Bioresour Technol* 386 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129492>.
- [18] K. Beliaeva, N. Grimaldos-Osorio, E. Ruiz-López, L. Burel, P. Vernoux, A. Caravaca, New insights into lignin electrolysis on nickel-based electrocatalysts: Electrochemical performances before and after oxygen evolution, *Int J Hydrogen Energy* 46 (2021) 35752–35764. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.224>.
- [19] D. Gao, D. Ouyang, X. Zhao, Electro-oxidative depolymerization of lignin for production of value-added chemicals, *Green Chemistry* 24 (2022) 8585–8605. <https://doi.org/10.1039/D2GC02660K>.
- [20] G. Nair, B. Soni, M. Shah, A comprehensive review on electro-oxidation and its types for wastewater treatment, *Groundw Sustain Dev* 23 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100980>.
- [21] H. Pasalari, A. Esrafil, A. Rezaee, M. Gholami, M. Farzadkia, Electrochemical oxidation pretreatment for enhanced methane potential from landfill leachate in anaerobic co-digestion process: Performance, Gompertz model, and energy assessment, *Chemical Engineering Journal* 422 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130046>.
- [22] M.G. dos Santos, H.M. Fogarin, D.D. Virginio da Silva, K.J. Dussán, Bioprocess development for levulinic acid production using sugarcane biomass, *Sustain Chem Pharm* 33 (2023) 101085. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2023.101085>.

- [23] K. Bes, J.S. Lemões, C.F.L. e Silva, S.D.D.A. e Silva, Extraction and characterization of lignin from the pre-treatment of biomass for 2nd generation ethanol production, *Engenharia Sanitaria e Ambiental* 24 (2019) 55–60. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019156352>.
- [24] M. Panizza, G. Cerisola, Electrochemical generation of H₂O₂ in low ionic strength media on gas diffusion cathode fed with air, *Electrochim Acta* 54 (2008) 876–878. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.07.063>.
- [25] F.L. Souza, J.M. Aquino, D.W. Miwa, M.A. Rodrigo, A.J. Motheo, Photo-assisted electrochemical degradation of the dimethyl phthalate ester on DSA® electrode, *J Environ Chem Eng* 2 (2014) 811–818. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.02.003>.
- [26] C.A.L. Chernicharo, *Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias*, Belo Horizonte: Politécnic (2007).
- [27] APHA, *Standard methods for the examination of water and waste water, Illustrated*, APHA-AWWA-WEF, Washington, 2005.
- [28] Y. Wang, F. Yang, Z. Liu, L. Yuan, G. Li, Electrocatalytic degradation of aspen lignin over Pb/PbO₂ electrode in alkali solution, *Catal Commun* 67 (2015) 49–53. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2015.03.033>.
- [29] J.J. Conde, S. González-Rodríguez, X. Chen, T.A. Lu-Chau, G. Eibes, A. Pizzi, M.T. Moreira, Electrochemical oxidation of lignin for the simultaneous production of bioadhesive precursors and value-added chemicals, *Biomass Bioenergy* 169 (2023) 106693. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106693>.
- [30] C. Deng, X. Kang, R. Lin, B. Wu, X. Ning, D. Wall, J.D. Murphy, Boosting biogas production from recalcitrant lignin-based feedstock by adding lignin-derived carbonaceous materials within the anaerobic digestion process, *Energy* 278 (2023) 127819. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127819>.
- [31] G. Balasundaram, R. Banu, S. Varjani, A.A. Kazmi, V.K. Tyagi, Recalcitrant compounds formation, their toxicity, and mitigation: Key issues in biomass pretreatment and anaerobic digestion, *Chemosphere* 291 (2022) 132930. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132930>.
- [32] C. Phuttaro, C. Sawatdeenarunat, K.C. Surendra, P. Boonsawang, S. Chairapat, S.K. Khanal, Anaerobic digestion of hydrothermally-pretreated lignocellulosic biomass: Influence of pretreatment temperatures, inhibitors and soluble organics on methane yield, *Bioresour Technol* 284 (2019) 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.114>.
- [33] M. Akassou, A. Kaanane, A. Crolla, C. Kinsley, Statistical modelling of the impact of some polyphenols on the efficiency of anaerobic digestion and the co-digestion of the wine distillery wastewater with dairy cattle manure and cheese whey, *Water Science and Technology* 62 (2010) 475–483. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.235>.
- [34] R. Borja, J. Alba, C.J. Banks, Impact of the main phenolic compounds of olive mill wastewater (OMW) on the kinetics of acetoclastic methanogenesis, *Process Biochemistry* 32 (1997) 121–133. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(96\)00055-6](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(96)00055-6).

