

APLICAÇÃO DO MODELO FUZZY TAKAGI-SUGENO PARA A ESTIMAÇÃO DO POTENCIAL DE MERCADO DE MADEIRA SERRADA DE CONÍFERAS DESTINADAS À CONSTRUÇÃO CIVIL NOS PAÍSES EUROPEUS NO PERÍODO ENTRE 2007–2023

Gustavo França Albano de Paula¹; Wylmor Constantino Tives Dalfovo²; Elias Ântonio Morgan³

Resumo

Este artigo apresenta a aplicação do modelo *fuzzy* de Takagi-Sugeno (T-S) para estimar o potencial de mercado da madeira serrada de coníferas (classe C) destinada à construção civil nos países europeus entre 2007-2023. Utilizando dados de importação, preço unitário e demanda da construção civil, o modelo foi desenvolvido no ambiente MATLAB, com base em funções de pertinência triangulares e trapezoidais. Para a validação, foi criado um cenário hipotético baseado na combinação de diferentes níveis de importação, preço e demanda, simulando a atratividade do mercado sob diferentes conjunturas econômicas. Os resultados evidenciam a eficácia do modelo T-S em representar sistemas econômicos complexos com alto grau de incerteza, contribuindo para a tomada de decisão estratégica no setor florestal e da construção sustentável. A abordagem *fuzzy* demonstrou ser uma ferramenta eficaz para previsão e análise de mercado em contextos não lineares e imprecisos.

Palavras-chave: lógica *fuzzy*; construção sustentável; mercado europeu.

Abstract

This article presents the application of the Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model to estimate the market potential of coniferous sawn wood (class C) for civil construction in European countries between 2007-2023. Using data on imports, unit price, and construction demand, the model was developed in the MATLAB environment, based on triangular and trapezoidal membership functions. For validation, a hypothetical scenario was created based on the combination of different levels of imports, price, and demand, simulating market attractiveness under different economic conjunctures. The results demonstrate the effectiveness of the T-S model in representing complex economic systems with a high degree of uncertainty, contributing to strategic decision-making in the forestry sector and sustainable construction. The fuzzy approach proved to be an effective tool for market forecasting and analysis in non-linear and imprecise contexts.

Keywords: fuzzy logic; sustainable construction; european market.

Introdução

A madeira tem sido, ao longo da história, um dos materiais mais utilizados pelo ser humano na construção de habitações, desde estruturas rudimentares até edificações sofisticadas. Sua abundância, facilidade de manuseio e propriedades como isolamento térmico e resistência

¹ Graduanda em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado do Mato Grosso-UNEMT. E-mail: maria.welma@unemat.br.

² Doutor em Economia pela Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, professor de graduação e do Programa de Pós-Graduação em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia da Universidade do Estado do Mato Grosso-UNEMT. E-mail: wylmor.dalfovo@unemat.br.

³ Doutor em Administração pela Universidad Autónoma de Asunción-UAA, professor da Universidade do Estado do Mato Grosso-UNEMAT. E-mail: morgan@unemat.br.

mecânica garantiram sua presença constante nas construções, especialmente em regiões de clima extremo, como nos países europeus. A madeira serrada de coníferas, especialmente as espécies classificadas como classe C, apresenta características ideais para o setor da construção civil, como durabilidade, leveza e eficiência energética, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental.

Na União Europeia (UE), a construção civil representa uma atividade econômica de grande relevância. Nesse contexto, a demanda por madeira serrada está associada não apenas à necessidade de material construtivo, mas também às políticas ambientais e ao compromisso com a redução de emissões de carbono, o que impulsiona o uso de materiais renováveis. As florestas de coníferas da Europa, amplamente manejadas de forma sustentável, fornecem matéria-prima de alta qualidade para esse setor.

Contudo, a análise do potencial de mercado para esse tipo de madeira requer o tratamento de variáveis incertas e interdependentes, como demanda da construção civil, volumes de importação e preços unitários. Diante disso, este trabalho propõe a aplicação do modelo *fuzzy* de T-S, uma abordagem eficaz na modelagem de sistemas complexos com incertezas, para estimar o potencial de mercado da madeira serrada de coníferas na construção civil europeia, no período de 2007 a 2023. Mediante simulação de cenários, busca-se oferecer uma ferramenta de apoio à decisão estratégica para o setor florestal e para políticas de construção sustentável.

1 Desenvolvimento do trabalho

Ao longo da história, a madeira foi utilizada como um dos primeiros materiais às construções de casas. No período pré-histórico, as sociedades abrigavam-se em estruturas simples construídas com troncos, galhos e folhas, aproveitando-se da madeira das florestas disponíveis para sua utilização. No decorrer das primeiras civilizações, tais como aquelas situadas no norte da Europa, Ásia e Américas, a madeira era usada não apenas pela facilidade de extração e manuseio, mas também por sua capacidade de isolamento térmico, oferecendo conforto mediante as oscilações térmicas em diferentes climas (Filip, 2024).

1.1 A Madeira na União Europeia

A madeira desempenha papel essencial nas construções habitacionais dos países europeus, especialmente pela incidência de um inverno muito rigoroso, com temperaturas, muitas vezes abaixo dos -30°C. Dentre as tipologias madeireiras mais empregadas nesse contexto, destaca-se a madeira serrada de coníferas (classe C), proveniente de espécies como pinheiro e abeto, amplamente utilizadas na Europa por sua durabilidade, facilidade de

processamento e eficiência térmica. CEI-Bois (2011), destaca que a madeira apresenta desempenho isolante superior em comparação a materiais convencionais, sendo recomendada em zonas com temperaturas ativas.

Segundo Ramage *et al.* (2016), as coníferas possuem fibras longas e uniformes, oferecendo resistência mecânica e estabilidade dimensional ideais para construção. Sua estrutura celular também proporciona baixa condutividade térmica, tornando-as eficientes como isolante natural.

Segundo o Open Risk Manual (2025), dentro desse setor a construção de edifícios, classificada sob a NACE F41, destaca-se como uma atividade de grande relevância econômica. Essa classificação é uma ampla gama de atividades a qual inclui: construção geral de edifícios de todos os tipos, como residenciais, comerciais e públicas; trabalhos novos, reparos, ampliações e alterações; montagem de edifícios pré-fabricados no local; construções temporárias. Além disso, essa classificação é subdividida em duas categorias específicas: F41.1: Desenvolvimento de projetos de construção; F41.2: Construção de edifícios residenciais e não residenciais.

