

AValiação DA Maturidade Tecnológica Industrial Brasileira NO CONTEXTO DA Indústria 4.0

ASSESSMENT OF BRAZILIAN INDUSTRIAL TECHNOLOGICAL MATURITY IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0

Edson Velloso dos Santos Junior*  E-mail: edson.velloso@gmail.com

Delmo Alves de Moura**  E-mail: delmo.moura@ufabc.edu.br

*Confederação Nacional das Indústrias (CNI) Brasília, DF, Brasil.

**Universidade Federal do ABC (UFABC), Santo André, SP, Brasil.

Resumo: O objetivo deste estudo foi avaliar o relacionamento entre as variáveis apuradas pelo questionário SENAI em sua plataforma de mensuração da maturidade industrial. O estudo foi dividido em duas fases. A primeira exploratória, a partir da adoção das técnicas de Análise das Correspondências Múltiplas ACM e, a segunda prospectiva, a partir do uso de modelos multinominais. A variável de interesse foi o grau de maturidade das empresas estimado pela plataforma SENAI. Na Análise das correspondências foi possível constatar o quanto essas empresas estão longe de alcançar essa meta. Nos mapas perceptuais foi possível observar que a variável de interesse separa bem as empresas em dois grupos, mas há uma assimetria considerável entre as demais. Como ferramenta de análise, foi possível estimar os ganhos com o uso incremental das variáveis do modelo na jornada para a Indústria 4.0. Em seguida, como ferramenta de gestão, foi possível estimar o hiato de inovação ao calcular a probabilidade de sucesso para as empresas proativas nessa jornada e para as demais. Por fim, e como um achado oportunista, seu uso como calculadora onde foi possível mensurar o risco associado as decisões tomadas pelos agentes interessados na jornada para I4.0.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Maturidade Tecnológica. Modelos Generalizados.

Abstract: The objective of this study was to evaluate the relationship between the variables determined by the SENAI questionnaire in its industrial maturity measurement platform. The study was divided into two phases. The first is exploratory, based on the adoption of MCA, Multiple Correspondence Analysis techniques, and the second is prospective, based on the use of multinominal models. The variable of interest was the degree of maturity of companies estimated by the SENAI platform. In the correspondence analysis, it was possible to see how far these companies are from achieving this goal. In the perceptual maps it was possible to observe that the variable of interest clearly separates the companies into two groups, but there is considerable asymmetry between the others. As an analysis tool, it was possible to estimate the gains with the incremental use of the model's variables in the journey to Industry 4.0. Then, as a management tool, it was possible to estimate the innovation gap by calculating the probability of success for proactive companies on this journey and for others. Finally, and as an opportunistic finding, its use as a calculator where it was possible to measure the risk associated with the decisions taken by agents interested in the journey to I4.0.

Keywords: Industry 4.0. Technological Maturity. Generalized Models.

1 INTRODUÇÃO

A digitalização, a integração de sistemas, a conectividade entre máquinas, dispositivos, sensores, aplicativos, com uma ampla gama de dados gerados, tem sido uma realidade em várias indústrias mundialmente e com isto, busca-se aumentar a produtividade na manufatura e a redução de paradas desnecessárias de máquinas e equipamentos, com foco na manutenção preditiva, estimando assim, quando ocorrerá a falha em equipamentos. Para isto, a Indústria 4.0 (I4.0) é uma aliada notória das empresas, para se atingir o objetivo de maior controle nas operações de manufatura, mais informações acuradas das máquinas e equipamentos, assim como dos processos operacionais, visando um sistema integrado, com o uso de tecnologias digitais. Assim, a não adoção das tecnologias digitais pode tornar as empresas menos competitivas no mercado.

Em 2016, o uso de tecnologias digitais na indústria brasileira ainda era pouco difundido. Segundo estudo realizado pela Confederação Nacional das Indústrias (CNI, 2016), junto a 2.225 empresas, menos da metade delas fazia uso dessas tecnologias com foco em melhorar o processo de produção e aumentar a produtividade.

O alto custo na implementação desse ambiente, fruto da obsolescência das máquinas utilizada na produção, aliadas as dificuldades de acesso à informação, ausência de mão de obra especializada e disponibilização de linhas de investimento específica contribuíram para o atraso tecnológico e, como consequência, o efetivo aumento da digitalização no Brasil (CNI, 2020; CNI 2022).

Em 2021, passados cinco anos do primeiro levantamento realizado, a CNI foi a campo com nova pesquisa e constatou que o uso de tecnologias digitais aumentou na indústria brasileira, mas ainda tímida para o desafio que precisa ser enfrentado. Nesse período, o foco principal das tecnologias utilizadas ainda estava na melhoria dos processos produtivos. O custo de implementação das novas tecnologias, alinhadas a falta de conhecimento sobre elas (barreiras internas), a falta de trabalhador qualificado e a infraestrutura de comunicação (barreiras externas), comprometem efetivamente a sua evolução (Sarbu, 2022).

Não há como as empresas brasileiras não entrarem de vez na digitalização de seus processos, sob pena de serem excluídas das grandes cadeias globais de valor.

Entender esse fenômeno, contribui para o desenvolvimento de um modelo preditivo que permita as empresas avaliarem o seu estágio tecnológico atual e identificar aquelas que tem mais oportunidades de trazerem um melhor retorno para as organizações.

Várias metodologias de avaliação do nível de maturidade das empresas, frente aos desafios da Indústria 4.0 foram desenvolvidos e vem sendo aplicadas. Elhusseing *et al.* (2023) destaca que um modelo de maturidade é uma ferramenta útil para medir, a partir de um conjunto de aspectos e capacidades, o atual estágio de desenvolvimento de uma organização e identificar possíveis melhorias. Termos como prontidão, *roadmap*, *frameworks*, modelos de avaliação e índice de maturidade foram usados para referir como as empresas (PMEs/Grandes) poderiam medir seu estado atual e implementar as tecnologias da I4.0 (Jesus; Lima, 2020).

