

Uma análise de técnicas quantitativas para a avaliação da produção enxuta

An analysis of quantitative techniques for lean production assessment

Gabriel Henrique Pereira Nascimento * – gabrielhenrique.hpn@gmail.com

Paulo Guilherme de França Alcantara* – paulogfa@hotmail.com

Luciano Costa Santos * – luciano@ct.ufpb.br

*Universidade Federal da Paraíba – (UFPB), João Pessoa, PB

Article History:

Submitted: 2021 - 10 - 21

Revised: 2021 - 11 - 06

Accepted: 2021 - 11 - 06

Resumo: A implementação da produção enxuta ocorre por meio de um processo de melhoria contínua que demanda monitoramento constante. Para isso, são utilizados métodos de avaliação compostos de técnicas quantitativas responsáveis pela determinação de indicadores que permitem aferir o estágio de implementação da produção enxuta. Diante da diversidade de técnicas que têm surgido na literatura, este artigo se propõe a analisar as técnicas quantitativas que vêm sendo utilizadas, de modo a contribuir para que novas pesquisas tenham à disposição uma visão crítica e atualizada sobre o tema. Para isso, foi conduzida uma revisão sistemática da literatura que selecionou 79 artigos sobre o tema. A partir da análise dos artigos selecionados, foram identificadas dez técnicas, que foram analisadas de acordo com requisitos de avaliação extraídos da mesma amostra de artigos. Os resultados da análise demonstraram que nenhuma técnica foi capaz de atender a todos os requisitos. Porém, a análise realizada permitiu comparar as técnicas em termos de fundamentos, informações que proporcionam e limitações. Assim, pesquisadores e praticantes da área passam a dispor de um aporte teórico para a escolha de técnicas, assim como podem obter fundamentação suficiente para delinear trabalhos futuros.

Palavras-chave: Produção enxuta; Avaliação; Revisão de literatura

Abstract: The implementation of lean production occurs through a continuous improvement process that requires constant monitoring. For this, assessment methods are used, and they are usually composed of quantitative techniques responsible for providing indicators that allow assessing the implementation stage of lean production. Given the diversity of techniques that have emerged in the literature, this article aims to analyze the quantitative techniques that have been applied, contributing to new research with a critical and up-to-date overview of the subject. For this purpose, we conducted a systematic literature review that selected 79 articles on the topic. From the analysis of the selected articles, ten techniques were identified, which were analyzed according to assessment requirements extracted from the same sample of articles. The results of the analysis showed that no technique was able to meet all requirements. However, the analysis allowed comparing the techniques in terms of fundamentals, the information they provide, and limitations. Thus, researchers and practitioners will benefit from a theoretical basis for choosing techniques, as well as they can obtain a sufficient foundation to outline future work.

Keywords: Lean production; Assessment; Literature review

1. Introdução

A Produção Enxuta (PE) vem ganhando destaque no contexto acadêmico e tem sido foco de discussões nas últimas décadas (Marodin e Saurin, 2013). Além disso, um número considerável de publicações no meio acadêmico demonstra o crescente interesse da comunidade empresarial na adoção do pensamento enxuto (Danese *et al.*, 2018). A gestão de excelência da produção do Sistema Toyota de Produção tem sido ao longo dos anos copiada e utilizada como referência, levando à implementação de conceitos, princípios e práticas enxutas nas indústrias. Porém, alguns estudos evidenciam fracassos durante a implementação do modelo, devido à desconsideração da necessidade de um monitoramento contínuo do processo (Scherrer-Rathje *et al.*, 2009).

De acordo com Karlsson e Åhlström (1996) e Cocca *et al.* (2019), o processo de implementação da produção enxuta é contínuo, sugerindo que o processo deve ser permanentemente monitorado, de forma a identificar o nível de implementação *lean*, em outras palavras, o grau de *leanness*. Surge então a necessidade da empresa de avaliar continuamente a maturidade de suas práticas, evidenciando aperfeiçoamentos e melhorias em seu desempenho e sinalizando o caminho de implementação. Como consequência, torna-se imprescindível o desenvolvimento de métodos de avaliação da produção enxuta.

Diante disso, observa-se ao longo dos anos a realização de vários estudos que objetivavam o desenvolvimento de métodos de avaliação, geralmente buscando uma quantificação do grau de *leanness* (Narayanamurthy e Gurumurthy, 2016a), ou seja, o grau de implementação ou maturidade atingida na produção enxuta. Assim, surgiu uma ampla gama de opções para avaliação, com diferentes métodos que definem procedimentos gerais para avaliação da PE. Grande parte desses métodos se apoiam em técnicas quantitativas específicas ou uma combinação de técnicas.

No entanto, para avaliação adequada do nível *leanness* de uma empresa, é necessário compreender o funcionamento e os *outputs* das técnicas que compõem os métodos de avaliação, além de suas limitações e vantagens, de maneira a obter resultados mais apropriados à finalidade de cada avaliação. Assim, este artigo tem como objetivo identificar e realizar uma análise das principais técnicas de avaliação da PE na literatura, descrevendo e distinguindo-as, de maneira a identificar seus fundamentos e limitações, considerando a perspectiva de avaliação que se preocupa em analisar as práticas enxutas. Também foram elencados os requisitos fundamentais para avaliação da implementação da PE, de forma a

estabelecer parâmetros para a análise das técnicas identificadas. Para tanto, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, que tem como objetivo identificar na literatura artigos que estejam alinhados aos objetivos da pesquisa (Lacerda *et al.*, 2012).

Para melhor compreensão da estrutura desta pesquisa, o corpo do texto está dividido em cinco seções. A primeira se trata da introdução apresentada nesta seção, na segunda são abordados os procedimentos metodológicos do estudo e, em seguida, são definidos os requisitos de avaliação da PE, extraídos da literatura revisada. Posteriormente, são explanadas as técnicas de avaliação identificadas na revisão da literatura e a síntese geral dos fundamentos e limitações das técnicas analisadas. Por fim, serão abordados os aspectos que delineiam a conclusão da pesquisa.

2. Procedimentos metodológicos

Webster e Watson (2002) afirmam que a revisão da literatura representa uma possibilidade de contribuir cientificamente para o processo de desenvolvimento de teorias em áreas abundantes ou emergentes de pesquisa. Uma revisão sistemática de literatura se caracteriza pelo estabelecimento de critérios para conduzir um processo detalhado de seleção e análise de artigos que estejam alinhados aos objetivos da pesquisa (Lacerda *et al.*, 2012). De fato, a revisão sistemática permite identificar contribuições para uma área ou questão de pesquisa, possibilitando a replicabilidade do processo científico (Tranfield *et al.*, 2003). Neste artigo, a partir de uma completa revisão da literatura, foram identificados diversos estudos acerca do tema avaliação da PE, utilizando artigos científicos como foco da busca de publicações. Para encontrar o acervo, porém, foi necessário estabelecer uma sistemática de seleção de artigos.

Primeiramente, foi utilizada a seguinte combinação de termos de busca: (“*lean assessment*” OR “*lean performance*” OR “*evaluation of lean*”, “*lean measurement*” OR “*leanness level*” OR “*leanness index*”). A pesquisa foi realizada nas bases de dados *Emerald*, *Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct* e *Engineering Research Database*, não havendo restrições quanto à data de publicação dos artigos, porém com limite final determinado pela data das últimas buscas (março de 2020). Após a etapa de busca, verificou-se a necessidade de exclusão de duplicatas e, após leitura dos títulos dos artigos, removeram-se os artigos que não se alinhavam ao tema de pesquisa. Em seguida, com os artigos restantes do portfólio, procedeu-se a leitura dos resumos, removendo aqueles que estavam desalinhados ao tema de

pesquisa. A Figura 1 ilustra o fluxo de seleção de artigos para a revisão sistemática e os filtros utilizados em cada etapa.