As políticas da UE influenciam diretamente o mercado madeireiro. Embora não haja uma política florestal comum, a Política Agrícola Comum (PAC), através do Fundo Europeu Agrícola de Desenvolvimento Rural - FEADER, destinou cerca de €8,2 bilhões ao setor florestal entre 2015 e 2020. Além disso, a política energética da UE estimula o uso de biomassa, com metas de 27% de fontes renováveis até 2030. A política ambiental prevê gestão sustentável de florestas e as políticas climáticas valorizam o papel das florestas no sequestro de carbono. O sistema de compras verdes da UE também prioriza produtos certificados.

Segundo Yang *et al.* (2024), a substituição de materiais como aço e concreto por madeira reduz as emissões de carbono em edifícios residenciais e comerciais, contribuindo para a neutralidade climática da UE27. Como exemplo prático de inovação no setor, destaca-se o sistema Build-in-Wood, desenvolvido para atender às exigências de projetos modernos e sustentáveis. O sistema permite construções em madeira de múltiplos andares demonstrando a flexibilidade, eficiência e viabilidade do material no contexto da construção civil europeia (BUILDINWOOD, 2025).

Lógica Fuzzy e Economia

A Inteligência Artificial (IA) tem se mostrado uma poderosa ferramenta para análise de dados econômicos complexos, especialmente em contextos em que há múltiplas variáveis envolvidas. Entre as abordagens mais utilizadas, destacam-se as redes neurais, algoritmos

genéticos e os sistemas *fuzzy*, que possibilitam a modelagem de informações subjetivas e imprecisas (Russel e Norvig, 2022).

A IA pode ser utilizada para prever demandas, analisar o comportamento do mercado e otimizar processos logísticos e produtivos, por meio da combinação de dados históricos e variáveis econômicas (Aguiar e Junior, 2007). Segundo esses autores, a inteligência computacional contribui significativamente para a tomada de decisões administrativas e econômicas, proporcionando maior adaptabilidade diante de mudanças e mais precisão na análise do impacto de políticas de preços.

Segundo Simões e Shaw (2007), a lógica clássica baseia-se na bivalência: uma proposição é verdadeira (1) ou falsa (0). A lógica *fuzzy*, por outro lado, adota a multivalência, reconhecendo que há um descompasso entre a rigidez da lógica binária e a complexidade do mundo real, ou seja, em que existem infinitas possibilidades e nuances. De acordo com os autores, a lógica *fuzzy* é uma técnica que incorpora a forma humana de raciocínio em sistemas de controle. Um controlador *fuzzy* típico pode operar com raciocínio dedutivo ou indutivo. No caso do dedutivo, o autor aborda que ele pode inferir conclusões a partir de informações já conhecidas, já no indutivo ele aprende e generalizar por meio de exemplos. Esse tipo de controlador indutivo também é chamado de controle *fuzzy* adaptativo.

A lógica *fuzzy*, introduzida por Zadeh (1965), é uma extensão da lógica booleana tradicional, permitindo trabalhar com graus de verdade entre 0 e 1. Isso a torna ideal para representar situações incertas ou subjetivas, como a percepção de qualidade ou níveis de demanda.

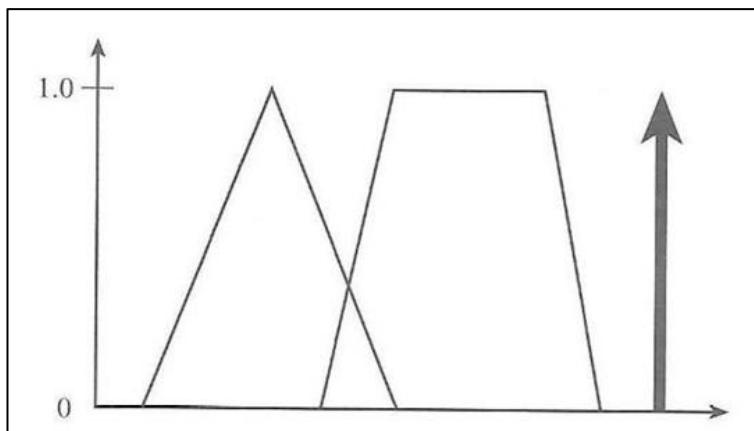
O método heurístico descrito por Simões e Shaw (2007) consiste na execução de tarefas com base em experiências prévias, por meio de regras do tipo: SE <condição> ENTÃO <consequência>. Ou ainda: SE <condição> ENTÃO <ação>. Essas regras podem ser associadas a termos linguísticos como “alto” e “baixo”, definidos por funções de pertinência *fuzzy*. Ainda segundo os autores, com base no teorema da aproximação *fuzzy*, qualquer curva pode ser representada verbalmente por meio de um número finito de regiões *fuzzy*.

Na teoria clássica dos conjuntos, um subconjunto *C* de um conjunto *S* é definido como um mapeamento dos elementos de *S* para o conjunto [0,1], representando pertinência (1) ou não-pertinência (0). Já um conjunto *fuzzy* contínuo é representado por uma função de pertinência, que atribui valores intermediários de 0 a 1 (Aguiar e Junior, 2007).

De acordo com Simões e Shaw (2007), a função de pertinência é uma função matemática na forma gráfica ou tabulado que atribui valores *fuzzy* para os possíveis valores de uma variável dentro de seu universo de discurso (conjunto de valores possíveis). A Figura 1, por exemplo,

ilustra três tipos de funções de pertinência: triangular, trapezoidal e a função "fuzzy ton", que apresenta uma saída em forma de pulso.

Figura 1- Exemplos de Funções de Pertinências.



Fonte: Simões e Shaw (2007).

Segundo Simões e Shaw (2007), na função triangular quando aberta, são necessários três parâmetros distintos (a , b , c). Já no caso da função triangular semiaberta no início, os dois primeiros parâmetros são iguais ($a=b$) e apenas o terceiro (c) é diferente. De modo similar, para a função triangular semiaberta no final, o primeiro parâmetro é distinto (a) e os dois últimos são iguais ($b=c$). Os parâmetros são posicionados no eixo x da função, determinando em que ponto cada variável começa e termina em termos de seu universo de discurso. É importante observar que o modelo para estar estruturado corretamente, o primeiro conjunto *fuzzy* não deve começar no eixo x (valor zero de pertinência), a menos que o fenômeno em estudo exija isso. Quando um conjunto começa no eixo x, isso implica que, quanto mais próximo de zero, menor é o grau de pertinência ao conjunto. De forma análoga, o último conjunto também não deve terminar no eixo x, pois isso significaria que, a partir de determinado valor, elementos que deveriam pertencer mais fortemente ao conjunto apresentam grau de pertinência cada vez menor.