Essa iniciativa também foi observada no Brasil. O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos CGEE (2022) fez um levantamento sobre o estado dos modelos de maturidade bem como, as metodologias desenvolvidas.

A literatura sobre modelos de maturidade tomou impulso a partir de 2016, com a publicação de vários textos acadêmicos sobre o assunto. Segundo apurou o CGEE (2022), em uma busca na *web* em 2020, mais de 400 artigos sobre o tema foram publicados.

Em sua grande maioria, os modelos utilizados para avaliar o nível de maturidade das empresas em relação a I4.0 baseiam-se em questionários, com questões qualitativas, que são, posteriormente, agrupadas segundo uma estrutura de ponderação arbitrária. Ao final, as questões são consolidadas por blocos temáticos e uma nota é produzida e confrontada com uma tabela de referência construída.

Como consequência, não há padronização de conceitos, bem como uma metodologia padrão que possa ser comparada entre países e, até mesmo, entre os setores que compõem a economia do país.

O estudo de Akdil, Ustundag e Cevikcan (2018) propôs uma normatização dos aspectos que devem ser considerados num modelo de maturidade, que são: dimensões e áreas, critério de avaliação do nível/estágio, definição das métricas a serem consideradas nível/estágio de maturidade e, por fim, orientações com base no

nível de conhecimento. Para isso, sugere-se como instrumento a aplicação de um questionário específico.

Tal iniciativa foi seguida por várias instituições responsáveis por esse tipo de monitoramento. Elhusseiny e Crispin (2022) promoveram uma revisão da literatura no período de 2015 a 2022. As principais conclusões desse levantamento apontaram que a maioria dos estudos se concentram em empresas grandes/multinacionais, do setor industrial, o *smart logistics* e/ou integração da cadeia de suprimentos quase foi esquecida, poucos estudos, com requisitos específicos para PME (Pequenas e Médias Empresas) foram identificados e faltaram modelos com soluções para superar as restrições financeiras das PMEs, especialmente em países em desenvolvimento. Destaca-se também que as principais barreiras para as PMEs do setor industrial foram: finanças, disponibilidade de recursos técnicos, participação/adesão dos funcionários, especialização de produtos, alianças, cultura organizacional e colaboração.

Mas, ainda assim, algumas questões se faziam presente. Será que todas as empresas, dos vários setores da economia, dispõem da infraestrutura necessária para esse salto tecnológico? As barreiras identificadas foram superadas?

O objetivo inicial desse estudo é exploratório, buscou-se avaliar o padrão de relacionamento entre as variáveis pesquisadas e sua aderência em direção a maturidade tecnológica e, em seguida, avaliou-se a relevância de cada variável pesquisada com o objetivo de tornar o questionário mais objetivo. Por fim, buscou-se desenvolver um modelo preditivo que auxilie os gestores das empresas, os agentes financeiros e as entidades de representação na sua tomada de decisões mais assertivas.

2 DESENVOLVIMENTO

O modelo de maturidade industrial proposto pelo SENAI (Senai, 2021) se baseia no modelo desenvolvido pela Academia Alemã de Ciência e Engenharia, a ACATECH (Schuh *et al.*, 2020). O objetivo é oferecer às empresas industriais, de todos os portes e setores, a oportunidade de identificar seu nível de maturidade em relação à adesão de tecnologias digitais (Tsakaleroua; Akhmadia, 2021).

Um *site web* público foi desenvolvido para que as empresas possam avaliar o seu grau de maturidade. Nessa plataforma, elas respondem a um questionário

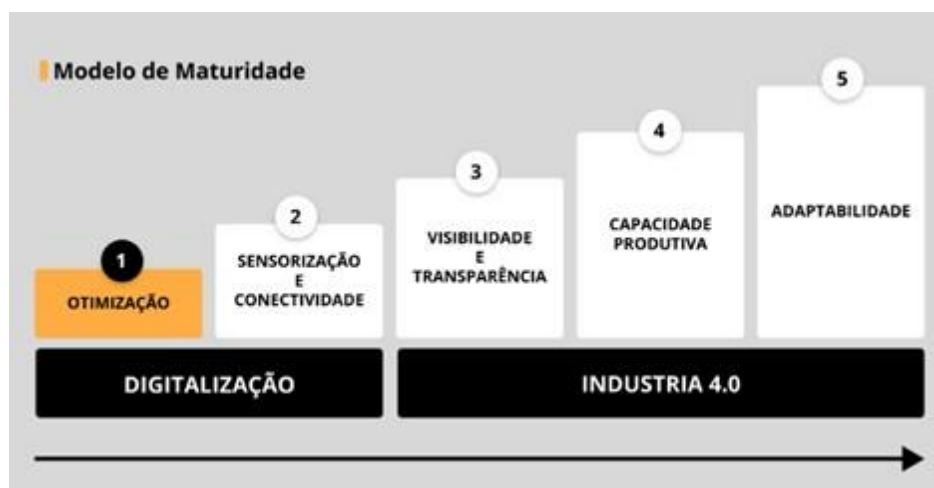
Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 24, n. 1, e-5156, 2024.

(SENAI, 2020) elaborado com bases na metodologia desenvolvida pela ALCATECH (Schu *et al.*, 2020) da Alemanha.

O questionário é dividido em 4 blocos: Estrutura e Organização, Manufatura e Cadeia de Suprimentos, Modelos de Negócio, Produtos/Serviços e Cultura e Pessoas. Em cada um dos blocos são apresentadas questões de resposta única e múltiplas, onde cada item de resposta recebe uma ponderação arbitrária.

Ao concluir o levantamento, um escore é atribuído a empresa e confrontado com uma escala pré-definida que determina o atual estágio de maturidade tecnológica da empresa, ou seja, ainda na fase de digitalização ou já na implantação das tecnologias da Indústria 4.0, conforme Figura 1.

Figura 1 – Perfil das empresas na jornada para a Indústria 4.0



Fonte: SENAI: <https://www.senai40.com.br>.

O índice de maturidade da indústria 4.0 é obtido a partir da média aritmética simples dos escores obtidos para cada um dos blocos. Após calculado, o resultado é confrontado a uma tabela que informa o atual nível de maturidade da empresa.

