

AVALIAÇÃO DA EXPLOÇÃO A VAPOR E SEQUENCIAL HIDRÓLISE SEMICONTINUA COM ÁGUA SUBCRÍTICA NA OBTENÇÃO DE AÇÚCARES FERMENTESCÍVEIS E PRECURSORES DE BIOCOMBUSTÍVEIS

Francisco D. Vezaro¹, Alex Schulz¹, Chrysttian M. S. Garcia¹, Crisleine P. Draszewski¹, Daniel R. Taschetto¹, Flávio D. Mayer¹

¹Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, Brasil
(francisco.vezaro@acad.ufsm.br)

Resumo: A explosão a vapor (EV) seguida de hidrólise semicontínua com água subcrítica (HAS) foi avaliada para a conversão da palha de milho em açúcares fermentescíveis e precursores de biocombustíveis. O aumento da temperatura da EV (140–200 °C) elevou a remoção da hemicelulose e o teor de celulose, favorecendo a HAS a 280 °C. A condição EV-200 °C/HAS-280 °C apresentou os maiores rendimentos de açúcares e precursores de biocombustíveis.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Fracionamento; Biomassa; Transição energética.

INTRODUÇÃO

A busca por fontes renováveis de energia tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias para a produção de biocombustíveis a partir de biomassas lignocelulósicas, devido à sua ampla disponibilidade e ao fato de não competirem diretamente com a produção de alimentos (HARSHA VARTHAN et al., 2026). Entretanto, a conversão eficiente dessas biomassas em açúcares fermentescíveis ainda representa um desafio em função da elevada recalcitrância estrutural da parede celular vegetal (TAN et al., 2026).

A explosão a vapor (EV) é um dos pré-tratamentos hidrotérmicos mais empregados para aumentar a acessibilidade da celulose, promovendo a solubilização parcial da hemicelulose, alterações na estrutura da lignina e desorganização da matriz lignocelulósica (VEZARO et al., 2025). A severidade do pré-tratamento, especialmente a temperatura, exerce influência direta sobre a remoção dos componentes estruturais e, consequentemente, sobre a eficiência das etapas subsequentes de conversão da biomassa (AIROLDI COLOMBO et al., 2025).

A hidrólise com água subcrítica (HAS) destaca-se como uma alternativa à hidrólise enzimática por utilizar apenas água como meio reacional, dispensando o uso de enzimas e reduzindo significativamente o tempo de processamento (COCERO et al., 2018). Em condições subcríticas, a água apresenta maior capacidade de promover a hidrólise das ligações glicosídicas, favorecendo a

produção de açúcares solúveis. No entanto, condições mais severas também podem intensificar a formação de compostos de degradação, como ácidos orgânicos e compostos furânicos (VEZARO et al., 2025).

Compostos de degradação como hidroximetilfurfural (HMF) e furfural tem sido considerado na literatura como inibidores de fermentação e estudos tem buscado tentar evitar este tipo de produto (CARNEIRO et al., 2025; DRASZEWSKI et al., 2025b). No entanto pesquisas recentes vêm desenvolvendo biocombustíveis a partir dessas moléculas, indicando que possuem forte potencial como precursores de biocombustíveis (CHAUHAN et al., 2024; DO NASCIMENTO et al., 2026). Alguns destes combustíveis são 2,5-dimetilfurano (DMF) e 5-etoximetilfurfural (EMF) derivados do (HMF), além de álcool furfurílico usado como combustível de foguetes e 2-metilfurano e 2-metiltetraidrofurano (MTHF) (AMEEN et al., 2025; ZHAO et al., 2021).

Nesse contexto, a integração da explosão a vapor com a hidrólise sequencial em água subcrítica pode aumentar a conversão da biomassa e a produção de açúcares fermentescíveis e precursores de biocombustíveis. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da temperatura da explosão a vapor (140, 170 e 200 °C) seguida de hidrólise com água subcrítica a 280 °C sobre a produção de açúcares fermentescíveis, ácidos orgânicos e

precursores de biocombustíveis a partir da palha de milho.

MATERIAL E MÉTODOS

A palha de milho utilizada neste estudo foi obtida em campos experimentais da Universidade Federal de Santa Maria/RS. A análise da composição da biomassa foi realizada seguindo os protocolos estabelecidos pelo National Renewable Energy Laboratory. Dessa maneira foi determinado o teor de umidade (HAMES et al., 2008), cinzas (SLUITER et al., 2008a), extrativos (SLUITER et al., 2008b), celulose, hemicelulose e lignina (SLUITER et al., 2008c).

Para a realização dos ensaios de explosão a vapor (EV) e hidrólise com água subcrítica semicontínua (HAS), foi utilizada uma unidade multipropósito (Figura 1). O sistema é composto por um reservatório de água (1), uma bomba de alta pressão (2), manômetros para monitoramento da pressão (3 e 11), um pré-aquecedor responsável por elevar a temperatura da água à condição subcrítica antes de sua entrada no reator (4), e três termopares (5, 8 e 9) para monitoramento da temperatura. A temperatura de processo foi controlada com base na leitura do termopar (8), posicionado em contato direto com o meio reacional. O sistema também inclui um controlador/indicador de temperatura (6), conectado ao reator semicontínuo encamisado (7). Após o reator, o efluente passa por um banho de resfriamento em água (10), seguindo para a válvula de coleta (12) e, por fim, para o frasco de coleta (13).

