



Análise do impacto de técnicas de previsão de demanda no MCI (Indicador de Circularidade de Materiais) de um sistema de produção de painéis aglomerados de madeira

Gabriel de Oliveira Morgante (Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba)
gabrielom.pimpao@gmail.com

Daiane Vitória da Silva (Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba)
daianevitoriasilva@yahoo.com.br

Gabriela Giusti (Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba)
gabriela.giusti@hotmail.com.br

Diogo Aparecido Lopes Silva (Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba)
diogo.apls@ufscar.br

O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento do indicador de circularidade MCI, desenvolvido pela Fundação Ellen MacArthur em relação ao emprego de diferentes técnicas de previsão de demanda, aplicadas em um estudo de caso da produção de painéis de madeira aglomerada. Foi utilizada a Análise de Fluxo de Materiais e realizada a modelagem do sistema de produto no software GaBi Education versão 8.7 e o Excel para o cálculo do MCI. Para a previsão de demanda foram utilizados os métodos de sazonalidade com suavização exponencial, Holt-Winter com regressão linear e Holt-Winter aditiva estendida. A previsão foi feita para a demanda de 2019, baseando-se nos dados históricos da demanda brasileira de painéis aglomerados 2016, 2017 e 2018. Foi observado que o MCI não apresentou variação quando calculado por diferentes valores de fluxos de materiais, indicando que os três métodos de previsão adotados neste estudo não afetaram a circularidade do sistema produtivo. Foram testados cenários com diferentes parâmetros para estudar o efeito no MCI, que se manteve o mesmo em relação às diferenças de massa total de fluxos de materiais. Porém, ao serem adicionadas restrições na capacidade de fornecimento de matéria prima reciclada, houve variação. Tal resultado chamou atenção para uma observação importante: técnicas que apresentaram maiores valores de previsão, como a Holt-Winter com regressão linear, colocariam a empresa em uma posição mais vantajosa em caso de suprimento limitado de materiais de origem não virgem. Assim, ficou evidente a importância de entender a natureza dos processos e realizar um estudo abrangente no momento de escolher métodos de previsão de demanda em sistemas que busquem implementar uma produção rumo à Economia Circular.

Palavras-chave: Economia circular, sustentabilidade, produção de madeira, placas aglomeradas, indústria de madeira.

1. Introdução

A sustentabilidade é um tema de interesse global, que implica na necessidade de estabelecer medidas de controle para direcionar os esforços rumo ao desenvolvimento sustentável. Em 2015, a Organização das Nações Unidas traçou objetivos que buscam o desenvolvimento sustentável, a Agenda 2030. (ONU, 2019). Assim, questões socioambientais têm se tornado um assunto crítico para as empresas, seja em relação a processos produtivos ou em decisões estratégicas. (SARKIS et al., 2010).

Conseqüentemente, a Economia Circular (EC), que objetiva “Manter produtos e materiais em ciclos de uso” (WALDMAN e BALTHAZARD, 2015), destaca-se por possibilitar a otimização dos sistemas produtivos, promovendo melhor aproveitamento de recursos (KIRCHHERR et al., 2017). A EC ideal considera 100% da utilização da matéria prima (MP) de origem reciclada/reutilizada por infinitas vezes, e assim, torna-se necessário estudar como se dará a previsão de demanda num contexto de sistemas operando em EC.

A previsão de demanda é o processo de identificação e estimativa de produção, partindo de observações, teorias, padrões e relações (MAKRIDAKIS AND BAKAS, 2016). A maior parte das empresas a utiliza nos processos de planejamento para tomada de decisões no contexto organizacional (PANAYIOTOU, GAYIALIS, TATSIPOULOS, 2006). Assim, a previsão de demanda faz-se extremamente relevante (WANG AND PETROPOULOS, 2016) e, se aplicada na EC, poderia exercer um papel crucial, por exemplo, quanto ao suprimento de MP.

Porém, erros de previsão de demanda podem gerar conseqüências nos sistemas produtivos, gerando excesso de estoques e perdas de materiais, assim como contribuir para a redução da circularidade deles.

As recentes revisões de literatura desenvolvidas por Ghisellini et al. (2016), Lieder e Rashid (2016), Govindan e Hasanagic (2018), Kalmykova et al. (2018) e Kirchherr et al. (2017) e os relatórios da Ellen Macarthur Foundation e Granta Design (2015), não abordam sobre a análise do impacto de diferentes técnicas de previsão de demanda de produtos sobre a circularidade de um sistema produtivo. Logo, mais pesquisas nesse sentido são desejáveis.

Assim, o objetivo desse trabalho é analisar o impacto de três técnicas de previsão de demanda, sobre o indicador de circularidade MCI (*Material Circularity Indicator*), em um sistema produtivo de painéis de madeira aglomerada.

2. Revisão de literatura

Para Moraga et al. (2019), EC é um sistema que trata sobre o uso cíclico e responsável de recursos para promover o desenvolvimento sustentável, sendo uma de suas pretensões a dissociação dos conceitos de crescimento econômico e consumo de recursos naturais pela diminuição da utilização de recursos virgens e minimização da geração de resíduos.

Kalmykova, Sadagopan e Rosado (2018) evidenciaram princípios comuns em definições de EC: maximizar o valor dos materiais, ecoeficiência e redução de desperdícios ao longo do ciclo de vida dos produtos. Dentre as ferramentas da EC há o MCI, utilizado para avaliar o índice de circularidade de um produto/empresa (WALDMAN e BALTHAZARD, 2015).