Obtenção do Índice de maturidade + pessoas:

$$I_{maturidade+pessoas} = \frac{(I_{EO} + I_{MCS} + I_{MNPS} + I_{CP})}{4} \quad (1)$$

Onde:

I_{EO} : Indicador de estratégia e organização

I_{MCS} : Indicador de manufatura e cadeia de suprimentos

I_{MNPS} : Indicador de modelo de negócio, produtos e serviços

I_{CP} : Indicador de cultura e pessoas

Um outro fator a ser mensurado é o estágio de desenvolvimento da empresa na Indústria 4.0. Para a identificação do estágio atual de desenvolvimento, o Índice de maturidade calculado é confrontado com a escala a seguir:

$$\text{Est\u00e1gio}_{\text{Digitaliza\u00e7\u00e3o}} \begin{cases} \text{Otimiza\u00e7\u00e3o, se } 0 < I_{\text{maturidade+pessoas}} < 1,90 \\ \text{Sensoriza\u00e7\u00e3o e Conectividade, se } 2,0 < I_{\text{maturidade+pessoas}} < 2,90 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{Est\u00e1gio}_{\text{Ind\u00fas\u00e7\u00e1ria 4.0}} \begin{cases} \text{Visibilidade e Transpar\u00eancia} \rightarrow \text{se } 3,0 < I_{\text{maturidade+pessoas}} < 3,90 \\ \text{Capacidade Preditiva} \rightarrow 4,0 < I_{\text{maturidade+pessoas}} < 4,90 \\ \text{Flexibilidade e Adaptabilidade} \rightarrow 5,0 < I_{\text{maturidade+pessoas}} < 5,90 \end{cases} \quad (3)$$

Nos \u00faltimos anos, v\u00e1rios estudos foram realizados sobre as metodologias utilizadas, identificando vantagens e desvantagens do processo de avalia\u00e7\u00e3o da maturidade tecnol\u00f3gica das empresas (Dogeaa; Stolta, 2021).

O CGEE (2022) promoveu uma grande revis\u00e3o sobre os modelos para avalia\u00e7\u00e3o do n\u00edvel de maturidade das empresas em rela\u00e7\u00e3o a Ind\u00fas\u00e7\u00e1ria 4.0. Sobre o modelo proposto pelo SENAI, ele destaca como ponto positivo a utiliza\u00e7\u00e3o de quest\u00f5es baseadas na escala Likert, que permite a sele\u00e7\u00e3o de m\u00faltiplas op\u00e7\u00f5es ou sele\u00e7\u00e3o \u00fanica e, como negativo, a assimetria nas op\u00e7\u00f5es de resposta que podem tornar o c\u00e1lculo do indicador nos blocos, mais complexa.

Neste estudo utilizou-se o banco de dados com a participa\u00e7\u00e3o de mais de 3.000 empresas (todas desidentificadas, Lei do sigilo) que participaram da plataforma SENAI, desde 2019. Foram observadas e tratadas, as seguintes situa\u00e7\u00f5es:

- Foram consideradas apenas as vari\u00e1veis atuais e descartados os registros anteriores;
- Apenas empresas industriais foram consideradas, as demais exclu\u00eddas;

- Foram eliminadas as duplicidades;
- Para evitar a situação de *zero-inflated* algumas variáveis foram reagrupadas (como o tema I4.0 é recente no Brasil, algumas das variáveis apresentaram baixo nível de respostas. Nessa situação, as variáveis foram dicotomizadas e/ou agrupadas a outras).

Resolvidas essas questões, a amostra efetiva para análise contou com a participação e 1.082 empresas industriais, respondentes em 2023 e 111 variáveis multinominais, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Tabelas de contingência das variáveis de corte

Estágio tecnológico	Porte da empresa				Total
	Grande	Média	Pequena	Micro	
Digitalização (0)	83 110 8,7% 66,9%	277 281 28,9% 87,4%	302 289 31,5% 92,6%	296 279 30,9% 94%	958 958 100% 85,5%
Indústria 4.0 (1)	41 14 33,1% 33,1%	40 36 32,3% 12,6%	24 37 19,4% 7,4%	19 36 15,3% 6%	124 124 100% 11,5%
Total	127 124 11,5% 100%	317 317 29,3% 100%	326 326 30,1% 100%	315 315 29,1% 100%	1.082 1.082 100% 100%

$\chi^2 = 72,002 - df=3 - Cramer's V=0,258 - p=0,000$

Fonte: Elaborada pelos autores.

Nota: 1 - No estágio tecnológico as empresas são classificadas, segundo o Indicador de Maturidade SENAI em dois grupos: Digitalização (0) – as empresas ainda se encontram na fase de otimização de processos, implantação de sensores e conectividade na planta produtiva e, Indústria 4.0 (1) - as empresas já passaram pela fase de digitalização e atualmente se preocupam em dar visibilidade e transparência a seus processos, implementar processos preditivos para monitoramento e controle da produção e estão em constante processo de adaptabilidade ao seu ecossistema.

2 – Em verde, valores esperados.

Conforme evidenciado na Tabela 1, é possível observar que a proporção de empresas que ainda se encontram na fase inicial da digitalização é significativamente superior àquelas que já estão imersas no contexto da Indústria 4.0, na proporção de 9 para 1.

2.1 Metodologia

Para realizar este estudo, algumas técnicas foram utilizadas. A Análise das Correspondências Múltiplas (ACM), que é uma técnica não supervisionada de *Machine Learning* foi uma delas. Caracteriza-se pela redução dimensional das variáveis consideradas e elaboração do mapa perceptual de relacionamento entre elas (Greenacre; Blasius, 1994; Fávero; Belfiore, 2022). Um dos principais insumos desse método é a tabela de contingência. Ela permite identificar padrões e relações estatisticamente significativas entre as categorias de interesse (Batóg; Batóg, 2016).