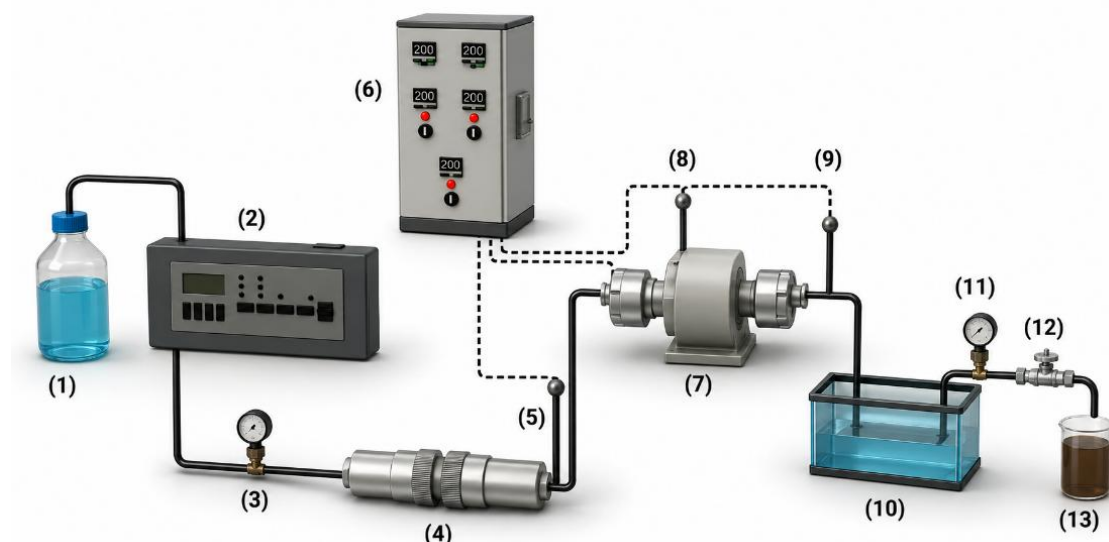


Figura 1: Ilustração da unidade multipropósito.

Os ensaios de EV foram realizados a 140, 170 e 200 °C, utilizando 20 g de palha de milho e

tempo de residência de 5 min. O processo foi conduzido a 5 MPa e, ao final do tempo de residência, a válvula do reator foi aberta rapidamente, promovendo a depressurização instantânea e a expansão da água pressurizada em vapor (DRASZEWSKI et al., 2025a). Após o pré-tratamento, a biomassa foi seca em estufa a 105 °C por 24 h e caracterizada quanto aos teores de celulose, hemicelulose, lignina e cinzas, sendo comparada à palha de milho sem tratamento.

A HAS foi conduzida a 280 °C, sob pressão de 15 MPa, vazão de água de 10 mL/min e carga de biomassa de 20 g. Para a biomassa sem tratamento (Sem tratamento/HAS-280 °C), a rampa de aquecimento foi de 15 min, seguida da etapa isotérmica a 280 °C (VEZARO et al., 2025). Durante a rampa de aquecimento foram coletadas amostras do pré-hidrolisado, e na etapa isotérmica as coletas foram realizadas após 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20 e 30 min, totalizando 45 min de processamento.

Nos ensaios integrados EV-HAS (EV-140 °C/HAS-280 °C, EV-170 °C/HAS-280 °C e EV-200 °C/HAS-280 °C), inicialmente foi coletada a fração líquida proveniente da etapa de EV, após 5 min de residência estática. Em seguida, iniciou-se imediatamente a rampa de aquecimento de 10 min até 280 °C, em operação semicontínua, sendo coletado o pré-hidrolisado durante esse período (CARNEIRO et al., 2025). Posteriormente, durante a etapa isotérmica da HAS, foram realizadas coletas após 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20 e 30 min, totalizando 45 min de processamento.

As amostras líquidas coletadas foram

analisadas por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), baseado em outros estudos (DRASZEWSKI et al., 2025b; TEN CATEN et al., 2026). Assim, foram determinados os rendimentos de celobiose, glicose, xilose, arabinose, ácido fórmico,

ácido acético, ácido levulínico, 5-hidroximetilfurfural e furfural, utilizando a Equação 1.

$$Rendimento = \frac{C \cdot V}{m_b} * 100 \quad (1)$$

Onde *Rendimento* é o rendimento do produto analisado (g/100g biomassa), *C* é a concentração do produto indicada por CLAE (g/L), *V* é o volume obtido no processamento hidrotérmico (L) e *m_b* é a massa de biomassa ao iniciar a etapa de HAS (g).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A palha de milho submetida aos processamentos hidrotermais foi caracterizada quanto a sua composição, com os resultados apresentados na Figura 2. A celulose foi o principal componente verificado, indicando que a biomassa tem potencial de rendimento de glicose após etapas de fracionamento do polímero. A hemicelulose apresentou a segunda maior porção, esse composto apresenta uma estrutura mais complexa, que tende a apresentar xilooligossacarídeos e arabinooligossacarídeos, além de compostos com grupos acetil e ácidos urônicos. A lignina é um composto formado principalmente por álcoois cumarílico, coniferílico e sinapílico, sendo a principal responsável pela rigidez e recalcitrância da biomassa (BAIHAQI et al., 2026). Os extrativos da palha de milho são constituídos por ceras, ácidos graxos, fenóis, terpenos e em menor proporção por açúcares livres. Em menores proporções ainda possui umidade e cinzas (CHEN et al., 2007).

A literatura indica uma faixa geral de celulose, hemicelulose e lignina de 35-50%, 17-28%, 7-20%, respectivamente, além de outros compostos remanescentes entre 9-33% (MENOR et al., 2026). Neste estudo foi verificado um teor de celulose levemente abaixo em compensação a de lignina um pouco acima. No entanto essas variações podem estar relacionadas ao cultivo da planta, variedade, condições climáticas e outros fatores como a relação de caules, folhas, cascas e sabugos na palha de milho (ZHONG et al., 2021).