O MCI, cujo o conjunto de equações foram definidos por Waldman e Balthazard (2015), é constituído por três características: a parcela V (equação 1) de MP virgem utilizada na produção, e o volume W (equações 2 a 5) de resíduos gerados, ambos utilizados para se calcular o LFI (Índice de Fluxo Linear) e o fator de utilidade X que contabiliza o tempo de duração e a intensidade de uso do produto:

$$V = M(1 - F_R - F_U) \quad (1)$$

Onde: M = massa de produto final; F_R = parcela de MP reciclada; e F_U = parcela de MP de reuso.

$$W_0 = M(1 - C_R - C_U) \quad (2)$$

Onde: W_0 = massa de resíduos irrecuperáveis; C_R = massa do produto que pode ser reciclada ao final de sua vida útil; e C_U = massa do produto destinada ao reuso.

$$W_C = M(1 - E_C)C_R \quad (3)$$

Onde: W_C = massa de resíduos não recuperáveis do processo de reciclagem de um produto (desde o fluxo reverso até a separação/classificação dos materiais recicláveis); e E_C = parâmetro da eficiência do processo de reciclagem ao final da vida útil do produto.

$$W_F = M \frac{(1-E_F)F_R}{E_F} \quad (4)$$

Onde: W_F = massa de resíduos não recuperáveis da produção de MP reciclada do produto; e E_F = eficiência do processo de reciclagem na produção da MP reciclada.

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2} \quad (5)$$

O LFI (equação 6) mede a proporção de material que segue um fluxo linear e seu valor varia de 1 (completamente linear) a 0.

$$LFI = \frac{V+W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}} \quad (6)$$

O parâmetro X (equação 7) tem duas partes: o tempo de vida e a intensidade do uso do produto.

$$X = \left(\frac{L}{L_{av}}\right) \cdot \left(\frac{U}{U_{av}}\right) \quad (7)$$

Onde: L/L_{av} = variação positiva ou negativa, no fluxo de geração de resíduos do produto baseado na comparação de sua vida útil em relação à média (ou *benckmarking*) do setor e; U/U_{av} = intensidade do uso do produto em relação à média de uso de produtos similares. Com LFI e X, calcula-se, então, o MCI (Equação 8):

$$MCI = 1 - LFI \cdot F(X) \quad (8)$$

Onde: F(X) determina a influência da utilização do produto no MCI de um produto.

O valor do MCI varia entre 0 (totalmente linear) e 1 (100% circular).

Oliveira, França e Rangel (2018) citam que produtos ajustados a ciclos naturais seriam melhor adaptados as definições da EC, como a produção de painéis de madeira (VIDAL E HORA, 2014), tendo entre os principais produtos os painéis de partículas de média densidade (MDP). O MDP representa quase 50% da produção dos painéis brasileiros (ABRAF, 2013).

Oliveira, França e Rangel (2018) conduziram um estudo de caso em um arranjo produtivo local de móveis para diagnosticar o uso de estratégias de EC, identificando os principais desafios e oportunidades. A pesquisa concluiu que poucas empresas adotavam estratégias relacionadas à EC, que se aplicadas possibilitariam evitar perdas e fortalecer a cadeia de suprimentos, demonstrando a necessidade de disseminar a EC no Brasil. Porém, a metodologia usada foi estritamente qualitativa, deixando espaço para análises quantitativas, por exemplo, baseadas no uso do indicador MCI.

Como a proposta da EC inclui a diminuição da utilização de recursos virgens, um importante aspecto é a previsão de demanda para melhorar o desempenho operacional e ambiental em um sistema de EC (WALDMAN e BALTHAZARD, 2015). Porém, se a previsão de demanda for

mal executada, pode afetar negativamente os sistemas produtivos, tornando então, importante a utilização de uma boa metodologia de análise de previsão de demanda. Desta forma, três métodos correspondentes ao padrão sazonal de demanda serão brevemente explicados na seção 3: (1) índices sazonais com suavização exponencial (Suav. Exp.); (2) Holt-Winter com regressão linear (HW-LR); e (3) aditivo estendido de Holt-Winter (EAHW).

3. Metodologia

O presente trabalho trata-se de um estudo de caso desenvolvido por uma abordagem quantitativa, dando continuidade ao trabalho de Tobal (2017).

Inicialmente, foi realizada a previsão de demanda para 2019 (seção 3.1), seguida do cálculo dos indicadores de Análise de Fluxo de Materiais (seção 3.2) e do cálculo do indicador MCI.

3.1. Métodos para previsão de demanda

Os métodos de previsão de demanda utilizados foram escolhidos com base em Tobal (2017), pois a produção de painéis MDP no Brasil apresenta sazonalidade ao longo do ano, sendo eles: Suav. Exp., HW-LR, e EAHW. Para esses três métodos, a previsão possui três componentes principais: nível, tendência e sazonalidade, e o nível de previsão é baseado em dados reais de demanda (MAKRIDAKIS, et al., 1998).

O método de suavização exponencial com índices sazonais identifica grupos de nível de demanda com o mesmo comportamento, criando conjuntos de dados diferentes para os dados de demanda disponíveis. Para prever a demanda, portanto, os componentes de nível e tendência são calculados em seguida pelo método de Suavização exponencial clássico.

O método de Holt-Winter (HW) utiliza fatores de suavização exponencial para cada componente: nível de série, tendência, e componente sazonal (MAKRIDAKIS et al., 1998). O primeiro passo é obter um fator sazonal seguindo os mesmos procedimentos descritos para o método anterior (Suav. Exp.). Depois os fatores sazonais são calculados segundo uma outra forma e conjunto de equações. Contudo, uma nova versão do método HW foi sugerido por Makridakis et al., (1998) e utiliza-se a regressão linear para se determinar um nível inicial, tendência e os componentes sazonais, esse método é o HW-LR.