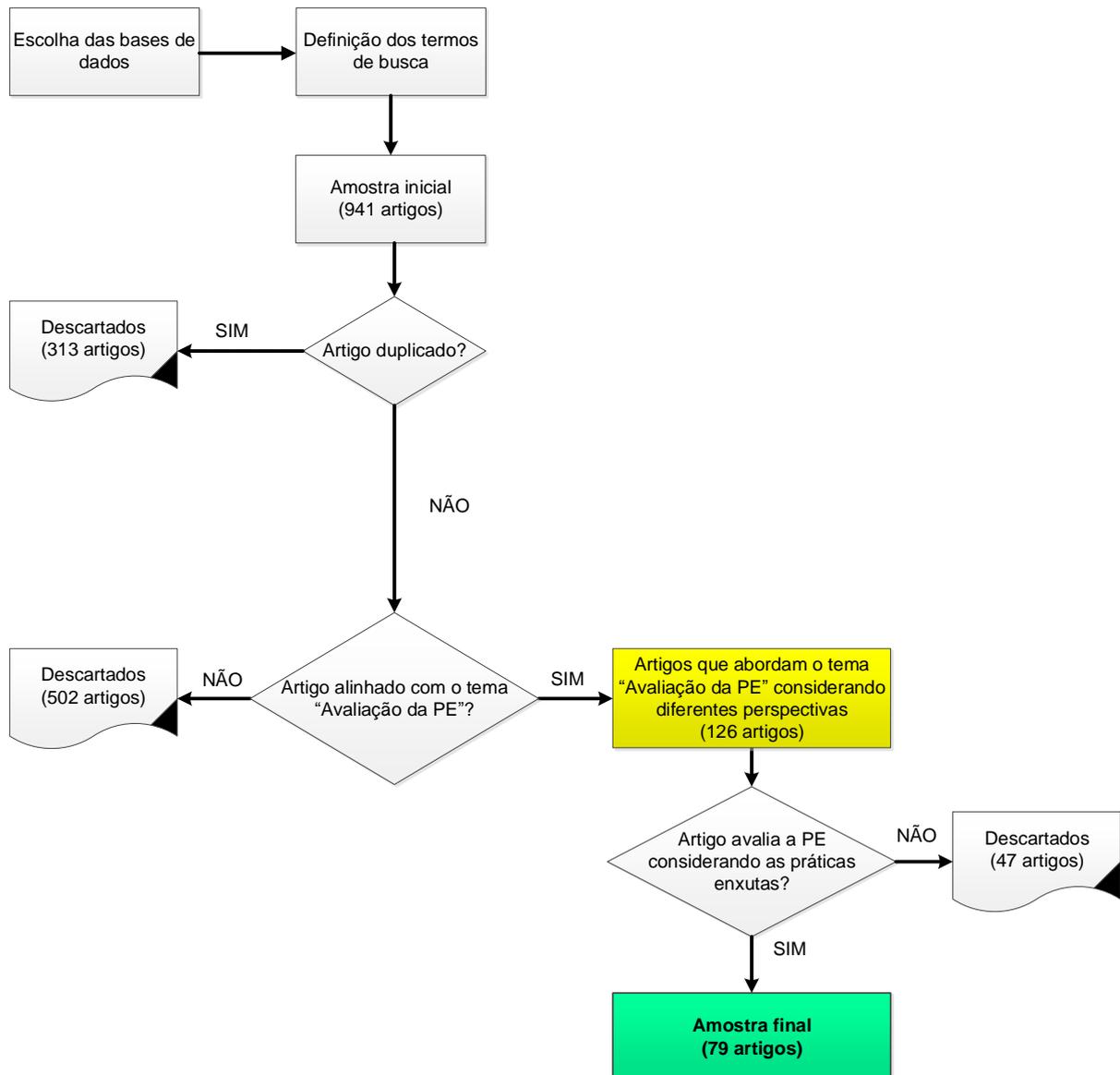


Figura 1 – Fluxo de seleção de artigos

Observou-se que os estudos sobre avaliação da PE encontrados na literatura têm considerado basicamente quatro perspectivas de avaliação: (1) nível de prontidão para a implementação da PE, (2) nível de implementação da PE na cadeia de suprimentos, (3) nível de desempenho em termos de resultados da PE (operacionais, financeiros, etc.) e (4) nível de implementação considerando o grau de implementação das práticas enxutas. Desta maneira, surgiu a necessidade de realizar um último filtro da revisão, pois este estudo buscou identificar as principais técnicas de avaliação da PE considerando a perspectiva das práticas

enxutas, ou seja, o grau de implementação da PE no nível da unidade produtiva. Sendo assim, o portfólio final encontrado na revisão foi de 79 artigos.

A análise do portfólio final de artigos ocorreu em dois momentos. Inicialmente, realizou-se uma análise geral a respeito dos estudos publicados, de maneira a identificar a distribuição anual de publicações, os métodos de pesquisa predominantes, os principais periódicos e países que concentram os estudos no tema (possuindo como critério o país de autor principal). Nessa etapa, também buscou-se identificar a distribuição das principais técnicas utilizadas para avaliação das práticas enxutas.

Em seguida, realizou-se uma análise de conteúdo dos artigos publicados, que consistiu na análise das principais técnicas de avaliação identificadas na literatura, descrevendo e caracterizando seus respectivos fundamentos e limitações. Para tanto, verificou-se a necessidade de identificar os requisitos fundamentais para a avaliação da PE, com base no portfólio final, de maneira a estabelecer parâmetros para a análise das técnicas.

3. Requisitos para avaliação da produção enxuta

Nesta pesquisa, foram elencados requisitos que são apresentados na literatura como relevantes para avaliar a implementação da PE. Eles foram originados da revisão de literatura por meio da leitura dos artigos publicados sobre a avaliação da PE considerando práticas enxutas.

Portanto, sete requisitos foram extraídos dos estudos: (1) redução da imprecisão pela avaliação subjetiva; (2) estabelecimento de *bundles*, ou seja, a formação de conjuntos de práticas; (3) consideração da PE como um sistema integrado por meio da avaliação das interações entre os elementos; (4) classificação dos elementos quanto às relações causa-efeito entre eles; (5) estabelecimento de parâmetros (escalas de classificação) que permitam determinar o nível de implementação da PE do sistema avaliado; (6) determinação de um valor global de *leanness*, de modo a identificar em que estágio de implementação o sistema de uma organização se encontra; (7) identificação dos elementos mais fracos, ou seja, das práticas enxutas que devem ser priorizadas. O Quadro 1 descreve os requisitos que servem de base para a análise de uma técnica de avaliação.

A redução da imprecisão surge da necessidade de tratar dados qualitativos nos casos em que a avaliação decorre do julgamento humano (Susilawati *et al.*, 2015). A literatura mostra que a utilização das técnicas de pontuação sofre de algumas limitações, como a

subjetividade e a imprecisão das respostas qualitativas (Anvari *et al.*, 2013), uma vez que o avaliador expressa mais facilmente o desempenho usando variáveis linguísticas (Vinodh e Vimal, 2012). Nesse sentido, assumindo que a subjetividade é inerente à avaliação (Tiwari e Tiwari, 2018), a necessidade em reduzir a imprecisão no processo de avaliação da produção enxuta é fundamental para que os resultados representem a realidade da organização.

Quadro 1 – Requisitos de avaliação

Requisito	Descrição	Exemplos de referências de suporte
Redução da imprecisão	Necessidade de um sistema que reduza a imprecisão e subjetividade de avaliações baseadas em julgamentos humanos.	Vimal e Vinodh (2013); Susilawati <i>et al.</i> (2015); Saleeshya e Binu (2019).
Agrupamento dos elementos em <i>bundles</i> ou <i>clusters</i>	Estabelecimento de grupos de práticas, representando conjuntos de elementos que representam subsistemas do sistema <i>lean</i> e permitem avaliações parciais.	Saurin <i>et al.</i> (2011); Wong <i>et al.</i> , (2014); Narayanamurthy e Gurumurthy (2016b)
Consideração das interações entre os elementos	Importância de considerar a PE de modo sistêmico, considerando os efeitos sinérgicos entre as práticas enxutas.	Bhasin (2011); Narayanamurthy e Gurumurthy (2016b)
Classificação dos elementos (prática base, meio ou fim)	Identificar quais elementos são bases para a melhoria do desempenho de outros elementos e quais elementos precisam da implementação de outros para serem implementados.	Saurin <i>et al.</i> (2011); Chaple <i>et al.</i> (2018).
Escalas de classificação de resultados	Estabelecimento de escalas que possam classificar os resultados globais da avaliação em diferentes níveis de implementação da PE.	Narayanamurthy e Gurumurthy (2016b); Saleeshya e Binu (2019).
Determinação de um valor único para o grau de <i>leanness</i>	Estabelecimento de um valor global único que indique o nível de <i>leanness</i> de um processo produtivo, facilitando a interpretação dos resultados e compreendendo o valor do sistema como um todo.	Anvari <i>et al.</i> (2014); Lucato <i>et al.</i> (2014).
Identificação dos elementos mais fracos dentro de um sistema	De acordo com os resultados obtidos, é possível identificar quais elementos de um sistema devem ser priorizados para alavancar o desempenho global do processo produtivo. Essa ação apresenta uma orientação para a empresa, no sentido de guiar a priorização de melhorias.	Vinodh e Vimal (2012); Chaple <i>et al.</i> (2018).