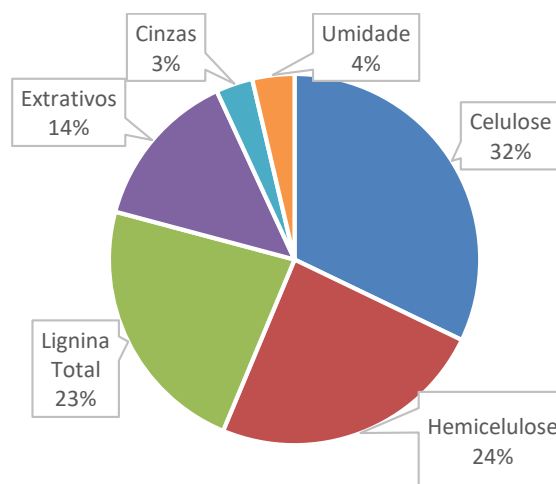


Figura 2: Composição da palha de milho sem tratamentos.

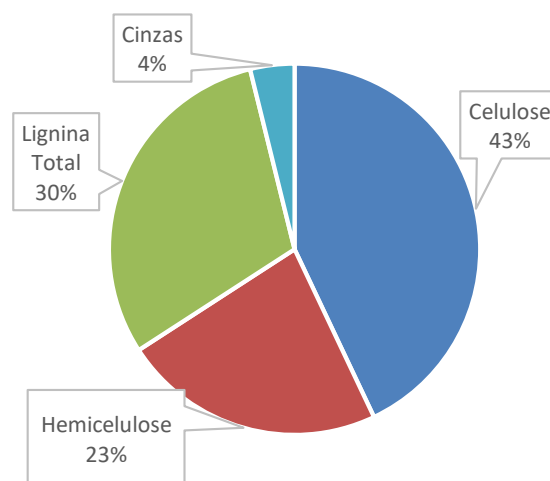


Figura 3: Composição da palha do milho pré-tratada por explosão a vapor a 140 °C.

A Figura 3 apresenta a composição da palha de milho após a EV a 140 °C. Percebe-se um aumento do teor de celulose e de lignina, enquanto a hemicelulose apresenta um teor similar a biomassa não tratada. Essas alterações na composição podem ser relacionadas à remoção dos extrativos durante a explosão a vapor e da umidade após a etapa de secagem da biomassa em estufa. Assim, a temperatura de 140 °C demonstrou baixa capacidade de remoção dos compostos estruturais da palha de milho.

A Figura 4 apresenta a composição da palha de milho após a EV a 170 °C. Nesse cenário teve um maior incremento no teor de celulose e lignina que a 140 °C. O aumento da temperatura resultou em uma maior remoção da hemicelulose, sendo está menos termo resistente que a lignina e celulose o que resulta na sua dissociação gerando principalmente xilose, arabinose, oligossacarídeos e ácidos orgânicos e

compostos furânicos (AIROLDI COLOMBO et al., 2025).

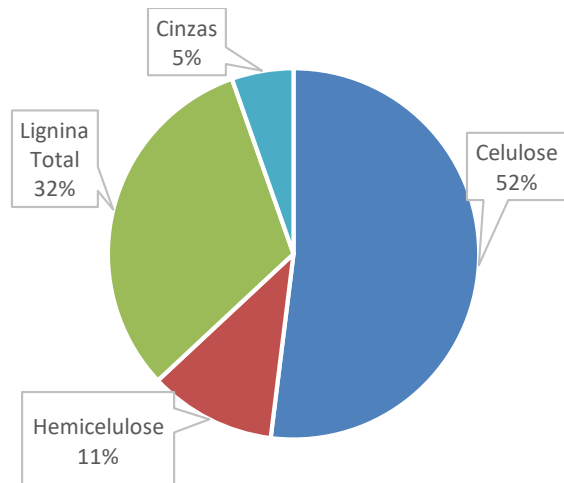


Figura 4: Composição da palha do milho pré-tratada por explosão a vapor a 170 °C.

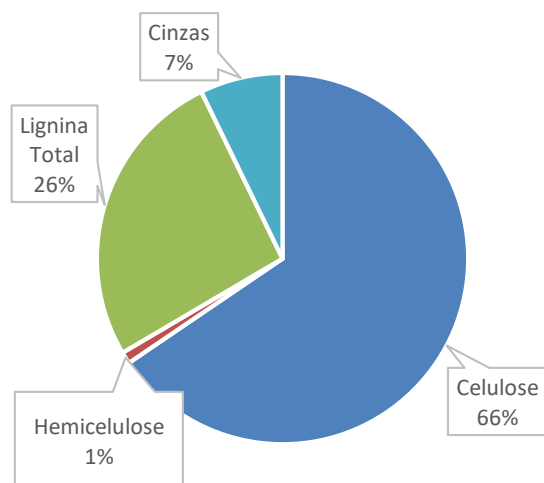


Figura 5: Composição da palha do milho pré-tratada por explosão a vapor a 200 °C.

Ao elevar mais a temperatura da EV para 200 °C (Figura 5) foi verificado um enriquecimento ainda maior de celulose, assim como uma maior remoção da hemicelulose. No entanto, o teor de cinzas aumentou por ser inerte ao processo de EV e se manter na biomassa. Apesar disso, o teor de lignina reduziu comparado aos ensaios a 140 °C e 170 °C, indicando que parte desse composto foi despolimerizada e solubilizada na fração líquida da EV devido as condições mais severas utilizadas.