Por fim, outro método derivado do HW tradicional assume a forma aditiva para o processo de previsão (TRATAR et al., 2016). O método EAHW aplica um quarto parâmetro para a estimativa de recorrência de nível no processo de previsão da demanda.

Assim, os cálculos das previsões de demanda por esses três métodos foram realizados no Excel para 2019, e foram desenvolvidos a partir de dados históricos de produção e demanda real por painéis MDP entre 2016, 2017 e 2018, disponibilizados pela base de dados *Food and Agriculture Organization* (FAO).

A seleção de um método de previsão adequado visa selecionar aquele que forneça os menores valores de erro no processo (PRESTWICH et al., 2014). Assim, a acuracidade desses três métodos de previsão foi analisada com base no indicador do Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) (Equação 9). A Equação 9 mostra a previsão de demanda (F_t) e a observação real (x_t) para um período t variando de u a v (HYNDMAN e KOEHLER, 2006).

$$MAPE = \frac{1}{(v-u+1)} * \sum_{t=u}^v \left| \frac{F_t - x_t}{x_t} \right| \quad (9)$$

Todos esses métodos de previsão de demanda aqui descritos foram utilizados apenas para prever vendas ou demanda futura do produto, não sendo encontrada na literatura até aqui sobre o efeito dessa escolha sobre o desempenho ambiental dos sistemas produtivos, o que motivou a presente pesquisa no contexto da EC.

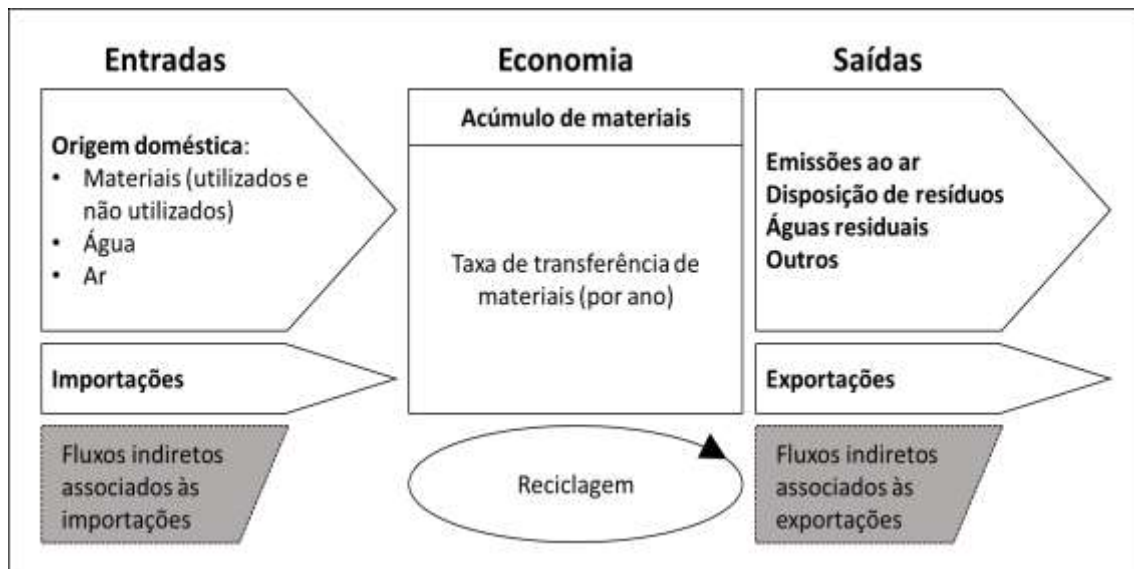
3.2. Análise do fluxo de materiais

O mapeamento do fluxo de materiais ao longo do ciclo de vida do produto de interesse foi necessário. Para isso, foi utilizada a metodologia Análise de Fluxo de Materiais (AFM), que de acordo com o manual da EUROSTAT (2001), organiza todos os fluxos, estoques e balanços de materiais em um período e região específico. O que inclui os fluxos diretos e indiretos associados às importações e exportações de materiais de um sistema (Brunner e Rechberger, 2004), conforme a Figura 1.

De acordo com Silva et al., (2014), a AFM pode ser realizada nos limites de um sistema produtivo em escala global, nacional ou regional, por exemplo, para se estudar o desempenho ambiental de países, cidades, grupo de empresas ou um sistema de produção único. O sistema genérico (Figura 1) pode compreender n processos com uma quantidade total de entrada de materiais M . Cada processo i consome uma parcela de entradas (materiais, água, energia) I_i e gera uma série de saídas O_i (produtos, coprodutos, emissões e resíduos). De acordo com o princípio de balanço de matéria, a quantidade de I_i somada ao total de O_i deve resultar na quantidade M de material inicialmente consumido pelo sistema, sendo todos esses fluxos

expressos em unidades de massa por ano (EUROSTAT, 2001).

Figura 1-Esquema de balanço material simplificado na AFM



Fonte: adaptado de EUROSTAT (2001)

Assim, para o presente estudo de caso, a AFM serviu de base para se contabilizar os fluxos de materiais que entram/saem para se produzir painéis aglomerados sob uma perspectiva de ciclo de vida de produto – *cradle-to-gate* (berço-ao-portão).

O valor total da previsão da demanda para o ano de 2019 foi calculado por cada um dos três métodos de previsão da seção 3.1, e foi utilizado como representando as exportações “EX” da Figura 1. Além disso, foi calculado o TMR (*Total Material Requirement*) da AFM, que representa o total de materiais M que entra no sistema circular para se produzir o produto de interesse.

Para modelagem do ciclo de vida dos painéis aglomerados e o emprego da metodologia de AFM, foi utilizado o software *GaBi Education* versão 8.7 e dados de inventário da produção do produto extraídos de Silva et al. (2013).