No contexto da avaliação de *leanness*, é essencial considerar que os aspectos sociais e tecnológicos atuam dinamicamente de maneira a alcançar o desempenho esperado (Wong *et al.*, 2014). Buscando aliar os diferentes aspectos envolvidos, Saurin *et al.* (2011) sugerem que as práticas enxutas devem ser agrupadas em subsistemas que caracterizam o sistema de produção enxuta. Também é importante considerar os efeitos sinérgicos entre as práticas e os diferentes aspectos da implementação da produção enxuta (Narayanamurthy e Gurumurthy, 2016b). Assim, destaca-se a importância em agrupar práticas inter-relacionadas e internamente consistentes em conjuntos que permitam reconhecer os diferentes elementos da produção enxuta (Shah e Ward, 2003).

Ao estudar o aspecto de avaliação, Bhasin (2011) reforça que a produção enxuta possui um caráter holístico que envolve a organização e gerenciamento como um todo, além de preconizar a atuação sinérgica e multidimensional entre as práticas para alcançar um sistema de alta qualidade, que produz no ritmo da demanda, com o mínimo de desperdícios. Apesar disso, Furlan, Vinelli e Pont (2011) afirmam que, embora algumas das relações entre práticas sejam amplamente reconhecidas, o conceito de sinergia entre elas permanece superficial e pouco explorado pela literatura. De fato, Shah e Ward (2003) também relatam que são poucos os estudos que consideram essa inter-relação, razão pela qual muitas empresas falham ao implementar a filosofia *lean*. Sendo assim, nota-se a importância em considerar a interação entre as diferentes práticas enxutas para avaliar o nível de implementação da produção enxuta.

Outro requisito importante é a classificação dos elementos que são importantes para a implementação da produção enxuta. Saurin *et al.* (2011) relatam que a avaliação de práticas enxutas depende da relação que existe entre elas, surgindo a necessidade de classificar as práticas em termos das interações de causa e efeito que ocorrem. Os autores consideram esse aspecto e classificam os tipos de relações em algumas categorias. As práticas-base representam aquelas que dão suporte para a implementação ou melhoria de desempenho de outros elementos, enquanto as práticas-fins são dependentes de outros elementos para serem implementadas (Saurin *et al.*, 2011). As práticas intermediárias, por sua vez, são aquelas interdependentes, cuja implementação depende de outras práticas, mas também dão suporte à implementação de outras (Saurin *et al.*, 2011). Além disso, também é interessante identificar os elementos mais fracos dentro de um sistema, uma vez que irá permitir elencar os elementos que necessitam de melhoria, e a partir disso propor ações que busquem alavancar o desempenho global *leanness*.

No contexto da PE, conforme argumentado por Azadeh *et al.* (2015), os gestores estão interessados em buscar indicadores para obter maior controle dos seus processos, mas não dão a devida importância para confirmar se tais indicadores refletem, de fato, o grau de maturidade *lean* da sua organização. O conceito de *leanness* reflete o estado de “quão enxuta” está uma empresa, isto é, a efetividade de implementação da PE. Visto que a PE é um sistema que compreende várias práticas, o *leanness* é considerado uma medida que integra e avalia tais práticas e, por isso, engloba todos os desempenhos das práticas adotadas. Portanto, uma técnica de avaliação, além de permitir elaborar escalas de classificação do nível de

implementação, deve proporcionar a obtenção de um índice de *leanness* que seja unificado, de forma a viabilizar a comparação entre diferentes sistemas.

Antes de analisar as técnicas de avaliação de *leanness* perante os requisitos apresentados, é necessário que a lógica de funcionamento das técnicas seja identificada. A próxima seção apresenta uma breve explicação sobre as principais técnicas utilizadas nos estudos sobre o tema.

4. Técnicas de avaliação

Ao analisar os artigos do portfólio selecionado, foi possível observar que eles variam no que diz respeito ao propósito da avaliação. Enquanto alguns estudos se propõem a avaliar o grau de adoção das práticas entre um grupo de empresas ou setor industrial, outros artigos propõem métodos avaliar o nível de *leanness* de uma empresa ou unidade produtiva, de forma que essa avaliação possa fornecer *feedback* sobre o estágio de implementação que a empresa se encontra e, principalmente, possa indicar as práticas que precisam ser melhoradas. Como este artigo adota a abordagem de avaliação de *leanness* como um diagnóstico que orienta a melhoria, procurou-se identificar as técnicas quantitativas que foram utilizadas com este propósito. Considerando esse propósito, a Figura 2 demonstra as principais técnicas quantitativas utilizadas para este fim, que foram identificadas em 42 artigos do portfólio.

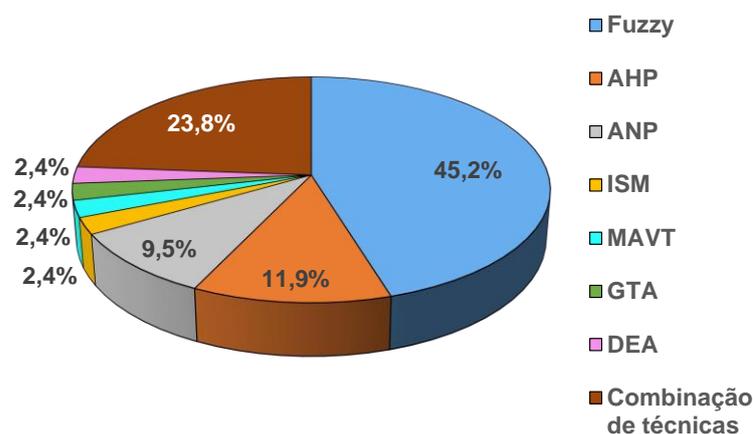


Figura 2 – Distribuição de artigos por técnica

Os percentuais das técnicas apresentadas na Figura 2 consideraram a utilização isolada de cada técnica por artigo. Porém, foi possível verificar que artigos mais recentes apresentam uma tendência em utilizar combinações de técnicas quantitativas para avaliar a PE, o que correspondeu a um percentual de 23,8% no gráfico da Figura 1. O Quadro 2 elenca as técnicas

que foram utilizadas de maneira combinada. É interessante notar que as combinações ocorreram em pares na maior parte dos artigos, em que se destacaram as técnicas *Artificial Neural Network* (ANN, usada em conjunto com a AHP ou *Fuzzy*), ISM (em conjunto com ANP ou AHP ou *Interpretive Ranking Process*, IRP) e *Data Envelopment Analysis* (DEA, combinada com AHP). O *Decision Making Trial and Evaluation Laboratory* (DEMATEL), por sua vez, foi identificado em associação a três outras técnicas (*Fuzzy*, AHP e DEA), num modelo proposto Azadeh *et al.* (2015).

Quadro 2 – Utilização de técnicas combinadas

Artigos com combinação de técnicas	Técnicas utilizadas em conjunto							
	<i>Fuzzy</i>	AHP	ANP	ANN	ISM	IRP	DEA	DEMATEL
Nasab <i>et al.</i> (2012)		●		●				
Vimal e Vinodh (2013)	●			●				
Anvari <i>et al.</i> (2014)		●					●	
Azadeh <i>et al.</i> (2015)	●	●					●	●
Thomas <i>et al.</i> (2017)		●			●			
Tiwari e Tiwari (2018)	●	●						
Chaple <i>et al.</i> (2018)					●	●		
Saleeshya e Binu (2019)	●			●				
Yadav <i>et al.</i> (2019)			●		●			
Tekez e Taşdeviren (2020)	●		●					

Conforme a literatura revisada, quando o objetivo é avaliação de *leanness* para diagnóstico do sistema, é possível dispor de uma variedade significativa de técnicas quantitativas. Entretanto, o que leva a escolha de uma técnica em detrimento de outras? A partir da leitura integral do portfólio de artigos desta pesquisa, foram revisadas as dez técnicas identificadas, de forma a analisar o propósito e a lógica de funcionamento de cada uma, os resultados esperados, assim como suas limitações.

4.1. Lógica Fuzzy

Muitas organizações adotam decisões em grupo para solucionar problemas reais em sistemas complexos em que predominam critérios qualitativos de avaliação manifestados, na maioria das vezes, através de expressões linguísticas ao invés de valores (Zhou *et al.*, 2011). Matawale *et al.* (2014) e Susilawati *et al.* (2015) afirmam que, devido ao fato de as avaliações

serem atribuídas de modo subjetivo e conforme a perspectiva humana, as pontuações são imprecisas, pois é difícil determinar um valor exato que realmente defina um elemento avaliado. Desse modo, a presença de imprecisão e subjetividade necessita de um sistema de medição que proporcione maior adequação (Vimal e Vinodh, 2013). Assim, a lógica *fuzzy* se estabelece como uma técnica capaz de minimizar os efeitos da imprecisão associada a esse tipo de avaliação (Vinodh e Chintha, 2011).