Além de promover alterações na composição lignocelulósica, a EV reduz a recalcitrância da biomassa por meio da remoção parcial da hemicelulose e da modificação da estrutura da lignina. Estudos relatam que, durante o pré-tratamento, a lignina sofre despolimerização, favorecendo a exposição das fibras de celulose.

Assim, sob condições severas, fragmentos de lignina podem sofrer reações de repolimerização e condensação, resultando na formação de lignina condensada e pseudolignina (VEZARO et al., 2025). Consequentemente, além do aumento relativo do teor de celulose, principal fonte de glicose para a produção de açúcares fermentescíveis, as alterações estruturais promovidas pela EV aumentam a acessibilidade desse polímero aos agentes hidrolíticos, favorecendo etapas subsequentes de hidrólise enzimática ou hidrólise com água subcrítica e, consequentemente, elevando o rendimento de açúcares fermentescíveis (ASSINI et al., 2025; CARNEIRO et al., 2025).

Outros estudos reportaram resultados similares após a EV da palha de milho, de forma que ocorreu uma redução da hemicelulose e enriquecimento no teor de celulose e lignina. Em um caso que a palha foi submetida a 200 °C com o dobro do tempo de residência deste estudo, 10 min o teor de celulose, hemicelulose e lignina foi de aproximadamente 70%, 2% e 30%, respectivamente (AIROLDI COLOMBO et al., 2025). Em outro caso foi submetido a palha de milho a EV a 150 °C por 3 min, de forma que atingiu teores de celulose, hemicelulose e lignina de 52%, 8% e 16%, respectivamente, a partir de uma biomassa não tratada com teores lignocelulósicos de 40%, 24% e 18%, respectivamente. Possivelmente a maior remoção de hemicelulose que a 170 °C deste estudo ocorreu devido a diferenças no aparato experimental o qual utilizaram uma extrusora acoplado ao sistema de EV (CHEN et al., 2014).

Após a avaliação dos ensaios de EV, foram realizados ensaios de hidrólise com água subcrítica (HAS) utilizando tanto a biomassa não tratada quanto as biomassas submetidas aos diferentes pré-tratamentos, com o objetivo de avaliar os efeitos da EV sobre os rendimentos dos produtos obtidos. Os rendimentos de açúcares fermentescíveis são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Rendimentos em g/100g biomassa de açúcares da palha de milho submetida a diferentes pré-tratamentos e sequencial hidrólise com água subcrítica.

Ensaio	Celobiose	Glicose	Xilose	Arabinose	Total
Sem tratamento/HAS-280 °C	0,1 ±0,0	0,7 ±0,0	1,3 ±0,3	0,3 ±0,1	2,5 ±0,4
EV-140°C/HAS-280°C	0,3 ±0,1	2,2 ±1,4	1,4 ±0,6	1,0 ±0,6	4,9 ±2,6
EV-170°C/HAS-280°C	0,5 ±0,1	3,5 ±1,0	2,9 ±0,5	2,2 ±1,5	9,0 ±0,8
EV-200°C/HAS-280°C	0,9 ±0,3	5,1 ±1,2	3,6 ±0,6	0,6 ±0,2	10,3 ±1,1

Observa-se um aumento nos rendimentos de celobiose e glicose à medida que a severidade do pré-tratamento por explosão a vapor foi elevada. Além de alterar a composição da biomassa, a EV modificou sua acessibilidade estrutural. A remoção progressiva da hemicelulose e a despolimerização parcial da lignina favoreceram a exposição das microfibrilas de celulose, permitindo que a água subcrítica promovesse maior clivagem das ligações glicosídicas. Dessa forma, a EV atuou como uma etapa de condicionamento da biomassa, enquanto a hidrólise com água subcrítica (HAS) promoveu a conversão dos polímeros expostos em açúcares solúveis, evidenciando um efeito sinérgico entre os processos.

O rendimento de xilose também aumentou com a elevação da temperatura da EV. Entretanto, esse comportamento provavelmente está relacionado à própria etapa de pré-tratamento, uma vez que, na condição de 200 °C, parte da hemicelulose é hidrolisada durante a explosão a vapor, promovendo a liberação de xilose antes mesmo da HAS. Para a biomassa in natura, embora a temperatura de 280 °C seja suficiente para hidrolisar a hemicelulose, a elevada severidade do processo também favorece a degradação dos monossacarídeos formados, reduzindo o rendimento final de xilose.

Em contraste, a celulose apresenta maior estabilidade térmica e recalcitrância estrutural, exigindo não apenas temperaturas elevadas, mas também um pré-tratamento capaz de aumentar sua acessibilidade para que sua conversão em açúcares fermentescíveis seja mais eficiente (DRASZEWSKI et al., 2025b). Na ausência da EV, parte da celulose provavelmente permanece na forma de oligossacarídeos devido à maior dificuldade de ruptura das ligações glicosídicas. Consequentemente, a menor acessibilidade da biomassa limita a conversão da celulose em glicose, resultando nos menores rendimentos observados para a condição sem pré-tratamento.

A Tabela 2 apresenta os rendimentos de ácidos orgânicos obtidos nos diferentes tratamentos. Foram observadas pequenas variações entre as

condições avaliadas. O ácido acético é formado predominantemente a partir da desacetilação e degradação da hemicelulose, enquanto o ácido fórmico é gerado principalmente pela degradação da glicose (COCERO et al., 2018). Dessa forma, o discreto aumento no rendimento de ácido fórmico nas condições que produziram maiores quantidades de glicose indica uma degradação mais intensa desse monossacarídeo durante a HAS, em decorrência de sua maior disponibilidade no meio reacional.