A parte da fuzzificação segundo os mesmos autores, é o processo de mapeamento dos valores numéricos para valores linguísticos *fuzzy*, utilizando funções de pertinência. Esse pré-processamento transforma os dados de entrada em categorias ou classes qualitativas, reduzindo a complexidade do sistema e permitindo uma representação mais próxima da linguagem humana.

O modelo de inferência *fuzzy* de T-S, proposto em 1985, se destaca pela sua capacidade de representar sistemas complexos de forma compacta e eficiente. No modelo T-S, os antecedentes permanecem *fuzzy*, mas os consequentes são expressos como funções matemáticas (geralmente constantes ou polinomiais) das variáveis de entrada (Takagi e Sugeno, 1985). Isso

o diferencia do modelo de Mamdani, no qual tanto antecedentes quanto consequentes são conjuntos *fuzzy*.

Uma das principais vantagens do modelo T-S é que ele dispensa o processo de defuzzificação, reduzindo a complexidade computacional. Além disso, permite a modelagem de sistemas não-lineares como combinações ponderadas de modelos lineares locais, possibilitando análises mais precisas. Sua estrutura facilita a interpretação e a implementação, especialmente quando se trabalha com dados discretos e relações econômicas aproximadas.

Segundo Takagi e Sugeno (1985), a inferência no modelo T-S é feita a partir do cálculo da pertinência das entradas aos conjuntos *fuzzy* definidos, seguido da ponderação das saídas de cada regra. A saída final é obtida pela média ponderada das saídas das regras ativadas, conforme a fórmula:

$$F(x) = \frac{\sum_{k=1}^r h_k(x) \times f_k(x, \theta)}{\sum_{k=1}^r h_k(x)} \quad (1)$$

h_k representa a pertinência relativa (ou grau de ativação) da k-ésima regra, e f_k é a função de saída correspondente, que pode ser uma função constante, linear ou polinomial das variáveis de entrada x, parametrizada por θ .

A saída do sistema é obtida por meio de uma média ponderada dos consequentes das regras ativadas, como segue:

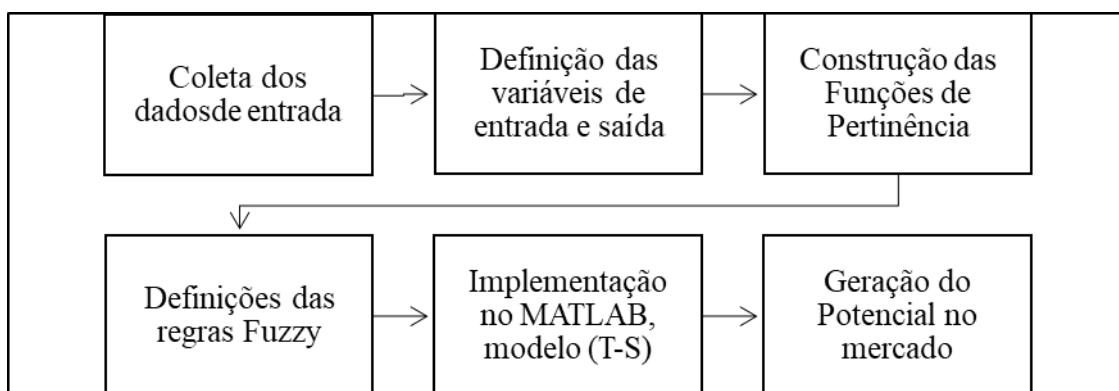
$$y = \frac{\sum_{i=1}^k w_i \times Q_i}{\sum_{i=1}^k w_i} \quad (2)$$

Q_i é o valor constante associado à regra i e w_i é sua ativação. Este processo exemplifica a eficiência do modelo T-S de ordem zero, destacando sua aplicabilidade em problemas de controle e tomada de decisão sob incerteza, com base em entradas imprecisas ou subjetivas. A lógica *fuzzy* em especial, o modelo T-S, mostram-se especialmente promissores para aplicações econômicas, uma vez que permitem a modelagem de relações complexas com imprecisão tolerável.

2 Método

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa, com método experimental, desenvolvida por meio da modelagem computacional *fuzzy* utilizando o software *MATLAB*. A seguir será apresentado um fluxograma com as etapas do processo, tais etapas consistem em:

Figura 2 - Fluxograma das Etapas



Fonte: Elaboração Própria (2025).

A coleta de dados consiste no levantamento de informações sobre a produção de madeira serrada, a demanda na construção civil e os preços no mercado europeu no período de 2007 a 2023, com base em fontes como a ITTO (2025) e o Eurostat. Em seguida, realiza-se a definição das variáveis, por meio da identificação e classificação das variáveis de entrada (importação, preço e demanda) e da variável de saída (potencial no mercado), estabelecendo-se seus respectivos intervalos e características.

A etapa de fuzzificação envolve a transformação dessas variáveis numéricas em conjuntos *fuzzy*, utilizando funções de pertinência triangulares e trapezoidais para representar termos linguísticos como “Baixo”, “Médio” e “Alto”. Na sequência, procede-se ao estabelecimento das regras, que consiste na formulação de regras de inferência no formato “SE – ENTÃO”, relacionando as variáveis de entrada com a de saída, com base na experiência e em dados do mercado.

A implementação do modelo T-S é realizada no *MATLAB*, utilizando a *Fuzzy Logic Toolbox* para construir o sistema, inserir as funções de pertinência e configurar as regras de inferência. Por fim, é feita a interpretação dos resultados, com uma análise crítica dos dados obtidos, a fim de identificar tendências e padrões no mercado de madeira serrada. A tabela 1 a seguir apresenta o volume importado de madeira ao longo dos anos.

Tabela 1 - Importação de madeira serrada (C) da Europa 27+: período 2007-2023, em (1000m³)

ANO	QUANTIDADE
2007	35.177,72
2008	29.517,08
2009	23.807,68
2010	26.527,46
2011	26.262,49
2012	25.072,91
2013	24.710,46
2014	26.871,92
2015	26.546,16
2016	28.200,48
2017	30.221,35
2018	32.824,17
2019	34.559,78
2020	33.570,00
2021	35.037,73
2022	30.016,66
2023	26.646,85

Fonte: Adaptado de ITTO (2025)

Observa-se com os dados que a quantidade total do período entre 2007-2023 foi de 495.570,90 mil m³, destacando que para o período entre 2007-2015 a quantidade total foi de 244.493,18 mil m³, representando 50,66% do total geral. Quando observado o período entre 2016-2023, a quantidade importada de madeira foi de 251.077,02, representando 49,34%, reforçando que no segundo período de análise as importações de madeira aumentaram. A Tabela 2 destaca o preço unitário em € de importação para o m³ de madeira.