3.3. Descrição do estudo de caso

O estudo de caso se trata de um sistema de produção de painéis MDP. Os insumos necessários para a produção foram levantados a partir de Silva et al. (2013) na Tabela 1:

Tabela 1-Inventário da produção industrial de chapas aglomeradas

Inventário para a produção de 630 kg de painéis aglomerados de madeira			
Entradas		Saídas	
Sulfato de amônia	1.38 kg	Painéis aglomerados de madeira	630 kg
Lubrificantes	18 g		
Emulsão de parafina	5.47 kg	Emissões ao ar	
Resina (UF)	71.7 kg	Cinzas (dos resíduos de madeira)	0.39 kg
Água	90.4 kg	Dioxido de carbono	48 kg
Madeira (pedaços)	687.2 kg	Monoxido de carbono	0.19 kg
Consumo de Energia		VOC (não especificado)	0.36 kg
Diesel	1.72 kg	Formaldeído	0.15 kg
Eletricidade	507 MJ	Hidrocarbonetos	1.64 g
Óleo de combustível	13.7 kg	Metano	1.69 g
Resíduos de madeira	38.5 kg	Óxidos de nitrogênio	0.18 kg
		Partículas de matéria	0.18 kg
		Óxidos de enxofre	1.32 kg
		VOCNM	9.48E-04 g
		Emissões à água	
		Amônia	0.121 g
		BOD	0.616 g
		Efluentes (Não especificados)	6 kg
		Formaldeído	7.29E-02 g
		Sólidos em suspensão	24.4 g
		Emissões ao solo	
		Resíduos de lubrificante	15.9 g
		Resíduos de madeira	97.2 kg

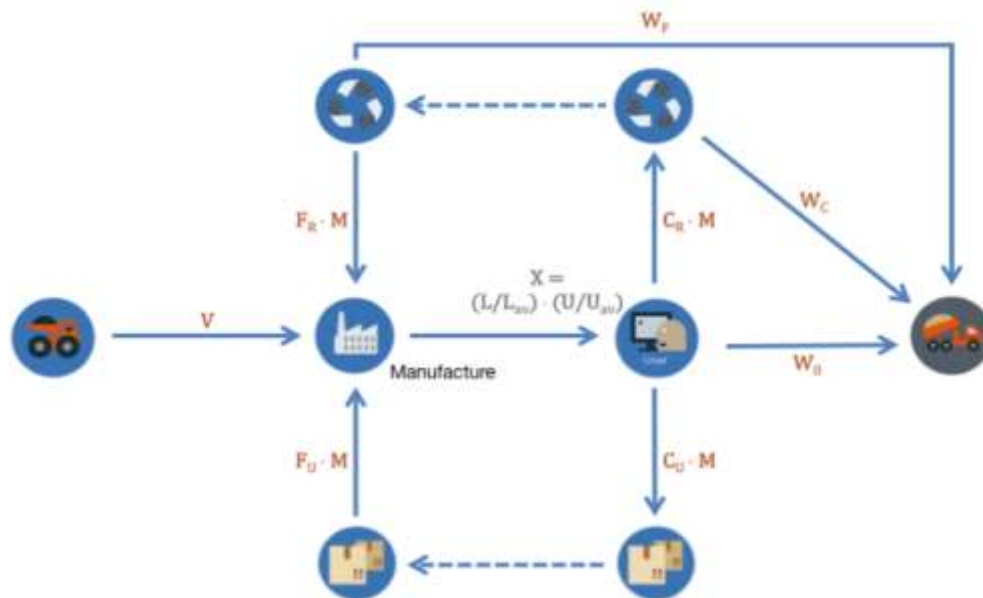
Fonte: SILVA et al. (2013)

Devido as características do produto avaliado, composto por partículas de madeira reflorestada de eucalipto mais a presença de resina ureia-formaldeído, o produto do sistema estudado não pode hoje ser reciclado para a fabricação de novos painéis MDP. Contudo, é possível a entrada de madeira reciclada como MP, e esta foi a principal via de para se avaliar o MCI.

3.4. Cálculo da circularidade do sistema produtivo

A Figura 2 demonstra o diagrama dos fluxos de materiais que compõe o cálculo do MCI.

Figura 2-Diagrama genérico dos fluxos de materiais que compõe o MCI



Fonte: WALDMAN; BALTHZARD (2015)

De maneira a observar o comportamento do MCI em relação às diferentes técnicas de previsão de demanda da seção 3.1, foram criados três cenários comparativos (Tabela 2):

- 1 – Variar a massa total de produtos M , de acordo com os resultados da previsão de demanda para os painéis MDP.
- 2 – Além da variação de M foi determinado, arbitrariamente, que 50% da MP seria de origem reciclada.
- 3 – Foram estabelecidas, arbitrariamente, restrições de capacidade de suprimento para a MP reciclada, onde a capacidade de suprimento de MP reciclada seria de 400.000 toneladas e posteriormente apenas 200.000 toneladas/ano.

Tabela 2- Diferenças entre os cenários analisados.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Variação na massa total	X	X	X
Materia P. Reciclada		X	X
Restrição capacidade			X

Fonte: Elaborado pelos Autores.