Tabela 2: Rendimentos em g/100g biomassa de ácidos orgânicos da palha de milho submetida a diferentes pré-tratamentos e sequencial hidrólise com água subcrítica.

Ensaio	Ácido Fórmico	Ácido Acético	Ácido Levulínico	Total
Sem tratamento/HAS-280 °C	1,1 ±0,0	3,7 ±0,3	0,1 ±0,0	4,9 ±0,3
EV-140°C/HAS-280°C	1,2 ±0,0	3,7 ±0,8	0,1 ±0,0	4,9 ±1,1
EV-170°C/HAS-280°C	1,3 ±0,0	3,8 ±0,6	0,2 ±0,0	4,3 ±0,5
EV-200°C/HAS-280°C	1,8 ±0,0	3,5 ±0,3	0,2 ±0,0	5,6 ±0,3

Os rendimentos dos precursores de biocombustíveis são apresentados na Tabela 3. O HMF, principal produto da degradação da glicose, apresentou aumento de rendimento à medida que a produção desse monossacarídeo foi favorecida pelos diferentes pré-tratamentos. Esse comportamento indica que a maior disponibilidade de glicose durante a HAS também intensificou sua conversão em HMF. Em contrapartida, a condição EV-140 °C/HAS-280 °C apresentou o maior rendimento de furfural, provavelmente porque a menor severidade da explosão a vapor preservou parte da hemicelulose, posteriormente convertida em furfural durante a HAS. Nas demais condições integradas EV-HAS também foram obtidos maiores rendimentos de furfural em comparação com a biomassa sem pré-tratamento, indicando que a EV favoreceu a formação desse composto.

Tabela 3: Rendimentos em g/100g biomassa de precursores de biocombustíveis da palha de milho submetida a diferentes pré-tratamentos e sequencial hidrólise com água subcrítica.

Ensaio	HMF	Furfural	Total
Sem tratamento/HAS-280 °C	3,2 ±0,2	3,8 ±0,1	7,0 ±0,2
EV-140°C/HAS-280°C	3,6 ±0,6	5,4 ±1,1	9,0 ±1,7
EV-170°C/HAS-280°C	6,5 ±1,4	4,1 ±0,1	9,3 ±1,6
EV-200°C/HAS-280°C	7,3 ±1,8	4,6 ±1,2	11,9 ±0,6

O aumento da severidade do pré-tratamento favoreceu simultaneamente a formação de açúcares fermentescíveis e de compostos de degradação. Esse comportamento evidencia um compromisso inerente aos processos hidrotérmicos, em que maiores conversões da biomassa também aumentam a degradação dos monossacarídeos. Entretanto, quando o objetivo é a produção integrada de açúcares e moléculas plataforma, a maior formação de HMF e furfural deixa de representar exclusivamente uma desvantagem, passando a ampliar o potencial de aproveitamento da biomassa em uma abordagem de biorrefinaria.

Os resultados obtidos estão de acordo com estudos recentes sobre a integração da explosão a vapor com a hidrólise em água subcrítica. Trabalhando com palha de milho, verificaram que a explosão a vapor elevou significativamente o rendimento de açúcares fermentescíveis em relação à biomassa sem pré-tratamento, atribuindo esse comportamento ao aumento da acessibilidade da celulose após a remoção parcial da hemicelulose e às modificações estruturais da lignina. Os autores também observaram que o aumento da produção de açúcares foi acompanhado por maiores rendimentos de HMF e furfural, resultado semelhante ao verificado no presente estudo (VEZARO et al., 2025). De forma análoga, relataram aumento de 122% na produção de açúcares após a integração EV-HAS para casca de aveia (CARNEIRO et al., 2025), enquanto que múltiplos ciclos de explosão a vapor em casca de arroz aumentaram expressivamente a produção de açúcares fermentescíveis e, simultaneamente, reduziram a formação de compostos de degradação quando a hidrólise foi conduzida em temperatura moderada (230 °C) (DRASZEWSKI et al., 2025b).

Em conjunto, esses estudos indicam que a intensidade da hidrólise em água subcrítica exerce papel determinante no balanço entre a recuperação de açúcares fermentescíveis e sua conversão em ácidos orgânicos e moléculas plataforma, explicando a maior formação de HMF e furfural observada neste trabalho em função da temperatura de 280 °C utilizada na HAS.

A HAS da palha de milho *in natura* (Figura 6) apresentou maior rendimento de precursores de biocombustíveis, seguida pela produção de ácidos orgânicos e açúcares fermentescíveis. Observa-se que o rendimento de açúcares aumentou durante a rampa de aquecimento e nos primeiros minutos da etapa isotérmica, atingindo valores próximos de zero após aproximadamente 20 min de processamento (rampa de aquecimento + HAS a 280 °C). Em contrapartida, a formação de precursores de biocombustíveis continuou aumentando até o final do ensaio, aos 45 min. Esse comportamento indica que, após a

formação dos monossacarídeos, a temperatura de 280 °C favoreceu sua degradação por reações de desidratação, promovendo principalmente a conversão da glicose em HMF e da xilose em furfural (COCERO et al., 2018). Dessa forma, os resultados evidenciam uma mudança no mecanismo predominante ao longo do processamento, passando inicialmente pela hidrólise dos polissacarídeos e, posteriormente, pela conversão dos açúcares em precursores de biocombustíveis.