Tabela 1 - Preço unitário da madeira serrada (C) importada da Europa 27+, período 2007-2023, em (€/1000m³)

ANO	VALOR UNITÁRIO
2007	268,54
2008	260,25
2009	242,93
2010	250,77
2011	269,52
2012	244,95
2013	253,67
2014	256,55
2015	212,6
2016	209,99
2017	219,95
2018	228,38
2019	194,72
2020	222,7
2021	397,81
2022	389,44
2023	267,59

Fonte: Adaptado de ITTO (2025).

A média de preços no período entre 2007-2023 foi de € 252,38, porém observa-se que para o período entre 2007-2015, a média de preços foi de € 251,08, enquanto para o período

entre 2016-2023 foi de €\$ 253,83, destacando que embora as variações de preços oscilem ano-a-ano, na média as variações apresentaram-se menores. A Tabela 3 destaca as variações percentuais relativas as construções de unidades habitacionais na União Europeia no período entre 2007-2023.

Tabela 2- Demanda da construção civil na União Europeia no período entre 2007-2023 em (%)

Ano	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2007	-4,3	1,7	-0,7	0,3	-0,9	-0,4	0,9	-0,1	-0,2	0,3	-0,6	0,6
2008	2,1	0,9	-0,7	-2,5	-0,6	-0,4	-0,9	0,9	-2,0	-1,4	-1,1	-2,0
2009	-0,9	2,9	-1,0	-0,9	-0,9	0,8	-0,8	-0,4	-0,6	-1,6	0,3	-2,7
2010	-1,5	-1,7	4,0	-1,3	-0,2	8,5	-8,6	-0,3	0,4	0,5	-1,0	-6,1
2011	6,7	0,9	-0,9	0,0	1,3	-1,9	0,6	-0,2	0,4	-2,7	3,2	-1,5
2012	2,3	-9,9	9,8	-2,3	0,6	-0,6	-0,2	1,2	-2,2	0,5	-0,4	-1,8
2013	-1,5	-0,2	-1,8	3,2	0,2	1,2	1,1	-0,2	0,0	0,4	-1,2	1,0
2014	0,5	-0,3	0,7	-0,3	-2,3	0,7	-0,1	0,3	-0,6	1,2	-1,6	1,1
2015	-0,2	-1,6	2,3	-0,9	0,1	0,2	-0,9	0,4	0,3	0,1	1,2	-0,2
2016	0,8	-1,5	0,0	0,4	0,1	0,1	0,8	1,3	-0,6	0,0	1,0	0,3
2017	-2,1	3,1	1,2	0,2	0,5	-0,1	0,1	0,7	-0,8	1,4	0,1	1,0
2018	-1,6	-2,3	-0,7	2,7	0,5	1,3	0,3	0,5	0,4	-0,5	0,2	1,6
2019	-2,8	3,1	0,0	-0,1	-0,8	0,0	0,5	-0,1	0,4	-0,9	0,2	-0,1
2020	2,4	-0,8	-15,4	-14,5	20,4	6,0	0,8	3,0	-1,4	-0,2	1,2	1,6
2021	-3,0	-2,4	4,7	0,4	0,0	0,7	-0,3	-0,9	1,6	0,5	0,5	-1,0
2022	2,8	0,5	0,6	-1,1	0,6	-0,7	-1,1	0,5	-0,2	0,9	0,4	-2,5
2023	3,0	1,1	-0,9	-0,7	0,7	-0,3	0,2	-0,2	0,1	-0,5	-0,3	0,9

Fonte: Adaptado de Eurostat (2025)

Considerando a demanda de construção civil nos países da Europa, considerando os 27+, observam-se oscilações tanto positivas como negativas na quantidade de unidades construídas em função dos diferentes níveis de demanda que se apresentam nestes países, ou seja, países localizados mais no norte da Europa (Escandinava) a demanda é menor do que para os países localizados em regiões mais temperadas da União Europeia, neste caso, Itália, Espanha e Portugal.

Após a exposição dos dados mais gerais, e considerando o sistema *fuzzy* proposto, foram utilizadas três variáveis de entrada: importação (1000m³); preço (€/1000m³) e demanda (%). A variável de saída foi determinada como potencial. Para a elaboração do modelo T-S consistiu em duas partes principais:

Funções de Pertinência Fuzzy: Estas funções descrevem as incertezas dos dados de entrada. Para as variáveis de entrada, definimos três categorias (Baixa, Média, Alta) com base nas funções de pertinência trapezoidais e triangulares;

Regras de Inferência: A lógica *fuzzy* foi utilizada para gerar regras que descrevem as relações entre as variáveis de entrada (importação, preço e demanda) e a variável de saída (potencial). A saída foi modelada como uma combinação linear dos fatores de entrada.

Como estão sendo utilizadas três variáveis de entrada, ou seja, importação, preço e demanda na construção e cada uma delas é dividida em três categorias (baixa, média e alta), obtém-se um total de 27 combinações possíveis. Essas combinações foram organizadas em três grupos distintos, conforme o nível da variável importação: alto, médio e baixo.

O conjunto de 27 regras do modelo *fuzzy* foi estruturado com base nos princípios fundamentais da teoria econômica apresentado por Varian (2012) dividida em princípio de otimização e princípio de equilíbrio, buscando averiguar preço e quantidade de equilíbrio. Organizamos as regras em três grupos principais de acordo com os níveis de importação, refletindo diferentes cenários de oferta externa no mercado.

Segundo Varian (2012), o modelo incorpora a teoria econômica ao considerar que o potencial de mercado resulta da interação dinâmica entre importação, preço e demanda, semelhante ao equilíbrio entre oferta e demanda nos mercados competitivos. Assim como no mercado de apartamentos, em que o preço de equilíbrio ocorre quando a quantidade demandada se iguala à quantidade ofertada, nosso modelo *fuzzy* identifica o potencial de mercado através do balanço destas três variáveis.

A influência do preço é evidente nas regras, ou seja, preços baixos geralmente estimulam o potencial, enquanto preços altos o diminuem, refletindo o comportamento dos consumidores que buscam maximizar seu bem-estar (princípio de otimização). No entanto, o preço isoladamente não determina o potencial - sua interação com os outros fatores é crucial.