Outra técnica utilizada foi a de Modelos Lineares Generalizados, uma técnica supervisionada de *Machine Learning*, também conhecida como Regressão Logística Multinomial, úteis para resolver problemas de classificação com mais de duas classes (Hair *et al.*, 2009). A estrutura do modelo é dividida em quatro partes: modelos de regressão, características da variável dependente, distribuição de probabilidade associadas e Função de Ligação Canônica (τ).

Os Modelos Logísticos compreendem os modelos de regressão binária e multinomial. Nesses modelos, a variável de resposta, ou classe, é categórica com duas ou mais de duas categorias. A Regressão Logística Multinomial é uma extensão da regressão logística binária (Agresti, 1994).

Modelo logístico binomial, utilizado para explicar ou prever a probabilidade de ocorrência de determinado evento em função de uma ou mais variáveis explicativas. Modelo logístico multinominais MLM - Extensão dos Modelos Logísticos binomiais incorporam a estrutura hierárquica de dados multinominais. Esses modelos são úteis quando os dados estão agrupados em diferentes níveis. Os MLMs permitem que os parâmetros variem entre grupos, capturando a variabilidade nas respostas e fornecendo uma compreensão mais abrangente das relações entre as variáveis independentes e a variável de resposta multinomial (Brzezińska, 2018).

Para a seleção do modelo, algumas métricas foram utilizadas, são elas:

- Indicadores Log-Like (*Log-Likelihood*) – métrica utilizada para medir o quanto um modelo estatístico se ajusta aos dados.
- AIC (*Akaike Information Criterion*) – usado para avaliar a qualidade de um modelo estatístico em relação a outros modelos alternativos.

- Matriz de confusão - ferramenta utilizada para a avaliação do desempenho de um modelo de classificação.
- Acurácia - proporção de classificações corretas em relação ao total de observações para valores estimados pelo modelo.
- Curvas ROC – Gráfico do desempenho de um modelo de classificação binária.

Se fez necessário a aplicação da transformação das variáveis em *dummies*. Variáveis *dummy* são utilizadas na análise estatística para representar categorias ou grupos de variáveis categóricas como números. Isso permite que modelos matemáticos sejam aplicados a essas variáveis. São úteis também para evitar suposições inadequadas e interpretar coeficientes de forma significativa em modelos de regressão, garantindo flexibilidade ao lidar com diferentes categorias e níveis.

Previsões - As previsões foram obtidas a partir da função `predic()`, e consiste em:

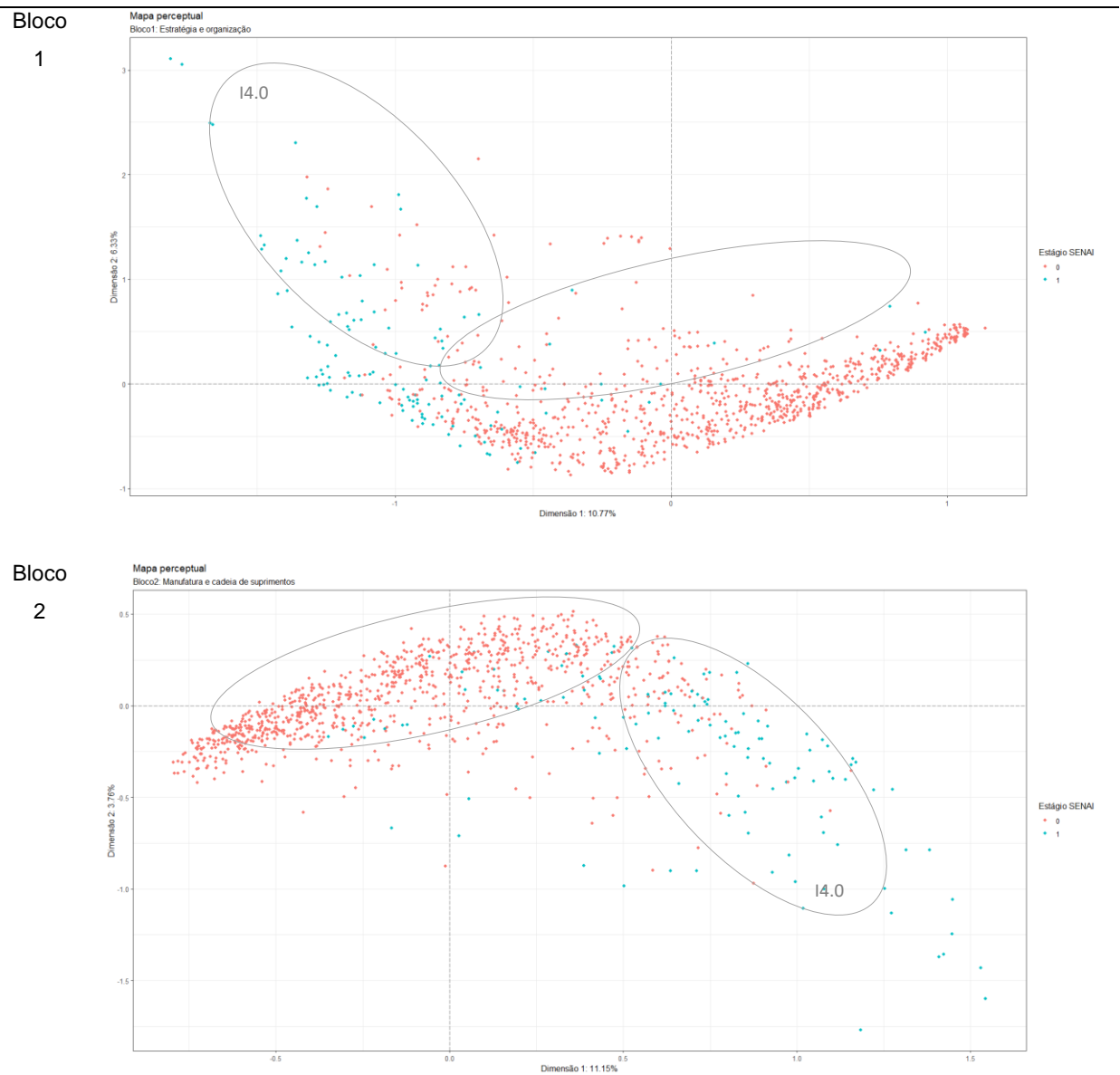
$$P(Y_i = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \dots + \beta_4 Z_{1i} + \beta_5 Z_{2i} + b_{j[i]})}} \quad (4)$$