A técnica foi inicialmente introduzida por Zadeh em 1965 (Akyuz e Celik, 2015) e possui uma abordagem baseada na lógica humana (Vinodh e Chintha, 2011), sendo capaz de lidar com ambiguidades, incertezas e imprecisões de julgamentos humanos (Akyuz e Celik, 2015). Diferente da lógica booleana tradicional, que define se um elemento pertence ou não a um determinado grupo com uso de 1 ou 0, a lógica *fuzzy* define um grau de pertinência por meio de uma função de pertinência capaz de transformar variáveis linguísticas em números *fuzzy* (Chang *et al.*, 2011; Vinodh e Kumar, 2012). Nessa função, um único valor é convertido em um número *fuzzy* (Susilawati *et al.*, 2015), de forma a eliminar ou reduzir desvantagens como imprecisões, subjetividades, ambiguidades e incertezas (Vinodh e Vimal, 2012).

Alguns dos métodos da lógica *fuzzy* podem ser encontrados na literatura, como o conjunto *fuzzy* (*fuzzy set*), as variáveis linguísticas, a distribuição de probabilidade e o *fuzzy IF-THEN rules* (Vinodh e Chintha, 2011). É possível perceber que não há um sistema único de conhecimento para a lógica *fuzzy*, e existe uma grande variedade de metodologias propostas para esta técnica (Anvari *et al.*, 2013).

Em geral o processo se dá por meio da transformação de variáveis linguísticas imprecisas em números *fuzzy* triangulares ou trapezoidais. Após esta etapa ocorre a fase da defuzzificação, que consiste basicamente em selecionar um único valor baseado nos números *fuzzy* (Opricovic e Tzeng, 2003). A partir do estabelecimento dos números *fuzzy*, a abordagem pode desenvolver diversas metodologias para atingir o objetivo proposto. No contexto da avaliação em gestão da produção, observam-se aplicações da lógica *fuzzy* na determinação de elementos fracos para melhoria de um sistema de produção, como por exemplo, no estabelecimento de índices de *leanness* (Vinodh e Chintha, 2011), na diminuição da imprecisão em tomada de decisões da cadeia de suprimentos (Amid *et al.*, 2011), determinação de pesos de critérios quantitativos e qualitativos numa cadeia de suprimentos sob determinadas condições (Amid *et al.*, 2006), entre outros. Esses exemplos explicitam a

extensão de aplicações e encorajam o desenvolvimento de modelos de avaliação da PE utilizando a lógica *fuzzy*.

4.2. *Analytic Hierarchy Process (AHP)*

O AHP trata-se de uma técnica que lida com a tomada de decisões, baseado no princípio de que as experiências e conhecimentos das pessoas são tão valiosos quanto os dados usados no processo de decisão (Vargas, 1990), sendo umas das técnicas mais utilizadas quando se consideram múltiplos critérios na tomada de decisões (Vaidya e Kumar, 2006).

Alguns passos gerais envolvem a utilização da técnica, como afirma Vaidya e Kumar (2006): inicialmente estabelece-se o problema e seus objetivos; em seguida identifica-se os critérios que influenciam o processo de tomada de decisão, estruturando-os em uma hierarquia de diferentes níveis; compara-se a importância par a par dos elementos correspondentes de cada nível; por fim, realiza-se a normalização de cada critério e a tomada de decisão de acordo com os valores normalizados.

Percebe-se que se trata de uma técnica unidirecional que envolve tanto critérios de avaliação qualitativos quanto quantitativos. Além disso, possui a particularidade de ser flexível para ser integrada com diferentes técnicas, como lógica *fuzzy* e programação linear (Vinodh *et al.*, 2011). Assim, visto que a técnica demonstra o problema de uma maneira estruturada e sistemática, verificam-se aplicações na seleção das melhores práticas enxutas, evidenciando aquelas que necessitam de melhorias, além de determinar interligações entre as práticas, estabelecendo um panorama do sistema.

Embora o AHP apresente dificuldades para a determinação do grau de implementação de uma prática enxuta, ele é particularmente útil quando se deseja obter o impacto de uma prática em um objetivo de desempenho. Assim, isoladamente ou em combinação com outras técnicas, demonstra utilidade na avaliação da PE.

4.3. *Analytic Network Process (ANP)*

O ANP também é uma técnica de decisão multicritério, mas considera uma relação de interdependência entre os critérios, diferente da relação unidirecional encontrada no AHP (Agarwal *et al.*, 2006). Em sua essência, é uma generalização do AHP, na qual são estabelecidos graus de importância emparelhadas entre os critérios de tomada de decisão (Saaty, 2008).

O funcionamento do ANP, em geral, inicia-se com a determinação de objetivos, critérios e subcritérios, construindo-se clusters de práticas (se necessário) para, então, realizar uma comparação par a par. Diferenciando-se do AHP, aqui se constrói e se calcula a chamada supermatriz original, composta pelos valores normalizados de todos os critérios em avaliação, seguido pelo cálculo da supermatriz ponderada (considerando os pesos de cada critério) e pelo cálculo e normalização da supermatriz limite (Saaty e Vargas, 2006).

Dentro do contexto de avaliação da produção enxuta, a técnica possibilita a consideração de todas as interdependências de elementos e práticas enxutas, proporcionando um maior detalhamento do sistema (Cil e Turkan, 2013), fundamentais para futuras tomadas de decisões com base no sistema *lean* global.

4.4. Artificial Neural Network (ANN)

Redes neurais artificiais (ANN) constituem uma técnica composta por redes computacionais que tentam simular, grosseiramente, as redes neurais do sistema biológico humano (Daniel, 2007). Utiliza-se de um processamento estrutural de informações que consiste em processar elementos interconectados via canais de sinal unidirecional (Kamruzzaman *et al.*, 2006). Haykin (1999) relata que as redes neurais são processadores paralelamente distribuídos, constituídos de unidades de processamento simples, que permitem o armazenamento do conhecimento experimental. Dois atributos principais associados ao ANN podem ser mencionados: é capaz de aprender a partir de exemplos e generalizar informações a partir de dados incertos. Além disso, também é capaz de atuar em situações em que os dados de entrada estão errados, incompletos ou são subjetivos (Kamruzzaman *et al.*, 2006). Sendo assim, as redes neurais são capazes de aprender e generalizar, tornando possível que problemas complexos sejam resolvidos (Haykin, 1999).

De maneira similar ao funcionamento neural humano, também funcionam as redes neurais artificiais (Doumpos e Zopounidis, 2004). Nesse caso, as unidades de processamento individuais, também chamados de nós (análogo ao neurônio), recebem dados de entrada proveniente de outras fontes e produzem saídas (Kamruzzaman *et al.*, 2006). Os sinais de entradas devem ser multiplicados por pesos que representam a força de conexão com a unidade de processamento (Kamruzzaman *et al.*, 2006). As saídas podem ser utilizadas como dados de entradas para outras unidades de processamento.

De maneira geral, as redes neurais são caracterizadas por serem compostas de: (1) características computacionais de cada unidade de processamento, isto é, uma função de

ativação, (2) a arquitetura da rede e (3) o algoritmo de aprendizagem da rede (Kamruzzaman *et al.*, 2006). A função de ativação permite a geração de uma saída a partir dos dados e pesos de entrada. A estrutura da rede neural representa, por sua vez, como as unidades de processamento estão agrupadas evidenciando suas interconexões. Já o algoritmo de aprendizagem permite que o sistema possua a habilidade de aprender a partir de seu ambiente e de melhorar seu desempenho através da aprendizagem (Haykin, 1999).

Para avaliar a produção enxuta, as redes neurais permitem que haja uma redução de subjetividades e ambiguidades provenientes do processo de avaliação (Ben Ruben *et al.*, 2017). O uso dessa técnica também permite que se identifique as relações existentes entre determinados elementos ou critérios a partir dos pesos correspondentes, além de possibilitar que, a partir de dados históricos, se priorize os elementos ou decisões (Vimal e Vinodh, 2013).