A importação funciona como um indicador de oferta externa ou competição no mercado. Quando a importação é baixa, o potencial tende a ser maior para combinações favoráveis de preço e demanda, similar a um mercado com oferta restrita no qual os preços podem se manter elevados. Conforme a importação aumenta, o potencial geralmente diminui, simulando o efeito de maior oferta que pressiona os preços para baixo no equilíbrio de mercado.

A demanda completa esta tríade de fatores. Uma demanda positiva frequentemente eleva o potencial enquanto uma demanda negativa o reduz, refletindo a dinâmica natural dos mercados. Esta relação captura situações em que, por exemplo, mesmo com preços altos, uma demanda positiva em um cenário de baixa importação ainda pode gerar potencial médio.

O modelo também representa desequilíbrios temporários de mercado, que mesmo com demanda negativa, diferentes níveis de importação combinados com preço baixo resultam em potenciais variados (médio e baixo, respectivamente), assim como no mercado de apartamentos, os preços abaixo do equilíbrio geram excesso de demanda e preços acima do equilíbrio resultam em apartamentos vazios.

Esta estruturação não apenas fornece uma representação fiel dos mecanismos econômicos fundamentais, mas também oferece um modelo prático para avaliação de potencial em diferentes configurações de mercado, permitindo análises mais precisas e tomadas de decisão mais fundamentadas.

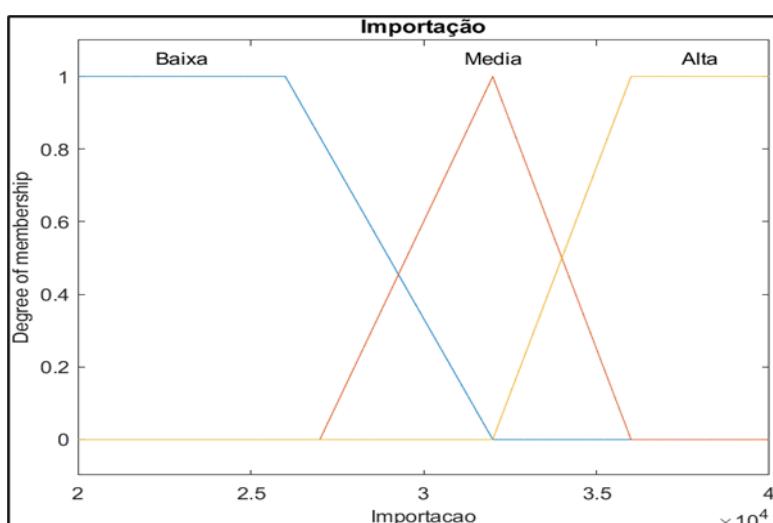
A implementação do modelo *fuzzy* de T-S foi realizada no *MATLAB*, utilizando o *Fuzzy Logic Toolbox*. Foram definidos os conjuntos *fuzzy* para as variáveis de entrada: importação, preço e demanda na construção. As funções de pertinência adotadas foram do tipo triangular e trapezoidal, enquanto as regras do sistema seguiram a estrutura SE-ENTÃO. Cada regra teve uma função consequente polinomial do tipo $f(x, y, z) = ax + by + cz + d$, os coeficientes foram calibrados com base nos dados coletados.

3 Resultados e Discussão

O presente estudo tem como objetivo avaliar o impacto de variáveis econômicas como importação, preço e atividade do setor da construção civil na previsão do potencial de atratividade e viabilidade do mercado europeu de madeira serrada, ou seja, o quanto promissor e acessível é o mercado europeu para a comercialização de madeira serrada destinada à construção civil. E para isso, foi desenvolvido um modelo *fuzzy* T-S para prever esse potencial.

A seguir, as Figuras 3, 4 e 5 ilustram as funções de pertinência *fuzzy* associadas às variáveis de entrada em um sistema *fuzzy*. Cada função está relacionada a um fator que influencia a previsão, utilizando, nesse caso, o modelo T-S. O eixo X representa o discurso do universo, o eixo Y representa o grau de pertinência, variando de 0 a 1 e as curvas coloridas indicam diferentes níveis de pertinência.

Figura 3 - Função de Pertinência da Importação

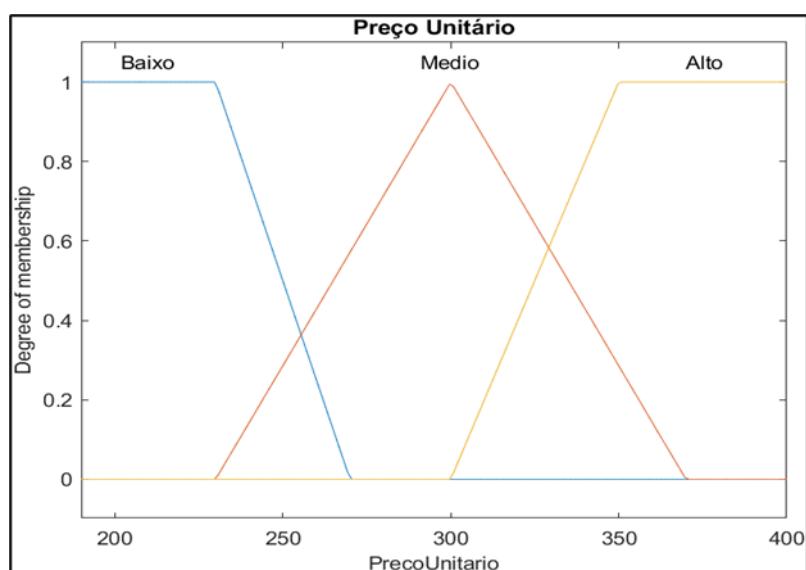


Fonte: Elaboração Própria (2025).

Para analisar função de pertinência da Figura 3, podemos pegar um determinado valor de importação, por exemplo 30.000 m³ e verificar qual é o grau de pertinência com base nas curvas de Baixa, Média e Alta. No caso da curva de Baixa notamos que se grau de pertencimento ao conjunto é de aproximadamente 0,2. Para o mesmo volume de 30.000 m³, o grau de pertinência para importação média é de 0,7 e para importação alta é 0.

Isso significa que, com um volume de importação de 30.000 m³, pertence predominantemente ao conjunto importação média (0,7), tem baixa pertinência ao conjunto importação baixa (0,2) e não pertence ao conjunto importação alta (0).