2.2 Resultados e Discussões

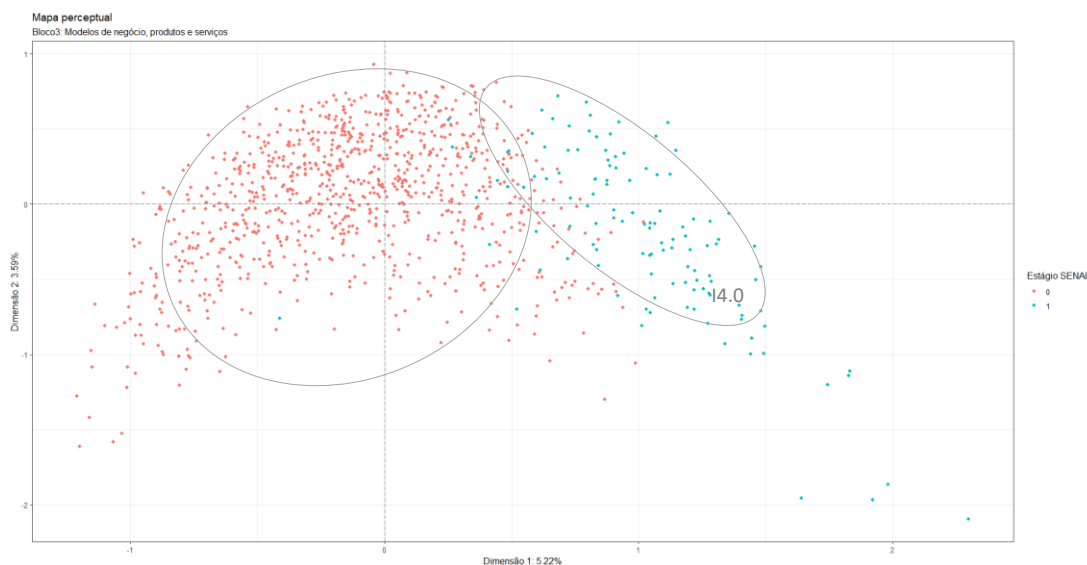
Toda a análise foi realizada preservando os blocos temáticos estabelecidos no questionário de avaliação. O estudo foi dividido em duas partes. A primeira, focada na aplicação da técnica de ACM (Análise das Correspondências Múltiplas), para abordagem visual das variáveis consideradas e, a segunda, baseada na aplicação de Modelos Logit multinomias, para estimar um modelo adequado aos dados.

Cada um dos blocos temáticos considerados (Bloco 1, 2, 3 e 4) foram analisados e seus mapas perceptuais gerados. Em todos, a nuvem de pontos se apresenta segundo uma forma parabólica, reflexo da natureza multinomial das variáveis consideradas (Fávero; Belfiore, 2022, p. 504), conforme mostra a Figura 2 abaixo e a Tabela 2.

Figura 2 – Mapa perceptual todas as variáveis e sumário da inércia



Bloco
3



Bloco
4

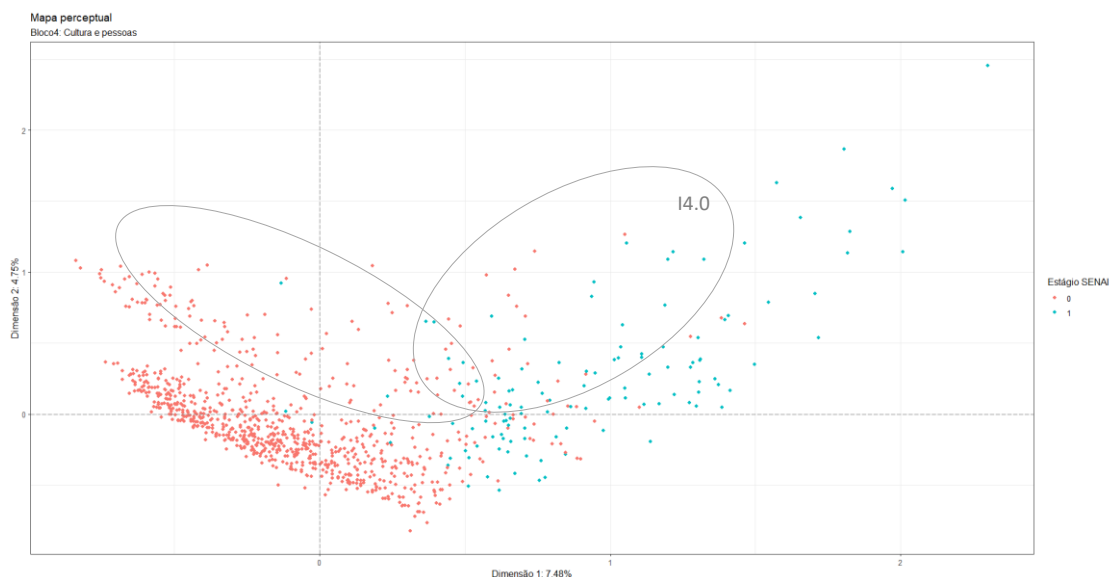


Tabela 2 - Sumário da Inércia

Indicadores	Bloco 1		Bloco 2		Bloco 3		Bloco 4	
Inércia total	4,14		2,14		6,20		3,44	
Dimensões								
Total	91	100%	122	100%	62	100%	53	100%
5 selecionadas	5	28%	5	22%	5	17%	5	21%
2 selecionadas	2	17%	2	15%	2	9%	2	12%

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com base nesses resultados têm-se que:

- O Bloco 3 apresenta a maior inércia total (6,2), ou seja, melhor se ajustou e capturou uma parte maior da variabilidade dos dados.