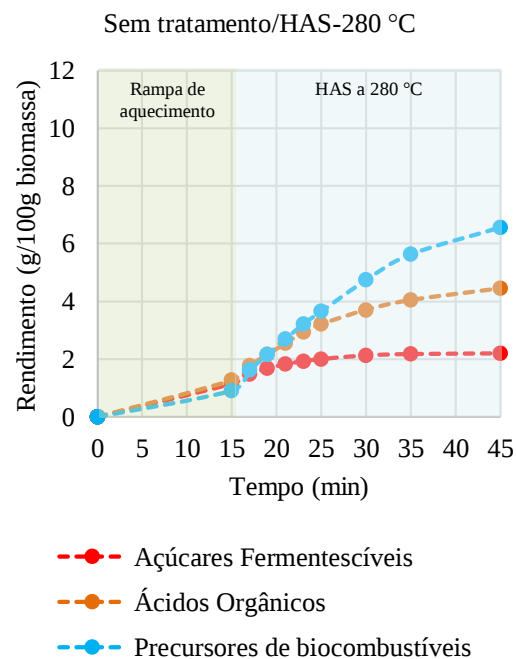


Figura 6: Perfil de rendimento de produtos a partir da HAS da palha de milho *in natura*.

A Figura 7 apresenta o perfil de rendimento dos produtos obtidos na condição EV-140 °C/HAS-280 °C. Em relação à HAS da biomassa *in natura*, os rendimentos de precursores de biocombustíveis e de açúcares fermentescíveis aumentaram 28% e 96%, respectivamente. Além disso, a produção de açúcares foi mantida até aproximadamente 25 min de processamento, período superior ao observado para a biomassa sem pré-tratamento. Ao final da rampa de aquecimento, o rendimento de açúcares já era superior ao obtido durante todo o processamento da biomassa *in natura*, indicando que a explosão a vapor favoreceu a ruptura inicial da matriz lignocelulósica e aumentou a acessibilidade da celulose e da hemicelulose à ação da água subcrítica. Embora a temperatura de 140 °C tenha promovido modificações estruturais mais discretas que as demais condições de EV, o pré-tratamento foi suficiente para potencializar a etapa subsequente de HAS, resultando em maior produção de açúcares fermentescíveis e, consequentemente, em maior formação de precursores de biocombustíveis.

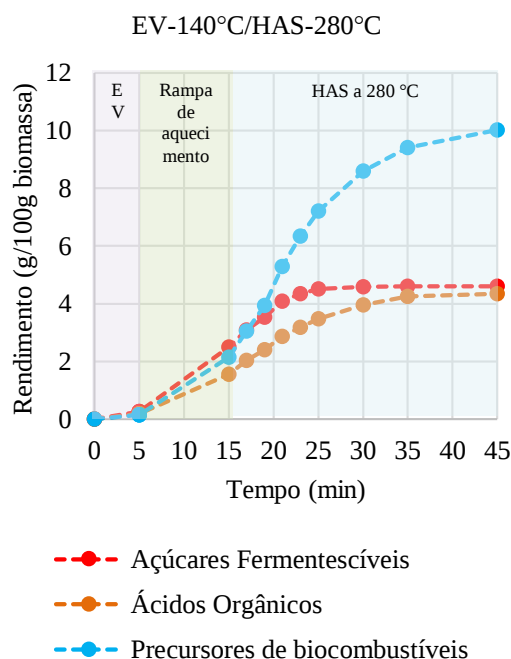


Figura 7: Perfil de rendimento de produtos a partir da HAS da palha de milho pré-tratada por EV a 140 °C.

A condição EV-170 °C/HAS-280 °C (Figura 8) promoveu aumentos de 260% e 33% nos rendimentos de açúcares fermentescíveis e precursores de biocombustíveis, respectivamente, em comparação à HAS da biomassa *in natura*. O rendimento máximo de açúcares foi atingido após aproximadamente 25 min de processamento hidrotérmico. Ao final da rampa de aquecimento, já havia sido obtida uma quantidade de açúcares superior à produzida durante todo o processamento da condição EV-140 °C/HAS-280 °C, evidenciando que o aumento da temperatura da explosão a vapor não apenas elevou a conversão da biomassa, mas também acelerou a hidrólise dos polissacarídeos.

Esse comportamento está associado à maior remoção da hemicelulose e às alterações estruturais promovidas na lignina, que aumentaram a acessibilidade da celulose à água subcrítica (VEZARO et al., 2025). Além disso, após 35 min de HAS, o rendimento de precursores de biocombustíveis apresentou apenas pequenos incrementos, atingindo aproximadamente 10 g/100 g de biomassa cerca de 10 min antes da condição EV-140 °C/HAS-280 °C. Esse resultado demonstra que o aumento da severidade da EV também acelerou a formação de moléculas plataforma, reduzindo o tempo necessário para atingir elevados rendimentos.

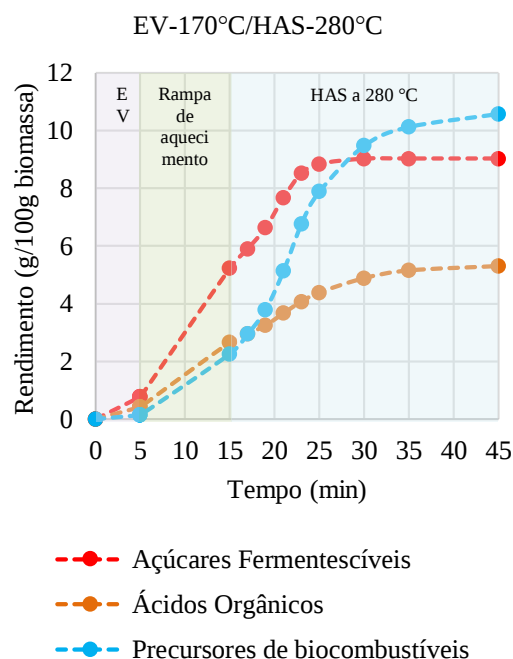


Figura 8: Perfil de rendimento de produtos a partir da HAS da palha de milho pré-tratada por EV a 170 °C.