4.5. Interpretive Structural Modeling (ISM)

ISM é uma técnica utilizada com o objetivo de identificar e resumir as diferentes relações existentes entre determinados elementos (Thakkar *et al.*, 2006). A técnica foi desenvolvida para estudar problemas complexos e estruturá-los por meio de grafos e palavras de fácil interpretação (Poduval *et al.*, 2015). Permite impor ordem e direção em relações complexas de elementos de um sistema (Sushil, 2012). Além disso, possibilita que problemas e modelos mentais pouco claros e mal articulados sejam transformados em modelos visíveis e bem definidos (Attri *et al.*, 2013).

As inter-relações entre os diferentes elementos de um problema são feitas em pares, cuja interpretação se baseia em julgamentos de grupos de especialistas (Poduval *et al.*, 2015). A técnica é interpretativa uma vez que os julgamentos de um grupo de especialistas decidem a maneira como os elementos estão inter-relacionados (Singh *et al.*, 2014). É uma técnica estrutural já que possibilita a formação de uma estrutura, extraída a partir das inter-relações entre os elementos sistema complexo, e a modelagem, pois os relacionamentos entre os elementos e a estrutura geral são retratadas por meio de um modelo gráfico (Singh *et al.*, 2014). Neste modelo gráfico os elementos são representados por “pontos” do gráfico, e as relações existentes entre os elementos são indicadas pela presença de um segmento de reta (Watson, 1978). Assim, a ISM aborda uma aplicação sistemática de noções da teoria dos grafos, para explicar a complexidade existente entre as relações de um determinado conjunto de variáveis (Sushil, 2012).

São citadas na literatura diversas etapas envolvidas no desenvolvimento da técnica ISM. Singh *et al.* (2014) listam algumas etapas básicas envolvidas nesta técnica: identificação dos elementos que são relevantes para o problema, estabelecimento das relações existentes entre os diferentes elementos (em pares), desenvolvimento da *self-interaction matrix* (indicando os relacionamentos em pares dos elementos do sistema), elaboração da *reachability matrix* e particionamento da *reachability matrix* em diferentes níveis. A partir das relações identificadas nas etapas anteriores, segue-se para a etapa em que se desenha o grafo, convertendo o diagrama obtido num modelo ISM. Sugere-se também a revisão do modelo em busca de inconsistências conceituais, fazendo os ajustes necessários no modelo (Singh *et al.*, 2014).

Com a finalidade de avaliação da PE, a ISM possibilita a avaliação detalhada entre os elementos do sistema *lean* (práticas enxutas, por exemplo). No entanto, ela possui a limitação de não proporcionar a avaliação do elemento em si, o que a torna insuficiente para determinar o grau de *leanness*, quando usada de forma isolada.

4.6. Interpretive Ranking Process (IRP)

O IRP pode ser entendida como uma técnica que busca integrar a lógica analítica do processo de escolha racional com o processo de decisão intuitivo no nível elementar (Sushil, 2009; Mhatre *et al.*, 2017). Em outras palavras, a técnica pode ser aplicada para ranquear elementos ou fatores relevantes, diferentemente da ISM, que se limita a identificação das relações entre os diferentes fatores (Mhatre *et al.*, 2017).

A utilização do IRP preconiza uma comparação em pares dos elementos, permitindo uma redução da carga cognitiva humana (Sushil, 2009; Mhatre *et al.*, 2017). Ao mesmo tempo, supera as desvantagens associadas a comparação par a par, presente, por exemplo, em técnicas como AHP, já que no IRP o especialista deve explicitar a lógica interpretativa da dominação de um elemento sobre outro em cada par comparado (Sushil, 2009). Além disso, a técnica permite que haja a criação de novos conhecimentos, fundamentais para processos de decisões (Thakkar *et al.*, 2008).

Sushil (2009) relata algumas etapas necessárias para a aplicação da técnica, sendo: identificar dois conjuntos de variáveis (para fins de comparação emparelhada), a partir das quais devem-se identificar as diferentes relações existentes entre os elementos dos conjuntos. Em seguida, desenvolve-se a *cross-interaction matrix* entre os dois conjuntos, convertendo-a na *interpretive matrix*, que é usada como base para interpretação das relações de dominância

de uma interação sobre a outra (por meio da conversão em uma lógica interpretativa de comparações e matriz de interações dominantes) (Chaple *et al.*, 2018). O ranqueamento é feito em termos de dominância e quantidade de interações, e deve ser representado por meio de grafos, obtendo um modelo IRP (Chaple *et al.*, 2018).

Para a avaliação da PE, o IRP vai além da ISM, pois além de avaliar a relações entre os elementos do sistema, permite o ranqueamento que determina a priorização de melhorias. Entretanto, a avaliação das práticas nesse caso é sempre comparativa, o que facilita entender quais práticas estão mais desenvolvidas em relação às demais, mas não em relação ao que ainda precisa ser feito.

4.7. Multiple Attribute Value Theory (MAVT)

MAVT é um caso especial da teoria de utilidade de múltiplos atributos (do inglês, MAUT), na qual não há incerteza nas consequências das alternativas (Greco *et al.*, 2005). MAUT e MAVT constituem uma família de métodos com foco na estrutura de múltiplos critérios, especialmente quando riscos e incertezas atuam diretamente na avaliação de alternativas (Dyer *et al.*, 2013).

MAUT trata-se de uma técnica para dar suporte as tomadas de decisões quando há um número limitado de alternativas, cuja avaliação é definida por meio de uma ponderação de seus valores em relação aos seus atributos relevantes (Jansen *et al.*, 2011). MAVT nada mais é que uma versão modificada da MAUT, que se diferencia ao considerar o ranqueamento das alternativas e pesos dos critérios no processo de tomada de decisão (Cho, 2003). Por alternativas entende-se como sendo as opções que o tomador de decisão possui para avaliação, enquanto atributos se referem à importância das características das alternativas (Jansen *et al.*, 2011).

Heinrich *et al.* (2007) argumentam que a diferença entre as duas técnicas (MAUT e MAVT) está no fato de que a MAVT é formulada de modo a assumir que os resultados das alternativas são conhecidos com certeza, enquanto a MAUT, explicitamente, leva em consideração a incerteza. Cho (2003) descreve a aplicação da MAUT em seis etapas básicas: (1) identificação dos atributos relevantes, (2) especificar variáveis quantificáveis aos atributos e suas respectivas restrições, (3) selecionar e elaborar a função de utilidade para cada atributo, (4) sintetizar as funções de utilidade de cada atributo em uma única função, (5) avaliar as alternativas utilizando a função da etapa anterior, e por fim (6) escolher a alternativa com os maiores valores de utilidade.

Na prática, a MAVT se diferencia ao usar uma função de valor para representar os resultados das alternativas determinísticas, já a MAUT usa uma função de utilidade (Heinrich *et al.*, 2007). Usando um procedimento de aplicação análogo ao da MAUT, a intenção da MAVT é associar um número a uma determinada alternativa, para produzir uma ordem de preferência sobre as alternativas (Madeira *et al.*, 2012). Para tanto, assume-se que uma função de valor existe e representa as preferências do tomador de decisão, transformando os atributos de cada alternativa em um único valor (Madeira *et al.*, 2012). Almeida (2013) explicita que uma função de valor está relacionada a avaliações de consequências dado um contexto de certeza, enquanto uma função de utilidade refere-se a avaliações de consequências dentro de um contexto probabilístico.

No âmbito da avaliação da produção enxuta, a MAVT possibilita que haja uma comparação e ranqueamento de alternativas, ou elementos, priorizando aquelas que são mais importantes dentro de um sistema e considerando os respectivos pesos atribuídos. Além disso, uma vez que se utiliza funções de valor, a técnica sintetiza as avaliações das alternativas em relação a determinados atributos, fornecendo a importância relativa entre os atributos e uma avaliação geral de cada alternativa dos tomadores de decisão (Belton e Stewart, 2002). Permite que agregue diferentes valores para gerar um único valor que represente o sistema, como fizeram Zalatar e Siriban-Manalang (2018) ao gerar um indicador de implementação da produção enxuta utilizando a MAVT.

4.8. Graph Theoretic Approach (GTA)

A GTA trata-se de uma técnica que reúne a inter-relação entre diferentes variáveis, oferecendo como resultado uma pontuação que representa a avaliação global do sistema em análise (Attri *et al.*, 2014). A técnica é composta basicamente de três elementos: grafos, matrizes e cálculo do permanente, que são moldados de acordo com as variáveis, que podem ser dadas em fatores e subfatores.

Inicialmente é necessária a construção do grafo, que trata de uma representação ilustrativa, e consiste num determinado número de “nós” que representam os números de variáveis ou fatores considerados no modelo, interligados por meio de setas que representarão a relativa influência que um pode exercer no outro ou sobre o sistema. Assim, quanto maior a quantidade de variáveis e inter-relações, mais complexo é o sistema (Sabharwal e Garg, 2013).