- Nos Blocos 1, 2 e 4, as cinco primeiras dimensões consideradas explicam um percentual significativo da inércia total, acima dos 20% recomendados, o que é positivo. O pior desempenho fica por conta do Bloco 3 (17%), ou seja, é necessário a inclusão de outras dimensões, as cinco selecionadas.

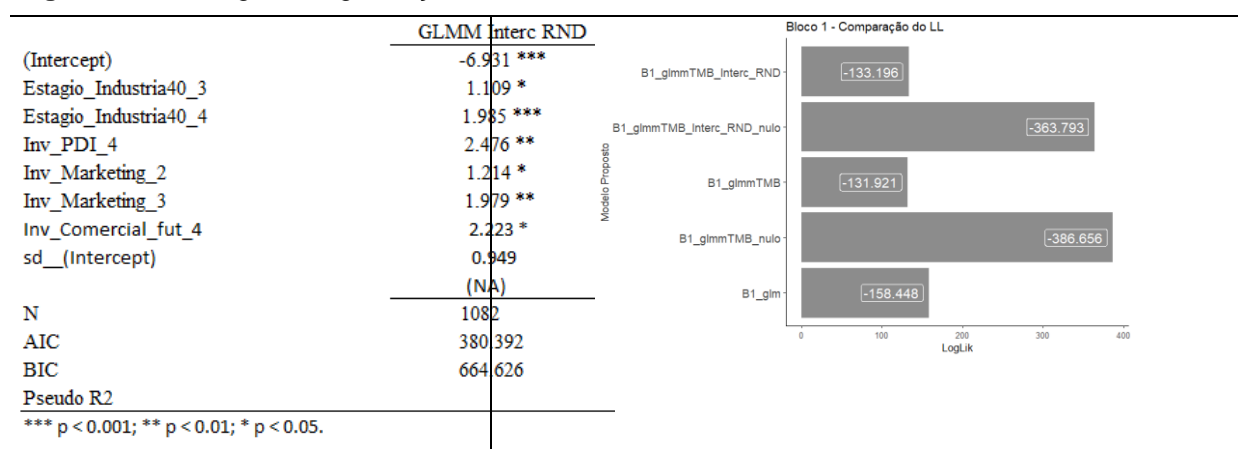
O desempenho do Bloco 3 deve estar associado a natureza das variáveis consideradas em sua formulação, todas com a mesma estrutura. O mesmo não se observa nos demais grupos. Há variáveis de todos os tipos, o que certamente aumenta a variabilidade total e, por consequência, a inércia total calculada.

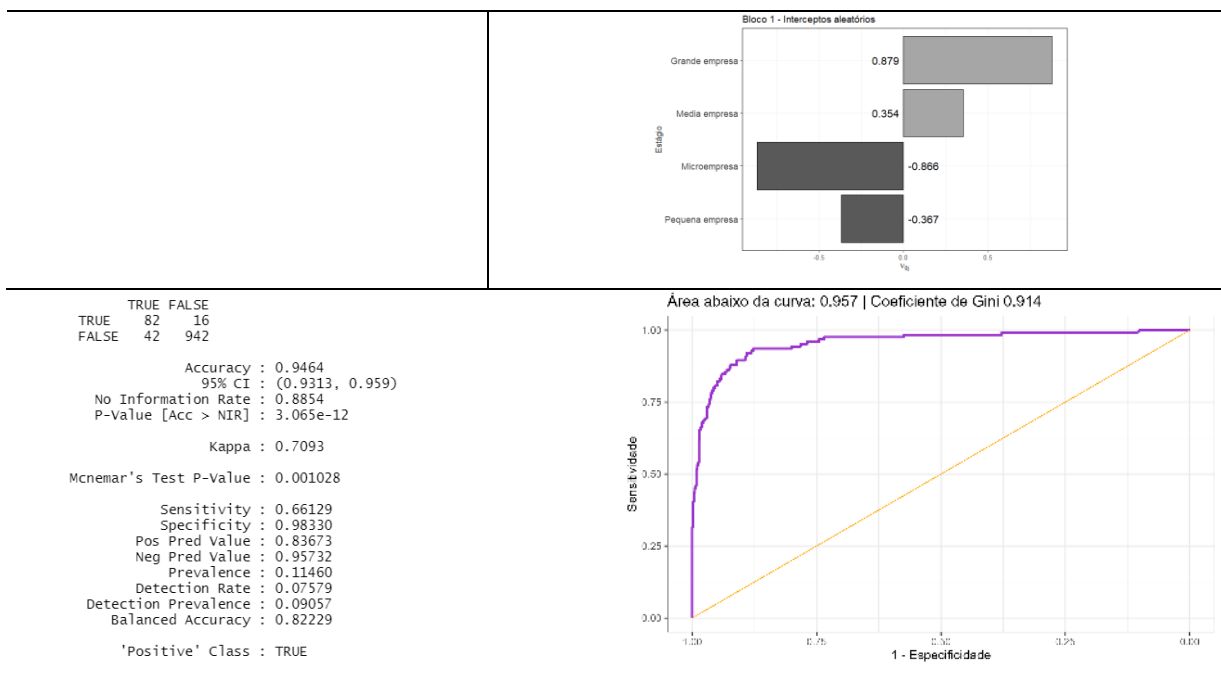
Esse resultado, aliado a assimetria das variáveis ao redor da variável de interesse, reforça a necessidade de se rever as variáveis consideradas e suas categorias de resposta.

2.3 Aplicação de Modelos Logit

Em cada um dos quatro blocos, todas as variáveis foram previamente damizadas e sua estrutura avaliada a luz dos modelos considerados. Como a variável dependente é categórica, assim como todas as preditivas, a análise seguiu os modelos multinomiais. Os dados foram ajustados considerando os modelos: GLM (nulo e completo), GLMM (nulo, interc. Aleat. Nulo, intercept. Aleatório). As estimativas de log-likelihood e AIC foram utilizadas para a determinação do melhor modelo, conforme Figura 3.

Figura 3 – Estratégias e organização – Modelo estimado





Fonte: Elaborado pelos autores.