No Cenário 3, com restrição de capacidade de fornecimento de MP, a parcela reciclada foi calculada pela razão entre o valor máximo de material reciclado da restrição pela massa total de produtos previsto por cada método de previsão de demanda. Assim, as parcelas de MP de origem reciclada utilizadas para o cálculo do MCI no Cenário 3 constam na Tabela 3:

Tabela 3- Parcelas de MP reciclada por quantidade de massa total M para o Cenário 3

	M (kt)	Cap.400kt	Cap.200kt
HW-AE	1.771,60	22,58%	11,29%
HW-RL	2.199,19	18,19%	9,09%
Suav.Exp.	1.666,21	24,01%	12,00%

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Outras premissas assumidas para a análise de todos os cenários foram:

- Foi assumido uma eficiência de 80% para o processo de reciclagem da MP madeira.
- Seu grau de utilização X para o cálculo do MCI, foi definido como sendo 1, já que não há diferenças significativas na vida útil ou intensidade de utilização do produto em relação à média do setor.

4. Resultados

A Tabela 4 apresenta o resultado da previsão de demanda calculada pelos três métodos escolhidos e o erro MAPE associado a cada método adotado.

Tabela 4- Previsão da demanda por painéis aglomerados em 2019.

Previsão da demanda de 2019 (ton)											
Holt-Winter Aditivo Estendido	Jan	42.688,07	Holt-Winter com regressão linear	Jan	55.149,86	Sazonalidade com suavização exponencial	Jan	40.527,24			
	Fev	42.833,18		Fev	53.848,58		Fev	40.527,24			
	Mar	46.469,35		Mar	57.572,79		Mar	44.579,97			
	Abr	56.660,58		Abr	67.480,90		Abr	56.738,14			
	Mai	27.293,62		Mai	36.075,43		Mai	24.316,35			
	Jun	32.843,30		Jun	39.890,65		Jun	28.369,07			
	Jul	44.758,03		Jul	49.847,79		Jul	40.527,24			
	Ago	62.259,86		Ago	78.751,13		Ago	60.790,87			
	Set	46.300,51		Set	59.115,10		Set	44.579,97			
	Out	35.745,70		Out	52.696,73		Out	32.421,80			
	Nov	33.466,66		Nov	49.190,79		Nov	28.369,07			
	Dez	58.696,25		Dez	58.320,79		Dez	56.738,14			
	Total	530.015,09		Total	657.940,54		Total	498.485,10			
MAPE	13,83%	MAPE	1,56%	MAPE	0,67%						

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Foram calculados os indicadores da AFM (Tabela 5), e é importante frisar que IM (diretas) representam as importações diretas, ou seja, o fornecimento total de matérias primas para a produção do produto (madeira, resina, energia, etc.); IM (indiretas) contabiliza os fluxos de entrada necessários para a produção das matérias primas fornecidas na perspectiva do berço-ao-túmulo; DMI (*Direct Material Input*) é a soma de IM (diretas) mais as extrações domésticas, no caso inexistentes para o sistema de produto estudado; TMI (*Total Material Input*) é o DMI mais as extrações domésticas indiretas, no caso, também iguais a zero devida a ausência de extrações domésticas no sistema. No final, TMR é então calculado pela soma do TMI mais IM (indiretas). O TMR foi o valor da massa total M para o cálculo do MCI conforme os três métodos de previsão de demanda.

Tabela 5-Resultados dos indicadores de AFM para cada método de previsão de demanda

Indicadores MFA para os 3 métodos de previsão de demanda (ton)			
Indicadores	HW-AE	HW-RL	Suavização Expo.
IM (diretas)	880.881	1.093.492	828.478
IM (indiretas)	890.720	1.105.705	837.732
DMI	880.881	1.093.492	828.478
TMI	880.881	1.093.492	828.478
TMR	1.771.600	2.199.197	1.666.210
EX (direct)	530.015	657.941	498.485

Fonte: Elaborado pelos Autores

No Cenário 1 (Tabela 6), como não há reciclagem ou reuso, o índice V (parcela de MP virgem) do MCI, foi igual a M (massa total de produto final), F_R e F_U , que representam as parcelas de reciclagem e reuso na MP, foram apenas zero. Da mesma forma C_R (parcela de produto a ser destinada à reciclagem) e C_U (reuso ao final da vida útil), também foram zero. Os parâmetros de eficiência da reciclagem E_F e E_C também não foram considerados, visto que o sistema atual é linear, produzido apenas com madeira virgem (sem recuperação de materiais). Desta forma, no cenário atual, o índice LFI apresentou o valor 1, e o MCI praticamente igual a zero.

Tabela 6- Resultados do MCI para o Cenário 1

Cenário 1			
Var.	HW-Aditivo Estendido	HW-Regressão Linear	Sazonalidade-Suav.Exp.
M	1.771.600.156 Kg	2.199.196.920 Kg	1.666.209.694 Kg
FR	0%	0%	0%
FU	0%	0%	0%
CR	0%	0%	0%
CU	0%	0%	0%
EC	0%	0%	0%
EF	0%	0%	0%
L/Lav	100%	100%	100%
U/Uav	100%	100%	100%

Cenário 1 - Indicadores MCI			
Index	HW-Aditivo Estendido	HW-Regressão Linear	Sazonalidade-Suav.Exp.
V	1.771.600.156 Kg	2.199.196.920 Kg	1.666.209.694 Kg
W0	1.771.600.156 Kg	2.199.196.920 Kg	1.666.209.694 Kg
WC	0 Kg	0 Kg	0 Kg
WF	0 Kg	0 Kg	0 Kg
W	1.771.600.156 Kg	2.199.196.920 Kg	1.666.209.694 Kg
LFI	1,000	1,000	1,000
X	1,000	1,000	1,000
f(X)	0,900	0,900	0,900
MCI	0,100	0,100	0,100

Fonte: Elaborado pelos Autores

O Gráfico 1 demonstra a massa de produto final prevista pelos três métodos, comparada ao MCI para o Cenário 1.