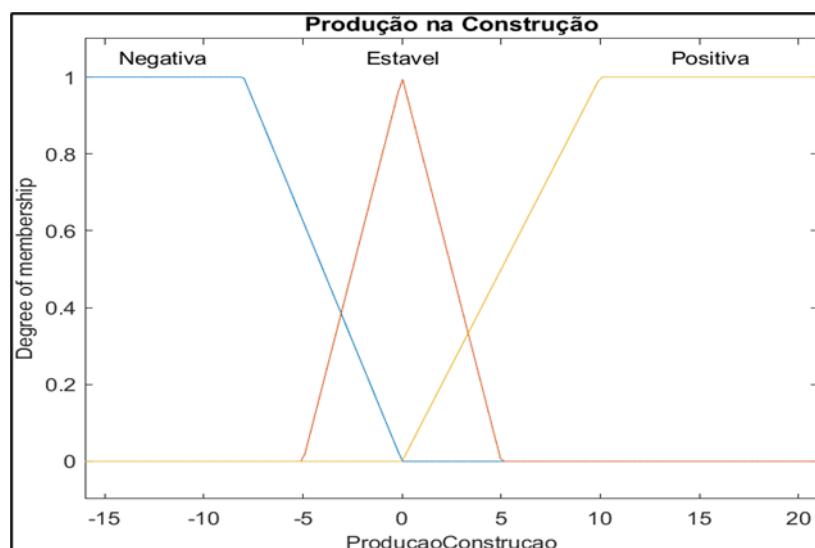
Figura 4 - Função de Pertinência do Preço.



Fonte: Elaboração Própria (2025).

A análise da função de pertinência para o preço unitário segue a mesma lógica. Se tomarmos o valor de € 250, o grau de pertinência para o conjunto baixo é aproximadamente 0,4, o mesmo ocorrendo para o conjunto médio. Para o conjunto alto, a pertinência é zero. Isso significa que um valor de importação de € 250, pertence predominantemente ao conjunto importação baixo e médio (0,4) e não ao conjunto valor unitário de importação alta (0).

Figura 5 - Função de pertinência da Demanda de Construção.

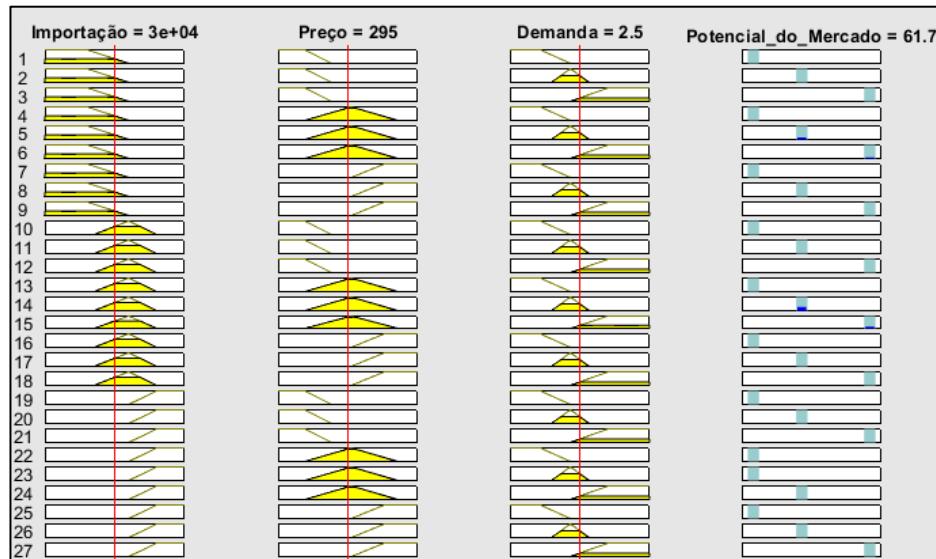


Fonte: Elaboração Própria (2025).

No caso da Figura 5, podemos tomar como exemplo o parâmetro de valor 5. O grau de pertinência para cada tipo seria: (0) para o conjunto negativa, (0) para estável e aproximadamente (0,3) para positiva. Isso significa que, com uma variação de 5% na demanda da construção, esse valor pertence predominantemente ao conjunto positiva (0,3), e não pertence aos conjuntos negativa e estável (0).

Para a validação do modelo, foram criados três cenários hipotéticos baseados em dados históricos de importação, preço e demanda da construção civil europeia, simulando possíveis combinações dessas variáveis para avaliar a atratividade do mercado. Nas Figura 6, 7 e 8 é ilustrado o resultado do modelo *fuzzy* desenvolvido no *MATLAB Fuzzy Logic Designer*, utilizando a abordagem T-S. O eixo vertical representa as regras *fuzzy* individuais de 1 a 27. Cada linha demonstra como os valores atuais das entradas (importação, valor unitário e construção) validam ou não cada uma das regras mencionadas. O grau de validação das funções de pertinência é indicado nas áreas amarelas, enquanto a barra azul na última coluna exibe a contribuição de cada regra para o valor final da saída.

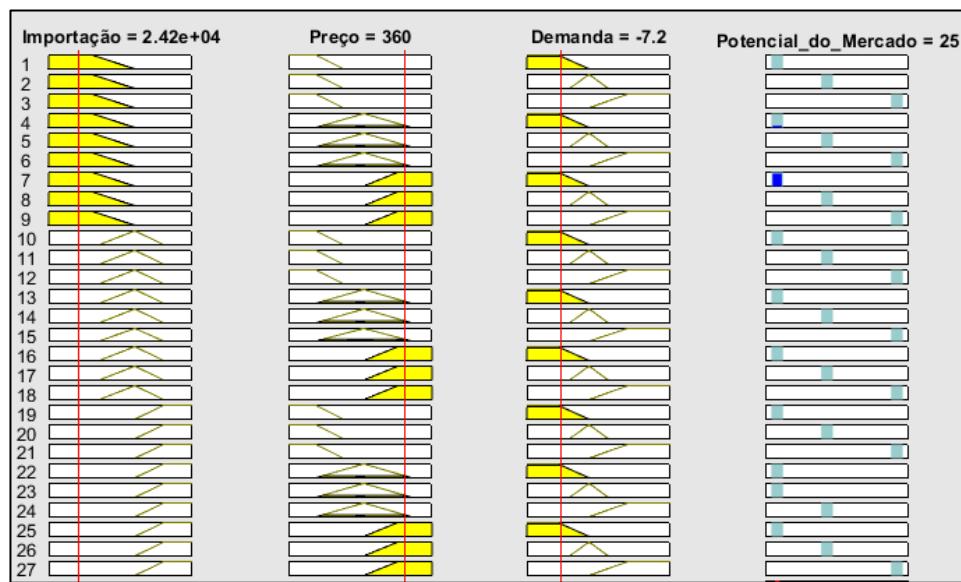
Figura 6 - Cenário um do Resultado T-S.