Posteriormente, segue-se para a quantificação desse grafo, por meio de uma matriz. A matriz irá gerar um panorama de cada fator (S_1, S_2, \dots, S_n), a partir do momento que considera o desempenho na diagonal principal e a influência de um elemento sobre o outro (Gurumurthy *et al.*, 2013). Basicamente, os elementos interligados pelas diagonais indicam a importância ou contribuição de um elemento sobre o sistema como um todo; já as setas externas, indicam a relativa importância de um elemento sobre o outro (Sabharwal e Garg, 2013). Essas relações serão determinadas, geralmente, por meio de avaliações qualitativas que utilizam variáveis linguísticas (Gurumurthy *et al.*, 2013).

É ainda necessário a determinação de um único valor que quantifique globalmente o sistema em análise. Para isso, usa-se o permanente da função da matriz, que se trata, grosso modo, do cálculo de um determinante considerando todos os valores em módulo (Sabharwal e Garg, 2013). Por fim, o GTA, quando utilizada como uma técnica de avaliação da produção enxuta em uma organização, possibilita a incorporação de interdependências entre diversas práticas enxutas (Narayanamurthy e Gurumurthy, 2016b), permitindo a obtenção de resultados mais precisos do sistema global e de seus subsistemas.

4.9. Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL)

O DEMATEL é baseado no método da visualização de grafos para análise de problemas, a técnica apresenta as relações de interdependência e de causas e efeitos entre determinados fatores, ajudando os pesquisadores a melhor compreender as relações entre os elementos, de forma encontrar melhores maneiras de solucionar os problemas do sistema (Zhou *et al.*, 2011). Geralmente, esta técnica é adequada quando se pretende identificar as possíveis relações entre componentes de um sistema e quando se deseja determinar as relações de causa e efeito e dependência entre os componentes (Seyedhosseini *et al.*, 2011), pois o DEMATEL pode transformar os inúmeros relacionamentos em um modelo estrutural inteligível (Chang *et al.*, 2011).

Observa-se que a técnica segue basicamente as seguintes etapas: inicialmente são identificados os elementos a serem avaliados, avaliam-se a influência entre os elementos, posteriormente elabora-se a matriz média (matriz de relacionamento entre os elementos), procede-se a normalização da matriz média, em seguida a determinação da matriz final (subtração da matriz normalizada pela matriz identidade), por fim, estabelecem-se os valores do grafo, que provê informações de como um fator influencia noutro (Chang *et al.*, 2011; Wu e Lee, 2007).

No contexto da produção enxuta, a técnica possibilita a consideração de todas as influências dos elementos do sistema, classificando-os como dependentes ou independentes de outros, além de hierarquizar e priorizar os elementos de maior valor. Porém, a técnica possui a limitação de não possibilitar a determinação do grau de implementação dos fatores.

4.10. Data Envelopment Analysis (DEA)

O conceito do DEA utiliza um modelo matemático para avaliação de desempenho dos elementos de um sistema. Trata-se de uma técnica de programação linear, que compara as entradas e saídas, determinando a eficiência relativa de uma unidade de tomada de decisão e consequente identificação das melhores práticas (Wan e Chen, 2008). O cálculo da eficiência relativa entre as unidades de tomada de decisão ocorre através do quociente entre o somatório da média ponderada de saídas, e o somatório da média ponderada de entradas, comparando as variáveis de entrada e saída de um conjunto de unidades de tomada de decisões para identificar as melhores práticas entre eles (Wan e Chen, 2008).

Assim, o DEA possibilita que múltiplas entradas e saídas de um sistema sejam consideradas ao mesmo tempo, de maneira que a eficiência é medida em termos de mudanças proporcionais nas variáveis (Ji e Lee, 2010). Para a produção enxuta, o DEA possibilita a avaliação de desempenho por meio do uso de um benchmarking baseado em dados históricos, estabelecendo uma maneira de avaliação distintas das demais expostas nesse estudo.

4.11. Técnicas em síntese

A partir da revisão das técnicas, podem-se destacar os fundamentos e as limitações de cada técnica quanto ao atendimento dos requisitos de avaliação estabelecidos neste estudo. No Quadro 3, é possível observar que as limitações de cada técnica dependem do propósito e do escopo da avaliação. Assim, a escolha de uma técnica não depende de uma qualidade intrínseca, mas da informação que se deseja obter com a avaliação.

Em relação aos requisitos identificados e apresentados na seção 3, nenhuma das técnicas analisadas pôde ser considerada completa no sentido de suprir todos os objetivos em uma avaliação da PE. O Quadro 4 relaciona os requisitos e as técnicas de avaliação, em que são assinalados os requisitos atendidos por cada uma das técnicas. A partir desse quadro, algumas constatações podem ser feitas:

- Apenas as técnicas *fuzzy*, GTA e MAVT são capazes de gerar um único valor *leanness*;

- As únicas que estabelecem uma escala de classificação dos resultados que determinam os níveis de implementação são *fuzzy*, GTA e DEA;
- A técnica DEMATEL é a única capaz de classificar os elementos em práticas-base, intermediárias e fins;
- Quanto à interação entre os elementos, apenas a lógica *fuzzy*, AHP, MAVT e DEA não possibilitam tal característica;
- AHP, ANP e GTA são as únicas técnicas que adequam ao requisito de agrupamento em *bundles*; e
- Apenas a lógica *fuzzy* e as ANN apresentam a característica de auxiliar na redução da imprecisão.

Quadro 3 – Limitações e fundamentos

Técnicas	Fundamentos	Limitações
<i>Fuzzy</i>	Atenuação de subjetividade e imprecisão em variáveis linguísticas a partir da geração de um único valor baseado em números <i>fuzzy</i> .	Não consideração da influência entre fatores, bem como não proporciona a classificação dos elementos.
AHP	Determinação de relações hierárquicas entre alternativas de decisão, combinando múltiplos critérios.	Não consideração de inter-relações e não possibilita a determinação do grau de implementação das práticas.
ANP	Determinação de relações entre elementos de maneira multidirecional, em redes e agrupando dos elementos em <i>bundles</i> .	Não classifica os elementos em termos de práticas base ou práticas fins, além de não gerar um valor único de avaliação.
ANN	Redução de subjetividades e ambiguidades provenientes do processo de avaliação. Identificação das relações entre determinados elementos, permitindo priorização.	Não grupa os elementos em <i>bundles</i> , nem os classifica. Além disso, também não gera um valor único para o <i>leanness</i> .
ISM	Consideração das interações entre os elementos, formando um modelo estrutural.	Não considera nenhum dos outros requisitos identificados neste artigo.
IRP	Avaliação das relações entre os elementos do sistema e ranqueamento que determina a priorização de melhorias.	Não gera um valor <i>leanness</i> , não determina uma escala de classificação, nem agrupa os elementos nem procura reduzir a imprecisão.
MAVT	Ranqueamento de elementos, priorizando aqueles que são mais importantes. Geração de um único valor <i>leanness</i> .	Não se propõe a reduzir imprecisão no julgamento. Não agrupa os elementos, nem os classifica.
GTA	Determinação de um valor global para um sistema, considerando as inter-relações entre os diferentes elementos.	Possibilita margens de ambiguidade, visto que está sujeita a uma avaliação humana.
DEMATEL	Determinação das inter-relações entre elementos de um sistema, considerando relações de causa-efeito, evidenciando a importância relativa de cada um no sistema.	Não gera um valor único de avaliação e somente permite a avaliação comparativa.
DEA	Comparação entre os <i>inputs</i> e <i>outputs</i> , de maneira a determinar a eficiência relativa de uma unidade de tomada de decisão.	Não considera as possíveis relações existentes no sistema, e não gera a determinação de um único valor de <i>leanness</i> .

Quadro 4 – Adequação das técnicas aos requisitos de avaliação

Requisito	Técnica									
	<i>Fuzzy</i>	AHP	ANP	ANN	ISM	IRP	MAVT	GTA	DEMATEL	DEA
Redução da imprecisão	•			•						
Agrupamento dos elementos		•	•					•		
Consideração das interações entre os elementos			•	•	•	•		•	•	
Classificação dos elementos (prática base, meio ou fim)									•	
Escalas de classificação de resultados	•							•		•
Valor único para o <i>leanness</i>	•						•	•		
Identificação dos elementos mais fracos	•	•	•	•		•	•	•	•	•

Ao comparar as técnicas, observa-se a necessidade de realização de estudos que visem suprir as lacunas existentes entre os requisitos de avaliação da produção enxuta, seja por meio do desenvolvimento de novas técnicas, ou integração entre as técnicas citadas. Assim, será possível proporcionar resultados de avaliações mais consistentes e alinhados à realidade do sistema a ser avaliado.