O modelo selecionado foi glmmTMB Intercepto RND. Observa-se que poucos grupos de variáveis analisadas possuem categorias que contribuem fortemente (estatisticamente significativas) para a jornada rumo a I4.0.

Dessa forma, e como roteiro básico, observa-se que o sucesso foi observado nas empresas que:

- Já desenvolveram a estratégia para a I4.0 e estão em fase de implantação, ou seja, saíram da inércia. Possuem indicadores que são analisados estrategicamente na empresa de forma integrada com as áreas. Possuem um alto envolvimento da liderança. Realizaram um forte investimento em P&D&I. Investiram em Marketing e planejam investir fortemente na área comercial, conforme as categorias que são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Estratégias e organização - Jornada à I4.0

Categorias	Porte das empresas								Todas	
	Grandes		Médias		Pequenas		Micro		média	
	Ideal ¹	Mínimo	Ideal	Mínimo	Ideal	Mínimo	Ideal	Mínimo	Ideal	Mínimo
Plano	1,7%	1,7%	1,0%	1,0%	0,5%	0,5%	0,3%	0,3%	0,9%	0,9%
+Indicadores de estratégia	4,1%	3,1%	2,5%	1,8%	1,2%	0,9%	0,7%	0,6%	2,1%	1,6%
+envolvimento da liderança	17,2%	1,1%	10,9%	0,7%	5,6%	0,3%	3,5%	0,2%	9,3%	0,6%
+Investimento em P&D&I	71,2%	3,6%	59,3%	2,2%	41,5%	1,1%	30,1%	0,7%	50,5%	1,9%
+Investimento em Marketing	94,7%	11,2%	91,4%	6,9%	83,7%	3,5%	75,7%	2,2%	86,4%	5,9%
+Investimento comercial futuro	99,4%	15,5%	99,0%	9,8%	97,9%	5,0%	96,6%	3,1%	98,2%	8,3%

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota:

1 - Ideal: Possui um plano em implantação + Decisão é tomada em todos os níveis + Estratégia de qualificação já estruturada + Conscientização total dos funcionários + comunicação interna muito eficiente

2 - Mínima: Possui um plano em implantação + Decisão tomada apenas pelo presidente + Estratégia ainda em desenvolvimento + Funcionários não totalmente engajados+ comunicação interna pouco eficiente

Fonte: Elaborado pelos autores.

Ao simular os resultados do modelo, incluindo as categorias uma a uma, observa-se que os elementos que efetivamente fizeram a diferença na jornada para I4.0, na dimensão de Estratégia e organização, foram: Investir em P&D&I e investir em Marketing.

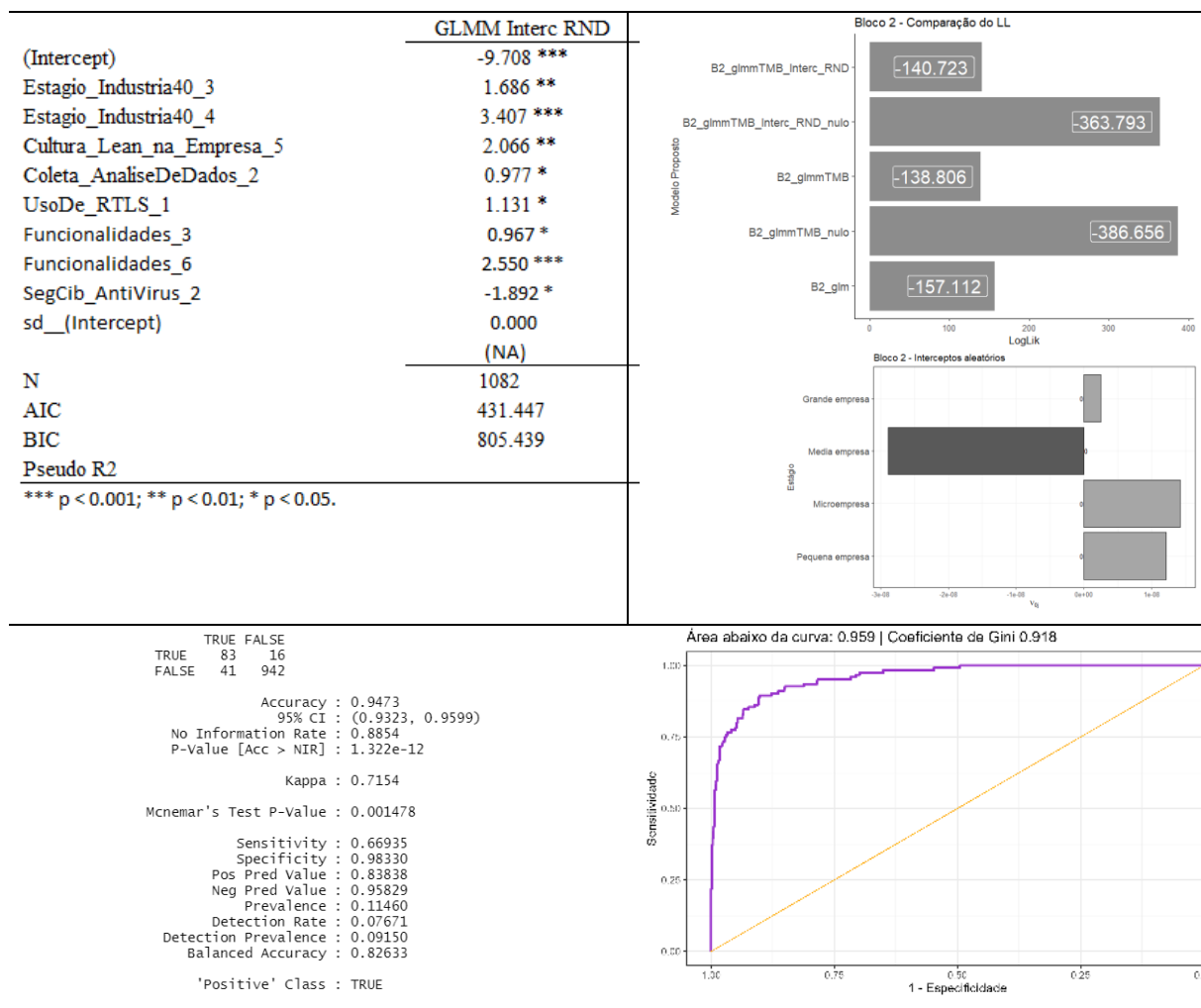
Apesar de importante, do ponto de vista da gestão das empresas, o envolvimento da liderança não é o fator determinante para seguir na trajetória da I4.0.