Os dados do Cenário 2 (Tabela 7) apresentaram um valor mais alto de MCI (0,318), já que com a parcela de MP de origem reciclada, FR, foi implantada uma dimensão de circularidade no sistema produtivo até então ausente. Ou seja, foi considerado a recuperação de resíduos de madeira para se produzir as chapas aglomeradas neste cenário.

O Cenário 2 pode ser visto em mais detalhes também no Gráfico 1, onde percebe-se que o MCI não variou mesmo com a diferença de massa de matéria prima não virgem que agora entra no sistema. O mesmo valor de MCI foi encontrado entre as diferentes técnicas de previsão de demanda para uma taxa fixa de MP reciclada. Isso se deve a linearidade das premissas as quais resultaram em resultados de previsão de demanda e de AFM proporcionais entre si.

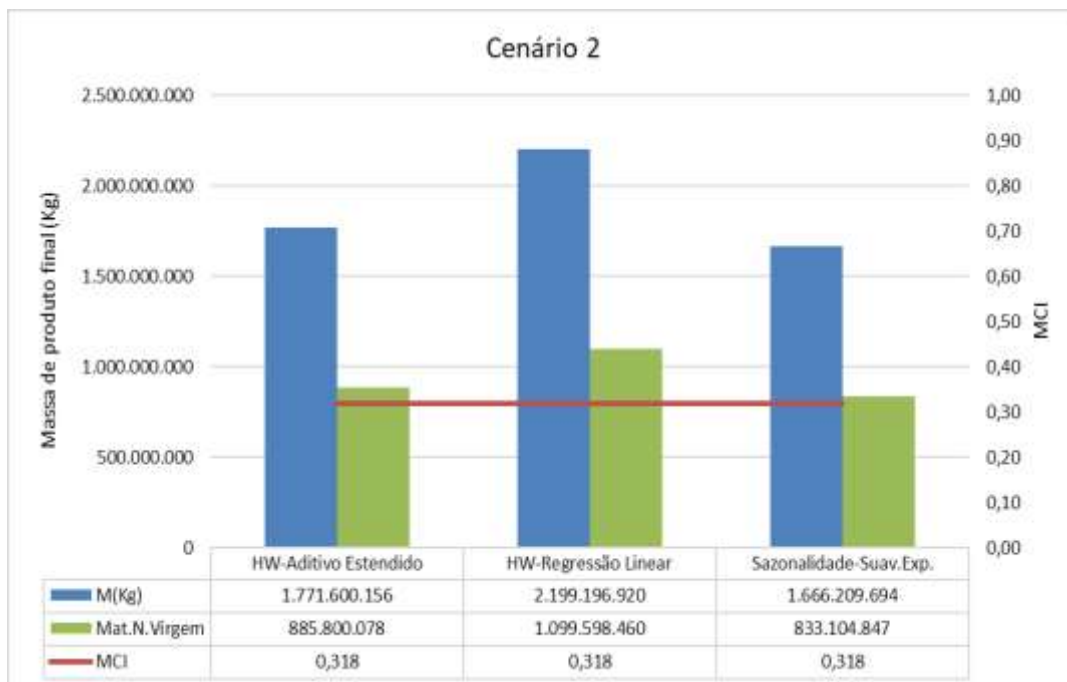
Tabela 7- Resultados do MCI para Cenário 2

Cenário 2 (50% de mat.prima reciclada)			
Var.	HW-Aditivo Estendido	HW-Regressão Linear	Sazonalidade-Suav.Exp.
M	1.771.600.156 Kg	2.199.196.920 Kg	1.666.209.694 Kg
FR	50%	50%	50%
FU	0%	0%	0%
CR	0%	0%	0%
CU	0%	0%	0%
EC	0%	0%	0%
EF	80%	80%	80%
L/Lav	100%	100%	100%
U/Uav	100%	100%	100%

Cenário 2 - Indicadores MCI			
Index	HW-Aditivo Estendido	HW-Regressão Linear	Sazonalidade-Suav.Exp.
V	885.800.078 Kg	1.099.598.460 Kg	833.104.847 Kg
W0	1.771.600.156 Kg	2.199.196.920 Kg	1.666.209.694 Kg
WC	0 Kg	0 Kg	0 Kg
WF	221.450.019 Kg	274.899.615 Kg	208.276.212 Kg
W	1.882.325.166 Kg	2.336.646.727 Kg	1.770.347.800 Kg
LFI	0,758	0,758	0,758
X	1,000	1,000	1,000
f(X)	0,900	0,900	0,900
MCI	0,318	0,318	0,318

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Gráfico 1- 50% de MP reciclada no Cenário 2



Fonte: Elaborado pelos Autores.

No Cenário 3 (Tabela 8), os limites de quantidade de MP de origem reciclada fizeram com que as parcelas de FR variassem, já que a massa total é diferente, assim houve diferença entre os valores de MCI por método de previsão de demanda. Agora, as premissas de modelagem foram distintas em função da não linearidade dos cenários modelados.