Fonte: Adaptado de Aguiar e Junior (2007).

Na Figura 6, é ilustrado o cenário 1, no qual as entradas são definidas da seguinte forma: importação média, com 30.000 m^3 ; preço unitário médio, com € 295,00; e demanda na produção da construção estável, representando 2,5%. Essas condições resultam em um potencial médio, com valor de 61,7, com isso concluindo que o mercado apresenta uma expectativa mediana de vendas, ou seja, nem desfavorável nem altamente promissora.

Figura 2 - Cenário dois do Resultado T-S.

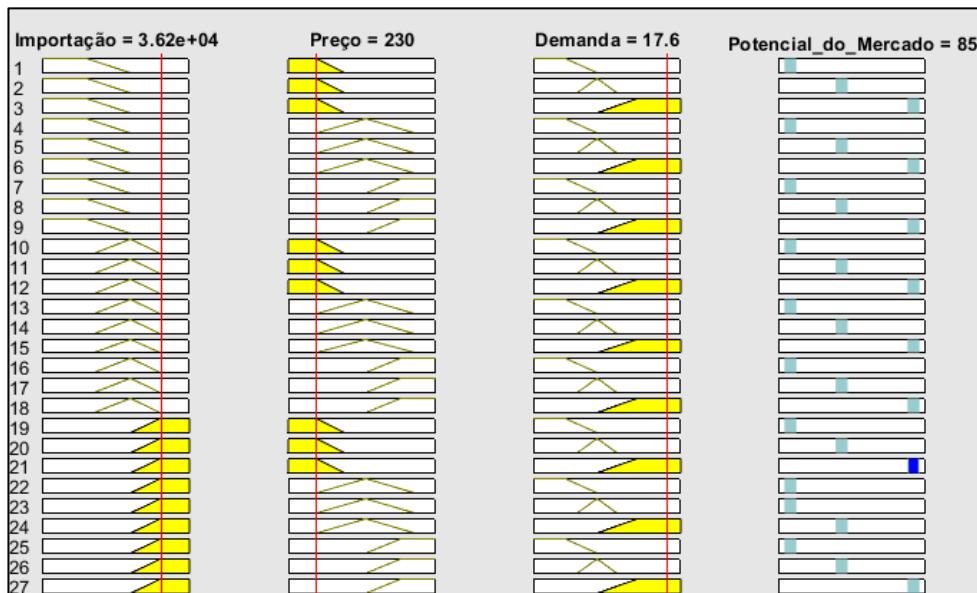


Fonte: Adaptado de Aguiar e Junior. (2007).

A Figura 7, apresenta o cenário 2, no qual as entradas são definidas da seguinte forma: importação baixa, com 24.200 m^3 ; preço unitário alto, com € 360,00; e demanda na construção negativa, com -7,2%. Resultando em um potencial baixo, com valor de 25. Segundo o princípio da otimização entre oferta e demanda descrito por Varian (2012), quando a demanda está em

queda, o mercado ajusta a oferta para evitar excedentes e prejuízos. Assim, o modelo sinaliza uma condição de baixo aproveitamento de mercado, sugerindo que, nesse cenário, não é economicamente viável aumentar a oferta, pois a demanda não acompanha.

Figura 3 - Cenário três do Resultado T-S.



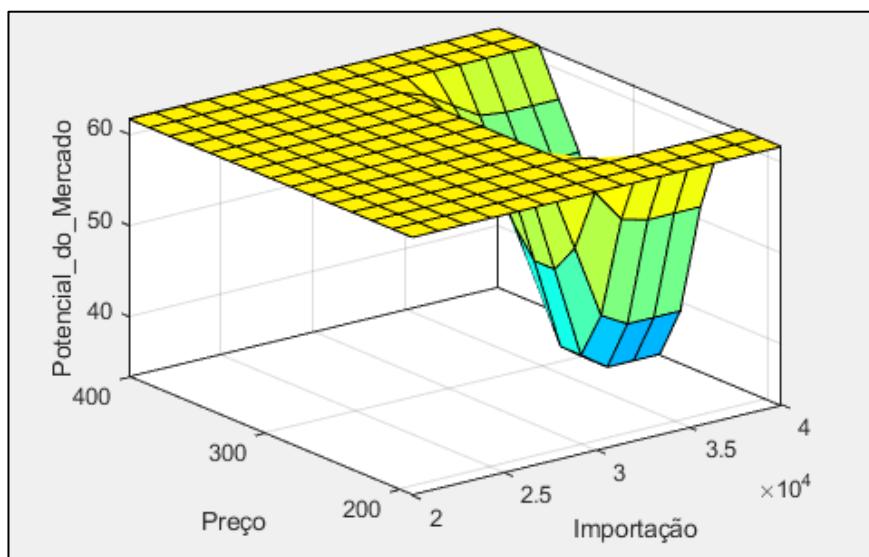
Fonte: Adaptado de Aguiar e Junior (2007).

Na Figura 8, destaca-se o cenário 3 no qual as entradas são definidas da seguinte forma: importação alta, com 36.200 m³; preço unitário baixo, com €230; e demanda na construção positiva, representando um crescimento de 17,6%. Essas condições resultam em um potencial alto, com valor de 85. Esse resultado indica um cenário altamente favorável para o mercado de madeira serrada, em que a combinação de alta oferta, preços competitivos e demanda aquecida gera uma excelente expectativa de importação de madeira e de suas vendas.

Conforme o princípio econômico do equilíbrio entre oferta e demanda, quando a demanda é crescente para que haja a estimulação do consumo do bem e os preços deverão ser considerados baixos, a tendência é que o consumo aumente, favorecendo a comercialização do produto. Portanto, esse cenário representa um momento estratégico para maximizar a produção e a distribuição, aproveitando as condições ideais de mercado.

Na Figura 9, apresenta-se uma visualização tridimensional do comportamento do sistema fuzzy, baseada em duas variáveis de entrada: preço (eixo Y) e importação (eixo X), e uma variável de saída no eixo Z, que representa o potencial de mercado. A análise dessa superfície revela padrões econômicos consistentes, como a influência negativa do aumento de preços sobre o potencial de mercado, evidenciando a sensibilidade do consumidor diante de valores elevados.

Figura 4 - Superfície de Inferência Fuzzy



Fonte: Elaboração Própria (2025).

A análise da figura mostra que as regiões azul e verde concentram-se em situações em que o preço é elevado e a importação está em níveis intermediários. Isso evidencia um ponto crítico do sistema, no qual o mercado se torna menos atrativo: preços altos combinados com um volume de importação que não é nem baixo o suficiente para gerar escassez, nem alto o bastante para diluir custos, resultam em um baixo potencial de mercado, possivelmente devido à saturação e à sensibilidade do consumidor ao preço.