5. Conclusões

A implementação da PE acontece em um processo de longo prazo, em modo de melhoria contínua. Para acompanhar esse processo e definir metas de melhoria, é necessário conhecer o estágio de implementação ou a maturidade da PE em uma empresa. Para isso, consultores e responsáveis internos pela implementação da PE fazem uso de diferentes métodos de avaliação, geralmente baseados na lógica de auditoria, ou mesmo, no simples uso de *checklists*. No entanto, devido à subjetividade envolvida na avaliação e à complexidade inerente ao sistema *lean*, os métodos de avaliação mais simples e intuitivos, embora tenham a vantagem da facilidade de uso, podem apresentar dificuldades em capturar o estágio de implementação da PE (tanto global quanto discriminado em seus subsistemas). Por esse motivo, pesquisadores do mundo inteiro têm procurado propor métodos de avaliação mais sofisticados e, conseqüentemente, mais eficazes. Esses métodos geralmente são compostos de

técnicas de natureza multicriterial que são destinadas à quantificação das variáveis do sistema avaliado.

Com o objetivo de identificar e analisar as principais técnicas quantitativas de avaliação da PE na literatura, este artigo descreve uma revisão sistemática de literatura que selecionou 79 artigos, considerando a perspectiva de avaliação que se preocupa em analisar as práticas enxutas. A análise desses artigos permitiu que se obtivesse uma visão geral da pesquisa na área e, principalmente, permitiu identificar as técnicas quantitativas que têm sido utilizadas. Por meio dessa análise, foi possível extrair os requisitos para a avaliação da produção enxuta que são usualmente argumentados na literatura. Com base nesses requisitos, foi possível reconhecer as limitações de cada técnica, após a análise dos fundamentos das mesmas.

A principal contribuição desse artigo consiste em oferecer um panorama geral das técnicas quantitativas que têm sido utilizadas para a avaliação da PE, de modo a reconhecer o tipo de informação que elas são capazes de fornecer e as limitações que apresentam. Dessa forma, ao desenvolver novos métodos de avaliação, os pesquisadores da área poderão dispor de um aporte teórico para apoiar a escolha das técnicas que comporão o seu método. Por outro lado, a contribuição prática para os usuários da avaliação da PE fica evidenciada pela disseminação de informações sobre as técnicas em que se embasam os métodos de avaliação.

Uma preocupação comum no uso de técnicas quantitativas mais sofisticadas é a dificuldade de utilização na prática, dada à necessidade de treinamento prévio por partes dos usuários. Essa preocupação suscita uma oportunidade de futuras pesquisas no desenvolvimento de *softwares* com interfaces amigáveis em que técnicas quantitativas avançadas operacionalizam as informações coletadas. Assim, os usuários seriam responsáveis somente pelo fornecimento de informações (*inputs* do sistema) em modo de *checklist*, reservando ao sistema a tarefa de análise dos dados fornecidos e geração de *outputs* mais confiáveis que outras abordagens mais rudimentares.

Uma constatação advinda da análise detalhada das técnicas é que nenhuma delas é capaz de atender a todos os requisitos alegados para a avaliação da PE. Por esse motivo é que a literatura tem apresentado métodos de avaliação que utilizam combinação de técnicas, de maneira a aproveitar a complementaridade entre as mesmas. Essa é uma tendência para pesquisas futuras e, ao mesmo tempo, é uma recomendação que se pode extrair deste artigo. De qualquer forma, a literatura ainda revela espaço para o desenvolvimento de novas técnicas,

uma vez que nenhuma das técnicas revisadas aqui foi desenvolvida especificamente para a finalidade a que se propõe o artigo. A evolução das publicações na área demonstra que essa linha de pesquisa ainda tem vida útil longa e provavelmente gerará resultados relevantes nos próximos anos.

Referências

- Agarwal, A., Shankar, R., & Tiwari, M.K. (2006). Modeling the metrics of lean, agile and leagile supply chain: an ANP-based approach. *European Journal of Operational Research*, 173(1): 211–225.
- Akyuz, E., & Celik, E. (2015). A fuzzy DEMATEL method to evaluate critical operational hazards during gas freeing process in crude oil tankers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 38: 243–253.
- Almeida, A.T. (2013). *Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério*. São Paulo: Atlas.
- Amid, A., Ghodsypour, S. H., & O'Brien, C. (2006). Fuzzy multiobjective linear model for supplier selection in a supply chain. *International Journal of Production Economics*, 104(2): 394–407.
- Amid, A., Ghodsypour, S.H., & O'Brien, C. (2011). A weighted max-min model for fuzzy multi-objective supplier selection in a supply chain. *International Journal of Production Economics*, 131(2): 139–145.
- Anvari, A., Zulkifli, N., Sorooshian, S., & Boyerhassani, O. (2014). An integrated design methodology based on the use of group AHP-DEA approach for measuring lean tools efficiency with undesirable output. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(9–12): 2169–2186.
- Anvari, A., Zulkifli, N., & Yusuff, R.M. (2013). A dynamic modeling to measure lean performance within lean attributes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(5–8): 663–677.
- Attri, G.S., & Dev, N. (2014). A graph theoretic approach to evaluate the intensity of barriers in the implementation of total productive maintenance (TPM). *International Journal of Production Research*, 52(10): 3032–3051.
- Attri, R., Dev, N., & Sharma, V. (2013). Interpretive Structural Modelling (ISM) approach: an overview. *Research Journal of Management Sciences*, 2(2): 3–8.
- Azadeh, A., Zarrin, M., Abdollahi, M., Noury, S., & Farahmand, S. (2015). Leanness assessment and optimization by fuzzy cognitive map and multivariate analysis. *Expert Systems with Applications*, 42(15–16): 6050–6064.
- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. New York: Springer.
- Ben Ruben, R., Asokan, P., & Vinodh, S. (2017). Performance evaluation of lean sustainable systems using adaptive neuro fuzzy inference system: a case study. *International Journal of Sustainable Engineering*, 10(3): 158–175.
- Bhasin, S. (2011). Measuring the leanness of an organisation. *International Journal of Lean Six Sigma*, 2(1): 55–74.
- Chang, B., Chang, C. W., & Wu, C. H. (2011). Fuzzy DEMATEL method for developing supplier selection criteria. *Expert Systems with Applications*, 38(3): 1850–1858.
- Chaple, A.P., Narkhede, B.E., Akarte, M. M., & Raut, R. (2018). Interpretive framework for analyzing lean implementation using ISM and IRP modeling. *Benchmarking*, 25(9): 3406–3442.
- Cho, K.T. (2003). Multicriteria decision methods: an attempt to evaluate and unify. *Mathematical and Computer Modelling*, 37: 1099–1119.
- Cil, I., & Turkan, Y.S. (2013). An ANP-based assessment model for lean enterprise transformation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(5–8): 1113–1130.
- Cocca, P., Marciano, F., Alberti, M., & Schiavini, D. (2019). Leanness measurement methods in manufacturing organisations: a systematic review. *International Journal of Production Research*, 57(15–16): 5103–5118.