Tabela 8- Resultados do MCI para o Cenário 3 com capacidade de 400.000 ton de MP reciclada

Cenário 3 (400.000 ton recicladas)			
Var.	HW-Aditivo Estendido	HW-Regressão Linear	Sazonalidade-Suav.Exp.
M	1.771.600.156 Kg	2.199.196.920 Kg	1.666.209.694 Kg
FR	22,58%	18,19%	24,01%
FU	0%	0%	0%
CR	0%	0%	0%
CU	0%	0%	0%
EC	0%	0%	0%
EF	80%	80%	80%
L/Lav	100%	100%	100%
U/Uav	100%	100%	100%

Cenário 3 - Indicadores MCI			
Index	HW-Aditivo Estendido	HW-Regressão Linear	Sazonalidade-Suav.Exp.
V	1.371.600.156 Kg	1.799.196.920 Kg	1.266.209.694 Kg
W0	1.771.600.156 Kg	2.199.196.920 Kg	1.666.209.694 Kg
WC	0 Kg	0 Kg	0 Kg
WF	100.000.000 Kg	100.000.000 Kg	100.000.000 Kg
W	1.821.600.156 Kg	2.249.196.920 Kg	1.716.209.694 Kg
LFI	0,889	0,910	0,882
X	1,000	1,000	1,000
f(X)	0,900	0,900	0,900
MCI	0,200	0,181	0,206

Fonte: Elaborado pelos Autores

Quando a capacidade máxima de suprimento de MP reciclada foi definida como 200.000 toneladas por ano (Tabela 9), o valor de FR variou proporcionalmente, porém, o MCI não se comportou da mesma maneira.

Calculando a variação percentual relativa da parcela de MP reciclada e da variação percentual relativa do MCI, observou-se nos Gráficos 2 e 3, que a variação relativa do MCI é menor do que a do FR.

Tabela 9-Cenário 3 com capacidade de 200.000 ton de MP reciclada

Cenário 3 (200.000 ton recicladas)			
Var.	HW-Aditivo Estendido	HW-Regressão Linear	Sazonalidade-Suav.Exp.
M	1.771.600.156 Kg	2.199.196.920 Kg	1.666.209.694 Kg
FR	11,29%	9,09%	12,00%
FU	0%	0%	0%
CR	0%	0%	0%
CU	0%	0%	0%
EC	0%	0%	0%
EF	80%	80%	80%
L/Lav	100%	100%	100%
U/Uav	100%	100%	100%

Cenário 3 - Indicadores MCI			
Index	HW-Aditivo Estendido	HW-Regressão Linear	Sazonalidade-Suav.Exp.
V	1.571.600.156 Kg	1.999.196.920 Kg	1.466.209.694 Kg
W0	1.771.600.156 Kg	2.199.196.920 Kg	1.666.209.694 Kg
WC	0 Kg	0 Kg	0 Kg
WF	50.000.000 Kg	50.000.000 Kg	50.000.000 Kg
W	1.796.600.156 Kg	2.224.196.920 Kg	1.691.209.694 Kg
LFI	0,944	0,955	0,940
X	1,000	1,000	1,000
f(X)	0,900	0,900	0,900
MCI	0,150	0,141	0,154

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Os resultados mostram que o uso da previsão de demanda pelo método de HW-LR gerou o menor MCI calculado nas duas situações de restrição, sendo que entre as duas outras técnicas de previsão de demanda (HW-AE e Suav.Exp) os valores foram muito próximos, com menos de 1% (absoluto) de diferença.

O método de HW-RL obteve também a menor variação percentual relativa do MCI (22%) para a mesma variação relativa de F_R (50%) em relação às outras técnicas, ou seja, se mostrou menos suscetível a queda quando há faltas no suprimento de matéria prima recuperada.

Gráfico 2-Variação relativa do F_R

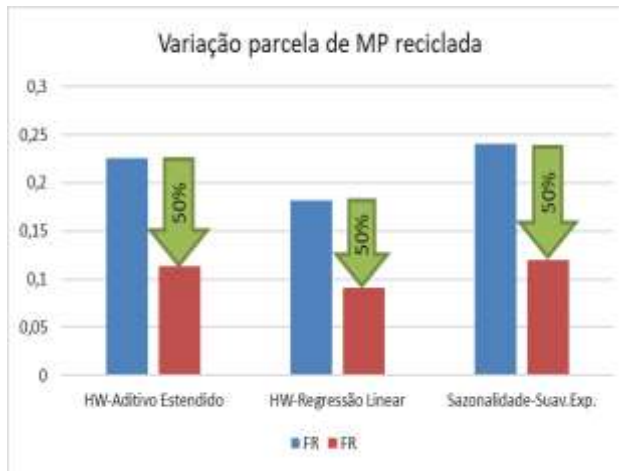
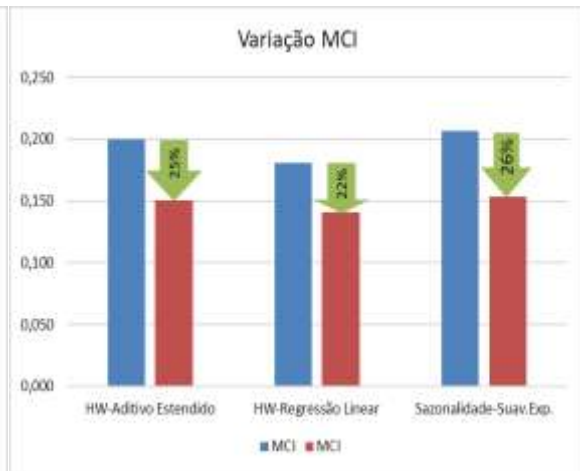


Gráfico 3-Variação relativa do MCI



Fonte: Elaborado pelos Autores

A Tabela 10 mostra um resumo para cada método de previsão de demanda em relação à variação percentual relativa do MCI e do MAPE, mostrando que o HW-LR foi o melhor método de previsão para utilização em sistemas produtivos circulares para a produção de painéis de madeira.

Tabela 10-Resumo dos resultados

	MCI		VPR. MCI	MAPE
	Cap.400kt	Cap.200kt		
HW-AE	0,2	0,15	25%	13,83%
HW-RL	0,181	0,141	22%	1,56%
Suav.Exp.	0,206	0,154	26%	0,67%

Fonte: Elaborado pelos Autores.