- [35] S.N. Parshina, R. Kleerebezem, E. van Kempen, A.N. Nozhevnikova, G. Lettinga, A.J.M. Stams, Benzaldehyde conversion by two anaerobic bacteria isolated from an upflow anaerobic sludge bed reactor, *Process Biochemistry* 36 (2000) 423–429. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(00\)00230-2](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(00)00230-2).
- [36] H.H.P. Fang, D.W. Liang, T. Zhang, Y. Liu, Anaerobic treatment of phenol in wastewater under thermophilic condition, *Water Res* 40 (2006) 427–434. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2005.11.025>.
- [37] L. Levén, K. Nyberg, A. Schnürer, Conversion of phenols during anaerobic digestion of organic solid waste – A review of important microorganisms and impact of temperature, *J Environ Manage* 95 (2012) S99–S103. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.021>.
- [38] F. Monlau, C. Sambusiti, A. Barakat, M. Quéméneur, E. Trably, J.-P. Steyer, H. Carrère, Do furanic and phenolic compounds of lignocellulosic and algae biomass hydrolyzate inhibit anaerobic mixed cultures? A comprehensive review, *Biotechnol Adv* 32 (2014) 934–951. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.04.007>.
- [39] E. Ortega-Martínez, R. Chamy, D. Jeison, Thermal pre-treatment: Getting some insights on the formation of recalcitrant compounds and their effects on anaerobic digestion, *J Environ Manage* 282 (2021) 111940. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111940>.
- [40] D.S.M. Ghasimi, K. Aboudi, M. de Kreuk, M.H. Zandvoort, J.B. van Lier, Impact of lignocellulosic-waste intermediates on hydrolysis and methanogenesis under thermophilic and mesophilic conditions, *Chemical Engineering Journal* 295 (2016) 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.045>.
- [41] W. Ye, L. Li, M. Zou, L. Han, P. Xu, Y. Gu, R. Yuan, X. Peng, Vanillin as a quorum sensing inhibitor: effect on extracellular polymeric substance production and defoaming potential in anaerobic digestion system, *Chemical Engineering Journal* 512 (2025) 162762. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.162762>.
- [42] J.A. Field, S. Kortekaas, G. Lettinga, The tannin theory of methanogenic toxicity, *Biological Wastes* 29 (1989) 241–262. [https://doi.org/10.1016/0269-7483\(89\)90016-5](https://doi.org/10.1016/0269-7483(89)90016-5).
- [43] J. López-Fiuza, F. Omil, R. Méndez, Anaerobic treatment of natural tannin extracts in UASB reactors, *Water Science and Technology* 48 (2003) 157–163. <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0384>.
- [44] M. Badshah, Evaluation of process parameters and treatments of different raw materials for biogas production, Thesis, Linköping University, 2012. <http://lup.lub.lu.se/record/3130472> (accessed December 27, 2023).
- [45] J.P. Delgenes, R. Moletta, J.M. Navarro, Effects of lignocellulose degradation products on ethanol fermentations of glucose and xylose by *Saccharomyces cerevisiae*, *Zymomonas mobilis*, *Pichia stipitis*, and *Candida shehatae*, *Enzyme Microb Technol* 19 (1996) 220–225. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(95\)00237-5](https://doi.org/10.1016/0141-0229(95)00237-5).
- [46] O. Ibraheem, B.K. Ndimba, Molecular Adaptation Mechanisms Employed by Ethanologenic Bacteria in Response to Lignocellulose-derived Inhibitory Compounds, *Int J Biol Sci* 9 (2013) 598–612. <https://doi.org/10.7150/ijbs.6091>.

- [47] J.-H. Park, H.-C. Cheon, J.-J. Yoon, H.-D. Park, S.-H. Kim, Optimization of batch dilute-acid hydrolysis for biohydrogen production from red algal biomass, *Int J Hydrogen Energy* 38 (2013) 6130–6136. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.050>.
- [48] F. Rosenkranz, L. Cabrol, M. Carballa, A. Donoso-Bravo, L. Cruz, G. Ruiz-Filippi, R. Chamy, J.M. Lema, Relationship between phenol degradation efficiency and microbial community structure in an anaerobic SBR, *Water Res* 47 (2013) 6739–6749. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.004>.