- Danese, P., Manfè, V., & Romano, P. (2018). A systematic literature review on recent lean research: state-of-the-art and future directions. *International Journal of Management Reviews*, 20(2): 579–605.
- Doumpos, M., & Zopounidis, C. (2004). *Multicriteria decision aid classification methods*. New York: Kluwer Academic Publishers.
- Dyer, J.S., Fishburn, P.C., Steuer, R.E., & Wallenius, J. (2013). Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: the next ten years. *Management Science*, 38(5): 645–654.
- Furlan, A., Vinelli, A., & Pont, G.D. (2011). Complementarity and lean manufacturing bundles: An empirical analysis. *International Journal of Operations and Production Management*, 31(8): 835–850.
- Greco, S., Ehrgott, M., & Figueira, J.R. (2005). *Multiple criteria decision analysis state of the art surveys*. New York: Springer.
- Gurumurthy, A., Mazumdar, P., & Muthusubramanian, S. (2013). Graph theoretic approach for analysing the readiness of an organisation for adapting lean thinking: a case study. *International Journal of Organizational Analysis*, 21(3): 396–427.
- Haykin, S. (1999). *Redes neurais: princípios e prática*. Porto Alegre: Bookman.
- Heinrich, G., Basson, L., Cohen, B., Howells, M., & Petrie, J. (2007). Ranking and selection of power expansion alternatives for multiple objectives under uncertainty. *Energy*, 32(12): 2350–2369.
- Jansen, S.J.T., Coolen, H., & Goetgeluk, R. (2011). *The measurement and analysis of housing preference and choice*. New York: Springer.
- Ji, Y., & Lee, C. (2010). Data envelopment analysis. *The Stata Journal*, 10(2): 267–280.
- Kamruzzaman, J., Begg, R.K., & Sarker, R.A. (2006). *Artificial neural networks in finance and manufacturing*. Hershey: Idea Group Publishing.
- Karlsson, C., & Åhlström, P. (1996). Assessing changes towards lean. *International Journal of Operations & Production Management*, 16(2): 24–41.
- Lacerda, R.T. de O., Ensslin, L., & Ensslin, S.R. (2012). Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. *Gestão & Produção*, 19(1): 59–78.
- Lucato, W.C., Calarge, F.A., Loureiro Junior, M., & Calado, R.D. (2014). Performance evaluation of lean manufacturing implementation in Brazil. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 63(5): 529–549.
- Madeira, A.G., Cardoso, M.M.H., Belderrain, M.C.N., Correia, A.R., & Schwanz, S.H. (2012). Multicriteria and multivariate analysis for port performance evaluation. *International Journal of Production Economics*, 140(1): 450–456.
- Marodin, G.A., & Saurin, T.A. (2013). Implementing lean production systems: research areas and opportunities for future studies. *International Journal of Production Research*, 51(22): 6663–6680.
- Matawale, C.R., Datta, S., & Mahapatra, S. S. (2014). Lean metric appraisal: exploration of grey numbers set theory. *Grey Systems: Theory and Application*, 4(3): 400–425.
- Mhatre, T.N., Thakkar, J.J., & Maiti, J. (2017). Modelling critical risk factors for Indian construction project using interpretive ranking process (IRP) and system dynamics (SD). *International Journal of Quality and Reliability Management*, 34(9): 1451–1473.
- Narayanamurthy, G., & Gurumurthy, A. (2016a). Leanness assessment: a literature review. *International Journal of Operations & Production Management*, 36(10): 1115–1160.
- Narayanamurthy, G., & Gurumurthy, A. (2016b). Systemic leanness: an index for facilitating continuous improvement of lean implementation. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 27(8): 1014–1053.
- Nasab, H.H., Bioki, T.A., & Zare, H.K. (2012). Finding a probabilistic approach to analyze lean manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 29: 73–81.
- Opricovic, S., & Tzeng, G.H. (2003). Defuzzification within a multicriteria decision model. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 11(5): 635–652.

- Poduval, P.S., Pramod, V.R., & Jagathy Raj, V.P. (2015). Interpretive structural modeling (ISM) and its application in analyzing factors inhibiting implementation of total productive maintenance (TPM). *International Journal of Quality and Reliability Management*, 32(3): 308–331.
- Saaty, T.L. (2008). The analytic network process. *Iranian Journal of Operations Research*, 1(1): 1–27.
- Saaty, T.L., & Vargas, L.G. (2006). *Decision making with the analytic network process: economic, political, social and technological applications with benefits, opportunities, costs and risks*. New York: Springer.
- Sabharwal, S., & Garg, S. (2013). Determining cost effectiveness index of remanufacturing: a graph theoretic approach. *International Journal of Production Economics*, 144(2): 521–532.
- Saleeshya, P.G., & Binu, M. (2019). A neuro-fuzzy hybrid model for assessing leanness of manufacturing systems. *International Journal of Lean Six Sigma*, 10(1): 473–499.
- Saurin, T.A., Marodin, G.A., & Ribeiro, J.L.D. (2011). A framework for assessing the use of lean production practices in manufacturing cells. *International Journal of Production Research*, 49(11): 3211–3230.
- Scherrer-Rathje, M., Boyle, T.A., & Deflorin, P. (2009). Lean, take two! Reflections from the second attempt at lean implementation. *Business Horizons*, 52(1): 79–88.
- Seyedhosseini, S.M., Taleghani, A.E., Bakhsha, A., & Partovi, S. (2011). Extracting leanness criteria by employing the concept of Balanced Scorecard. *Expert Systems with Applications*, 38(8): 10454–10461.
- Shah, R., & Ward, P.T. (2003). Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance. *Journal of Operations Management*, 21(2): 129–149.
- Singh, M., Sachdeva, A., & Bhardwaj, A. (2014). An interpretive structural modelling approach for analysing barriers in total productive maintenance implementation. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 16(4): 433.
- Sushil. (2012). Interpreting the interpretive structural model. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 13(2): 87–106.
- Sushil. (2009). Interpretive ranking process. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 10(4): 1–10.
- Susilawati, A., Tan, J., Bell, D., & Sarwar, M. (2015). Fuzzy logic based method to measure degree of lean activity in manufacturing industry. *Journal of Manufacturing Systems*, 34: 1–11.
- Tekez, E.K., & Taşdeviren, G. (2020). Measuring the influence values of lean criteria on leanness. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(7): 1391–1416.
- Thakkar, J., Deshmukh, S.G., Gupta, A.D., & Shankar, R. (2006). Development of a balanced scorecard: an integrated approach of Interpretive Structural Modeling (ISM) and Analytic Network Process (ANP). *International Journal of Productivity and Performance Management*, 56(1): 25–59.
- Thakkar, J., Kanda, A., & Deshmukh, S. (2008). Interpretive structural modeling (ISM) of IT-enablers for Indian manufacturing SMEs. *Information Management & Computer Security*, 16(2): 113–136.
- Thomas, T., Saleeshya, P.G., & Kumar, P.H. (2017). A combined AHP and ISM-based model to assess the leanness of a manufacturing company. *International Journal of Business Performance Management*, 18(4), 403–426.
- Tiwari, R.K., & Tiwari, J.K. (2018). Evaluating lean performance of indian small and medium sized enterprises in automotive sector. *Open Engineering*, 8(1): 293–306.
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14(3): 207–222.
- Vaidya, O.S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: an overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169(1): 1–29.
- Vargas, L.G. (1990). An overview of the analytic hierarchy process and its applications. *European Journal of Operational Research*, 48(1): 2–8.
- Vimal, K.E.K., & Vinodh, S. (2013). Application of artificial neural network for fuzzy logic based leanness assessment. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 24(2): 274–292.
- Vinodh, S., & Chintha, S.K. (2011). Leanness assessment using multi-grade fuzzy approach. *International Journal of Production Research*, 49(2): 431–445.

- Vinodh, S., & Kumar, C.D. (2012). Development of computerized decision support system for leanness assessment using multi grade fuzzy approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 23(4): 503–516.
- Vinodh, S., Shivraman, K.R., & Viswesh, S. (2011). AHP-based lean concept selection in a manufacturing organization. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 23(1): 124–136.
- Vinodh, S., & Vimal, K.E.K. (2012). Thirty criteria based leanness assessment using fuzzy logic approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(9–12): 1185–1195.
- Wan, H.D., & Chen, F.F. (2008). A leanness measure of manufacturing systems for quantifying impacts of lean initiatives. *International Journal of Production Research*, 46(23): 6567–6584.
- Watson, R.H. (1978). Interpretive structural modeling - a tool for technology assessment? *Technological Forecasting and Social Change*, 11(2): 165–185.
- Webster, J., & Watson, R. (2002). Analyzing the past to prepare for the future: writing a literature review. *MIS Quarterly - Management Information Systems*, 26(2): 13-23.
- Wong, W.P., Ignatius, J., & Soh, K.L. (2014). What is the leanness level of your organisation in lean transformation implementation? An integrated lean index using ANP approach. *Production Planning and Control*, 25(4): 273–287.
- Wu, W.W., & Lee, Y.T. (2007). Developing global managers' competencies using the fuzzy DEMATEL method. *Expert Systems with Applications*, 32(2): 499–507.
- Yadav, V., Khandelwal, G., Jain, R., & Mittal, M.L. (2019). Development of leanness index for SMEs. *International Journal of Lean Six Sigma*, 10(1): 397–410.
- Zalatar, W.F., & Siriban-Manalang, A.B.D. (2018). Development of a composite lean index to measure lean implementation in Philippine manufacturing companies. *DLSU Business and Economics Review*, 28(1): 176–188.
- Zhou, Q., Huang, W., & Zhang, Y. (2011). Identifying critical success factors in emergency management using a fuzzy DEMATEL method. *Safety Science*, 49(2): 243–252.