A Figura 9 apresenta o perfil de rendimentos obtido na condição EV-200 °C/HAS-280 °C. Em comparação com a HAS da biomassa *in natura*, os rendimentos de açúcares fermentescíveis e de precursores de biocombustíveis aumentaram 312% e 70%, respectivamente. Nos primeiros 5 min de processamento, correspondentes à etapa de explosão a vapor, já foram obtidos aproximadamente 2 g/100g de biomassa de açúcares fermentescíveis e precursores de biocombustíveis. Esse resultado demonstra que, na maior temperatura de EV, parte da hemicelulose foi hidrolisada durante o próprio pré-tratamento, promovendo a liberação de açúcares e sua conversão em moléculas plataforma antes mesmo do início da HAS.

Além disso, a maior remoção da hemicelulose e as modificações estruturais da lignina favoreceram a hidrólise da fração celulósica durante a etapa subsequente de HAS. Após aproximadamente 30 min de processamento hidrotérmico, foram observados apenas pequenos incrementos no rendimento de açúcares, indicando que a maior parte da celulose acessível já havia sido convertida. Em contrapartida, a formação de precursores de biocombustíveis continuou aumentando até cerca de 12 g/100 g de biomassa aos 45 min, evidenciando que, após a conversão dos polissacarídeos, passaram a predominar as reações de degradação dos monossacarídeos em HMF, derivado da celulose.

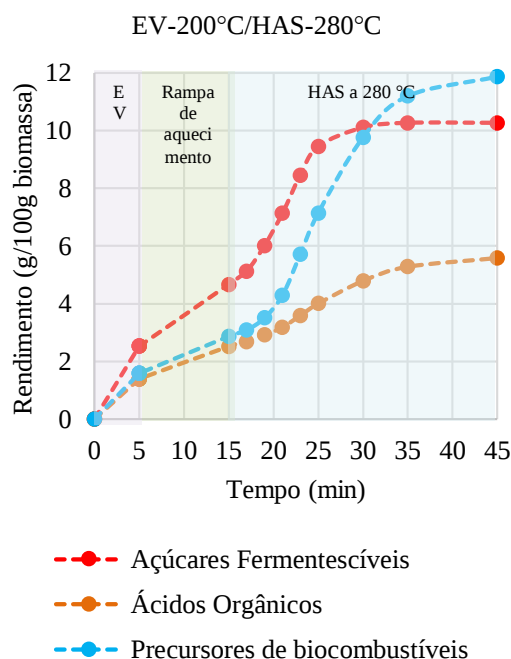


Figura 9: Perfil de rendimento de produtos a partir da HAS da palha de milho pré-tratada por EV a 200 °C.

O perfil de formação de ácidos orgânicos apresentou pequenas variações entre as diferentes condições de pré-tratamento e hidrólise. Ainda assim, a condição EV-200 °C/HAS-280 °C apresentou o maior rendimento, aproximadamente 14% superior ao obtido para a biomassa sem pré-tratamento. Destaca-se que, nos primeiros 5 min de processamento, correspondentes à etapa de explosão a vapor, já foram produzidos cerca de 1,6 g/100g de biomassa de ácidos orgânicos. Esse comportamento sugere que a maior severidade da EV favoreceu a degradação de compostos derivados da hemicelulose, a qual foi quase totalmente solubilizada durante essa etapa inicial.

O comportamento cinético observado ao longo da HAS semicontínua também é consistente com estudos recentes para diferentes biomassas lignocelulósicas submetidas à integração EV-HAS. Verificaram que, para casca de arroz, a produção máxima de açúcares ocorreu entre 6 e 10 min de hidrólise, tornando-se praticamente constante após aproximadamente 20 min (DRASZEWSKI et al., 2025b). De maneira semelhante, observaram que a hidrólise da casca de aveia foi essencialmente concluída entre 20 e 24 min de processamento (CARNEIRO et al., 2025). Esses resultados corroboram os perfis obtidos neste estudo, nos quais a formação de açúcares predominou na fase inicial da HAS, enquanto os tempos mais longos favoreceram a conversão dos monossacarídeos em HMF e furfural, evidenciando a existência de diferentes janelas

operacionais para maximizar açúcares fermentescíveis ou moléculas plataforma.

De modo geral, os resultados demonstram que o tempo de processamento pode ser ajustado de acordo com o produto de interesse. Tempos mais curtos favorecem a recuperação de açúcares fermentescíveis, reduzindo sua degradação, enquanto tempos mais longos promovem a conversão desses açúcares em HMF e furfural. Assim, a integração da explosão a vapor com a hidrólise em água subcrítica permite direcionar o processo para a produção predominante de açúcares fermentescíveis ou de precursores de biocombustíveis, ampliando o potencial de aplicação da palha de milho em biorrefinarias multiproduto.