6. Conclusão

Dentre os métodos de previsão de demanda avaliados, o mais vantajoso foi o HW-RL, pois apesar de ter gerado valores de circularidade levemente inferiores aos demais métodos, apresentou menor susceptibilidade a quedas por oscilações na capacidade de suprimento de fornecedores de matéria prima reciclada. Além disso, a previsão pelo HW-RL apresentou uma boa taxa de erro, MAPE = 1,56% em comparação aos 13,83% do método EAHW.

Ficou claro que a variação do MCI não tem uma relação linear com a demanda ou massas de material do sistema quando se considera restrições de suprimento de matéria prima recuperada,

sendo assim, a ideia intuitiva de que a taxa de erro da previsão de demanda teria uma relação linear com a taxa de variação do MCI foi refutada.

Evidenciou-se que o papel da previsão de demanda na análise do MCI tem a ver com o volume previsto, quanto maior o volume previsto, menos suscetível às variações por problemas logísticos será o sistema produtivo, mas isso também apresenta o risco de uma previsão muito acima da demanda real, o que pode gerar grandes perdas e impactos sobre o meio ambiente.

Portanto torna-se latente a importância da inclusão de uma análise de MCI nas atividades de previsão de demanda, especialmente antes de se tomar a decisão sobre qual método utilizar, pois a análise de circularidade pode ajudar a tomar uma decisão mais precisa para contribuir para uma EC na gestão de operações.

Por fim, é válido ressaltar que, devido à natureza do produto estudado, não foi possível avaliar o comportamento do MCI em relação a entradas de reuso (FU). E, que seria interessante realizar a análise do MCI com dados reais sobre a eficiência do processo de reciclagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo auxílio financeiro. Diogo A. Lopes Silva também agradece à FAPESP, processos N° 2013/06736-9 e N° 2018/04626-5.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). 2013. **Statistical Yearbook ABRAF**: base year 2012. Brasília, STCP Engenharia de Projetos.

BRUNNER, P.H., RECHBERGER, H. 2004. Practical handbook of material flow analysis. *Int J LCA*, 9, 337–338.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION AND GRANTA DESIGN. 2015. Circularity indicators – an approach to measuring circularity – project overview. **The Circular Economy Project**, 12.p.

EUROSTAT, 2001. Economy-wide material flow accounts and derived indicators. A methodological guide. Luxembourg. **Office for Official Publications of the European Communities**; 2001.

GHISELLINI, P., CIALANI, C., ULGIATI, S. 2016. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner production**, 114, 11-32.

GOVINDAN, K., HASANAGIC, M. 2018. A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: a supply chain perspective. **International Journal of Production Research**, 1-34.

HYNDMAN, R. J., KOEHLER, A. B. 2006. Another look at measures of forecast accuracy. **International journal of forecasting** 22(4), 679-688.

KALMYKOVA, Y.; SADAGOPAN, M.; ROSADO, L. Circular economy - From review of theories and practices to development of implementation tools. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, n. October 2017, p. 190–201, 2018.

KIRCHHERR J., REIKE D., HEKKERT, M. 2017. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. **Resource, Conservation and Conservation** 127, 221-232.

LIEDER, M., A. RASHID. 2016. Towards Circular Economy Implementation: A Comprehensive Review in Context of Manufacturing Industry. **Journal of Cleaner Production** 115, 36–51.

MAKRIDAKIS, S., BAKAS, N. 2016. Forecasting and uncertainty: A survey. **Risk and Decision Analysis** 6(1), 37-64.

MORAGA, G. et al. Circular economy indicators: What do they measure? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, n. March, p. 452–461, 2019.

OLIVEIRA, F. R. DE; FRANÇA, S. L. B.; RANGEL, L. A. D. Challenges and opportunities in a circular economy for a local productive arrangement of furniture in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, n. October 2017, p. 202–209, 2018.

ONU (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS). **Agenda 2030**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/?fbclid=IwAR0snbO2ijbxjzMbYZ1MdAvfs8zGO7Oo6KgW9oV4MOeQ7kR5i4Lxr0WGRE>>. Acesso em: 19 Jul 2019.

PANAYIOTOU, N. A., GAYIALIS, S. P., TATSIPOULOS, I. P. 2006. Re-engineering of the forecasting process in a Greek wood-processing company. **Production Planning & Control** 17(3), 257-272.

PRESTWICH, S. et al., 2014. Mean-based error measures for intermittent demand forecasting. **International Journal of Production Research** 52(22), 6782-6791.

SARKIS, et al. 2010. Stakeholder pressure and the adoption of environmental practices: The mediating effect of training. **Journal of Operations Management**, v.28, p163-176.

SILVA et al. 2013. Life cycle assessment of medium density particleboard (MDP) produced in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 18,1404–1411.

SILVA et al. 2014. Combined MFA and LCA approach to evaluate the metabolism of service polygons: A case study on a university campus. **Resources, Conservation and Recycling**, 94,157-168.

TOBAL, T.F. Can the choice of demand forecasting methods affect circularity of production systems?. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção). Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Produção, 30p. 2017.

TRATAR, L. F., STRMČNIK, E. 2016. “The Comparison of Holt-Winters Method and Multiple Regression Method: A Case Study.” **Energy** 109, 266–76.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. DA. Panorama de mercado: painéis de madeira. **BNDS setorial**, v. 40, p. 323–384, 2014.

WALDMAN, D.A., BALTHAZARD, P. A. Circularity Indicators: An Approach to Measuring Circularity. **Organizational Neuroscience**, v. 7, p. 189–211, 2015.

WANG; PETROPOULOS. (2016). To select or to combine? The inventory performance of model and expert forecasts. **International Journal of Production Research**. v.54.p.5271-5282.