Por outro lado, as regiões amarelas, que dominam a maior parte da superfície, indicam um potencial de mercado elevado. Elas aparecem especialmente quando o preço está baixo ou a importação está em níveis muito altos ou muito baixos. Isso sugere que: Preços baixos aumentam significativamente o interesse do mercado, estimulando a demanda; Altas importações, quando bem combinadas com preços acessíveis, aproveitam o aumento da demanda sem provocar saturação imediata; Baixas importações também podem manter o potencial elevado, possivelmente devido à valorização do produto e ao controle da oferta frente à demanda.

Assim, a superfície *fuzzy* evidencia que o equilíbrio entre preço e volume importado é essencial para maximizar o desempenho do mercado. Estratégias que combinem preços acessíveis e gestão eficiente da importação tendem a posicionar o setor em regiões de alto potencial, conforme mostrado pelas áreas amarelas no gráfico. A flexibilidade do modelo T-S, associada à lógica *fuzzy*, mostrou-se eficaz para representar comportamentos não lineares e avaliar com precisão situações de incerteza.

4 Considerações finais

A aplicação do modelo *fuzzy* T-S para a estimativa do potencial de mercado de madeira serrada de coníferas voltada à construção civil nos países europeus no período entre 2007 e 2023 demonstrou-se eficaz na representação de cenários complexos e na interpretação de variáveis interdependentes, como importação, preço e demanda.

Os resultados evidenciam que o potencial de mercado é sensível a variações nessas três variáveis, sendo negativamente impactado por preços elevados e níveis intermediários de importação, especialmente quando a demanda apresenta retração. A modelagem permitiu identificar zonas de risco e de oportunidade por meio de superfícies *fuzzy*, destacando que a combinação de preços acessíveis, alta demanda e gestão estratégica da importação favorece significativamente o desempenho do mercado.

Com isso, o modelo se mostra uma ferramenta valiosa para apoiar decisões de políticas comerciais, planejamento logístico e estratégias de investimento no setor madeireiro europeu, contribuindo para uma alocação mais eficiente dos recursos e maior aderência à dinâmica real do mercado.

Referências

AGUIAR, H.; JUNIOR, O. A. **Inteligência computacional aplicada à administração, economia e engenharia em MATLAB**. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

BUILDINWOOD. Propriedades da madeira. Disponível em: <https://design-guide.build-in-wood.eu/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

CONFEDERATION OF EUROPEAN WOODWORKING INDUSTRIES. **Tackle Climate Change: Use Wood**. 2. rev. ed. Brussels: CEI-Bois, 2011. Disponível em: https://europanels.org/wp-content/uploads/2018/09/Tackle-Climat-Change-EN.pdf?utm_source. Acesso em: 21 out. 2025.

EUROSTAT. **European Statistical Monitor**. European Commission. Bruxelas, 2025a. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/dashboard/european-statistical-monitor/>. Acesso em: 16 abr. 2025.

EUROSTAT. **Wood products - production and trade - statistics explained**. European Commission. Bruxelas, 2025b. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Wood_products_-_production_and_trade. Acesso em: 16 out. 2025.

FERREIRA, J. P.; LIMA, A. S.; GONÇALVES, R. **A madeira como solução construtiva sustentável na União Europeia**. Lisboa: Instituto Europeu da Madeira, 2023. Acesso em: 16 abr. 2025.

FILIP. A evolução da madeira como material de construção ao longo dos séculos. **FinaAr**. 14 fev. 2024. Disponível em: <https://finaar.com/a-evolucao-da-madeira-como-material-de-construcao-ao-longo-dos-seculos/>. Acesso em: 16 out. 2025.

FLORISTAS.PT. **Floresta europeia e seu contributo socioeconómico**. Lisboa, 2021. Disponível em: <https://florestas.pt/valorizar/floresta-europeia-e-seu-contributo-socioeconomico/>. Acesso em: 28 abr. 2025.

GLOBAL WOOD. **The popularity of wooden houses in Germany is on the rise**. 19 jul. 2024. Disponível em: https://globalwood.org/news/2024/news_20240719a.htm. Acesso em: 28 abr. 2025.

Janeiro: Elsevier, 2012.

OPEN RISK MANUAL. **NACE Division F.41 - Construction of buildings**. Disponível em: https://www.openriskmanual.org/wiki/NACE_Division_F.41_-_Construction_of_buildings. Acesso em: 21 abr. 2025.

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; FEREDAY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D. U.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; DENSLY-TINGLEY, D.; ALLWOOD, J.; DUPREE, P.; LINDEN, P. F.; SCHERMAN, O. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1514-1524, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>. Acesso em: 16 out. 2025.

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. **Inteligência Artificial**: Uma Abordagem Moderna. 4. ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2022. E-book. p.33. ISBN 9788595159495. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595159495/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Sistemas de controle inteligente usando lógica fuzzy**. 2^a edição. São Paulo: Blucher, 2007. ISBN 978-85-212-0416-9.

SMITH, J.; JOHNSON, L. The role of timber in reducing carbon emissions in the construction sector. **Sustainable Cities and Society**, v. 85, p. 102345, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710225007624>. Acesso em: 28 abr. 2025.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, 1985. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6313399>. Acesso em: 16 out. 2025.

THE INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION (ITTO). Disponível em: <https://www.itto.int/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

UNIÃO EUROPEIA. **A União Europeia e as Florestas**. Fichas técnicas sobre a União Europeia, 2017. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/pt/sheet/105/a-uniao-europeia-e-as-florestas>. Acesso em: 10 abr. 2025.

VARIAN, H. R. Microeconomia: uma abordagem moderna. Tradução de Elfio Ricardo Doninelli e Regina Célia Simille de Macedo. Revisão técnica de Fabio Barbieri. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

VISION RESEARCH REPORTS. **Europe Cedar Wood Market Report**. Disponível em: https://www.visionresearchreports.com/europe-cedar-wood-market-report/3857?utm_source. Acesso em: 15 abr. 2025.

YANG, J.; VIAL, E.; HURMEKOSKI, E. **Substitution potentials and impacts of wood use in the EU**. ForestNavigator: Navigating European forests and forest bioeconomy, 2024. Disponível em: https://www.forestnavigator.eu/wp-content/uploads/FN_D-5.3_final-version.pdf. Acesso em: 16 out. 2025.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X). Acesso em: 16 out. 2025.