CONCLUSÃO

A explosão a vapor modificou significativamente a composição da palha de milho, promovendo o enriquecimento da celulose e a remoção progressiva da hemicelulose com o aumento da temperatura de pré-tratamento. Essas alterações favoreceram a etapa subsequente de hidrólise com água subcrítica, aumentando os rendimentos de celobiose, glicose e xilose. A condição EV-200 °C/HAS-280 °C apresentou o melhor desempenho, alcançando 10,3 g/100g biomassa de açúcares fermentescíveis e 11,9 g/100g biomassa de precursores de biocombustíveis. Os resultados demonstram que a integração EV-HAS é uma estratégia promissora para a valorização da palha de milho, permitindo a produção simultânea de açúcares para bioprocessos e moléculas plataforma para síntese de biocombustíveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP), gerenciado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processo nº 2025/03670-4). Os autores também agradecem ao PRH52/UFSM pelo suporte ao desenvolvimento deste trabalho. Flávio Dias Mayer agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro (processos nº 405059/2021-3 e 315671/2023-8) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) (processo nº 24/2551-0001253-2).

REFERÊNCIAS

AIROLDI COLOMBO, F. et al. Effect of Steam Explosion Pretreatment on Improving Enzymatic Hydrolysis and Alcoholic Fermentation of Corn Stover. *Sustainability*, v. 17, n. 24, p. 11287, 16 dez. 2025.



AMEEN, M. et al. An outlook and prospective on emergent technologies for 5-hydroxymethylfurfural synthesis- a renewable fuel additive. **Energy Conversion and Management**: X, v. 27, p. 101097, jul. 2025.

ASSINI, P. et al. Intensification of delignification using steam explosion combined with enzymatic hydrolysis for enhanced fermentable sugar production. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 209, p. 110177, mar. 2025.

BAIHAQI, B. et al. Electrochemical valorization of cellulose, hemicellulose, and lignin derivatives into functional products: A mini-review. **Current Opinion in Electrochemistry**, v. 55, p. 101806, fev. 2026.

CARNEIRO, S. C. et al. Hydrothermal processing of oat hulls: Integration of steam explosion and sequential subcritical water hydrolysis in a single unit for the production of fermentable sugars and platform chemicals. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 13, n. 5, p. 119048, out. 2025.

CHAUHAN, A. S. et al. A comprehensive study of palladium-based catalysts on different supports for the hydrogenolysis of 5-hydroxymethylfurfural (HMF) to 2,5-dimethylfuran (DMF) biofuel. **Biomass and Bioenergy**, v. 185, p. 107209, jun. 2024.

CHEN, J. et al. Screw extrude steam explosion: A promising pretreatment of corn stover to enhance enzymatic hydrolysis. **Bioresource Technology**, v. 161, p. 230–235, jun. 2014.

CHEN, S.-F. et al. Compositional Analysis of Water-Soluble Materials in Corn Stover. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, n. 15, p. 5912–5918, 1 jul. 2007.

COCERO, M. J. et al. Understanding biomass fractionation in subcritical & supercritical water. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 133, p. 550–565, mar. 2018.

DO NASCIMENTO, M. A. et al. Tailored hierarchical zeolites for efficient catalytic upgrading of furfural into sustainable aviation fuel precursors and biofuels via aldol condensation and domino reactions. **Applied Catalysis A: General**, v. 718, p. 120926, maio 2026.

DRASZEWSKI, C. P. et al. Subcritical water hydrolysis of soybean hulls pretreated by steam explosion: High pressure integrated process strategy. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 216, p. 106448, fev. 2025a.

DRASZEWSKI, C. P. et al. Multi-Cycle steam explosion combined with subcritical water

Hydrolysis: An integrated process for maximizing sugar yields from rice husk. **Bioresource Technology**, v. 436, p. 132989, nov. 2025b.

HAMES, B. et al. Preparation of Samples for Compositional Analysis: Laboratory Analytical Procedure (LAP); Issue Date 08/08/2008. n. August, 2008.

HARSHA VARTHAN, M. K. et al. Harnessing global biomass for bioenergy: Assessment techniques, technological advances, and environmental perspectives. **Fuel**, v. 405, p. 136599, fev. 2026.

MENOR, K. L. et al. A review of syngas from corn stover gasification for sustainable aviation fuels: Progress, process, challenges, and perspectives for future development. **Biomass Futures**, v. 2, p. 100048, jun. 2026.

SLUITER, A. et al. Determination of Ash in Biomass. **A national laboratory of the U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency & Renewable Energy**, v. NREL/TP-51, 2008a.

SLUITER, A. et al. Determination of Extractives in Biomass. **A national laboratory of the U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency & Renewable Energy**, v. NREL/TP-51, 2008b.

SLUITER, A. et al. Determination of structural carbohydrates and lignin in Biomass - NREL/TP-510-42618. **National Renewable Energy Laboratory**, n. April 2008, p. 17, 2008c.

TAN, Y. et al. The effect of biomass solid loading on ethanol fermentation with an engineered yeast. **Process Biochemistry**, v. 163, p. 27–31, abr. 2026.

TEN CATEN, L. R. et al. An integrated hydrothermal processing strategy for sweet sorghum bagasse to improve fermentable sugar production. **Biomass and Bioenergy**, v. 212, p. 109318, set. 2026.

VEZARO, F. D. et al. Valorization of corn stover in a single experimental unit: The synergistic effects of steam explosion and semi-continuous subcritical water processing. **Science of The Total Environment**, v. 959, p. 178268, jan. 2025.

ZHAO, Y. et al. A critical review of recent advances in the production of furfural and 5-hydroxymethylfurfural from lignocellulosic biomass through homogeneous catalytic hydrothermal conversion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, p. 110706, abr. 2021.

ZHONG, X. et al. Full fractionation of cellulose, hemicellulose, and lignin in pith-leaf containing corn stover by one-step treatment using aqueous formic acid. **Industrial Crops and Products**, v. 172, p. 113962, nov. 2021.