Desta forma, um item importante para ser observado está relacionado com a inovação (novos produtos e novos processos) e sua divulgação ao público de interesse. Ainda, segundo o modelo, outros investimentos devem ser realizados, porém os resultados ficaram aquém do demonstrado pela P&D&I.

Caso a empresa insista em fazer apenas o mínimo, com base no modelo, a probabilidade média da empresa entrar na I4.0 é de apenas 8%.

Na Figura 4, o modelo selecionado foi glmmTMB, Intercepto RND. A particularidade nesse modelo está no fato de que os portes praticamente não interferem nas probabilidades estimadas.

Figura 4 – Modelo de negócio, produtos e serviços – Modelo estimado



Fonte: Elaborado pelos autores.

Algumas variáveis tiveram que ser ajustadas pois estavam comprometendo a estimação dos modelos, seja por problemas de multicolinearidade e/ou *zero-inflated*, são elas:

- Técnicas e ferramentas *Lean* aplicadas pela empresa. Alguns itens foram agrupados em novas categorias, ou seja, foram criadas ferramenta de análise e mapeamento de processos (inclui mapeamento de fluxo de valor, troca rápida de ferramenta e PDCA). Ferramenta de qualidade e prevenção de acidentes (inclui qualidade na fonte, desenvolvimento de fornecedores etc.).

Ferramentas de gestão da produção inclui manutenção produtiva total TPM, Produção puxada/KANBAN e *Just in time*.

- Nível de utilização de dados para tomada de decisão: as categorias 3, 4, 5 e 6 foram agrupadas na categoria “Coletadas e tratadas em tempo real”.
- Ferramentas tecnológicas que são utilizadas no processo de coleta e análise de dados: as categorias 3, 4, 5 foram agrupadas na categoria “Coletadas em tempo real e uso de inteligência para tomada de decisão”.
- Nível de utilização das tecnologias no processo produtivo: As opções de resposta baseadas na escala Likert foram convertidas para binária, onde 0 representava inexistente e 1, utiliza.

Após a modelagem, observou-se que poucos grupos de variáveis analisadas possuem categorias que contribuem (estatisticamente significativas) para a jornada rumo a I4.0. Dessa forma, e como roteiro básico, observou-se que o sucesso é garantido para todas as empresas que já desenvolveram a estratégia para a I4.0 e estão em fase de implantação, ou seja, saíram da inércia, criaram uma equipe especialmente voltada para melhoria contínua. Todos os sistemas produtivos estão totalmente automatizados, os dados para tomada de decisão estão disponíveis em tempo real e esses dados são capturados em tempo real e utilizados pela plataforma de Inteligência Artificial, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Modelos de negócio, produtos e serviços - Jornada à I4.0

Categorias	Porte das empresas								Todas	
	Grandes		Médias		Pequenas		Micro		média	
	Ideal ¹	Mínimo	Ideal	Mínimo	Ideal	Mínimo	Ideal	Mínimo	Ideal	Mínimo
Plano	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
+Cultura lean na empresa	1,4%	0,3%	1,4%	0,3%	1,4%	0,3%	1,4%	0,3%	1,4%	0,3%
+Nível autom. Sist. Produtivos	6,7%	0,8%	6,7%	0,8%	6,7%	0,8%	6,7%	0,8%	6,7%	0,8%
+Dados para tomada de decisão	31,7%	0,6%	31,7%	0,6%	31,7%	0,6%	31,7%	0,6%	31,7%	0,6%
+Coleta e análise de dados	53,5%	1,6%	53,5%	1,6%	53,5%	1,6%	53,5%	1,6%	53,5%	1,6%
+Uso de RTLs	78,1%	1,6%	78,1%	1,6%	78,1%	1,6%	78,1%	1,6%	78,1%	1,6%
+Uso de manufatura aditiva/impressão 3D	63,6%	1,6%	63,6%	1,6%	63,6%	1,6%	63,6%	1,6%	63,6%	1,6%
+Uso de inteligência artificial	81,4%	1,6%	81,4%	1,6%	81,4%	1,6%	81,4%	1,6%	81,4%	1,6%

+Funcionalidades	98,3%	4,1%	98,3%	4,1%	98,3%	4,1%	98,3%	4,1%	98,3%	4,1%
+Seg. cibernética - Antivírus	89,4%	2,0%	89,4%	2,0%	89,4%	2,0%	89,4%	2,0%	89,4%	2,0%
+Seg. cibernética - Ger. Do usuário	98,2%	2,1%	98,2%	2,1%	98,2%	2,1%	98,2%	2,1%	98,2%	2,1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota:

1 - Ideal: Possui um plano em implantação + Decisão é tomada em todos os níveis + Estratégia de qualificação já estruturada + Conscientização total dos funcionários + comunicação interna muito eficiente

2 - Mínima: Possui um plano em implantação + Decisão tomada apenas pelo presidente + Estratégia ainda em desenvolvimento + Funcionários não totalmente engajados+ comunicação interna pouco eficiente

Ao simular os resultados do modelo, incluindo as categorias uma a uma, observou-se que os elementos que efetivamente fizeram a diferença na jornada para I4.0, na dimensão de Manufatura e Cadeia de Suprimentos, foram: Dados para tomada de decisão, coleta e análise de dados e o uso de sistemas de localização em tempo real (RTLs). Na área de segurança cibernética, foi o uso de antivírus e gerenciamento do usuário.

As variáveis uso de RTLs e segurança cibernética/antivírus possuem o coeficiente negativo. Isso sugere que essas categorias têm uma probabilidade de ocorrência menor em comparação com a categoria de referência.

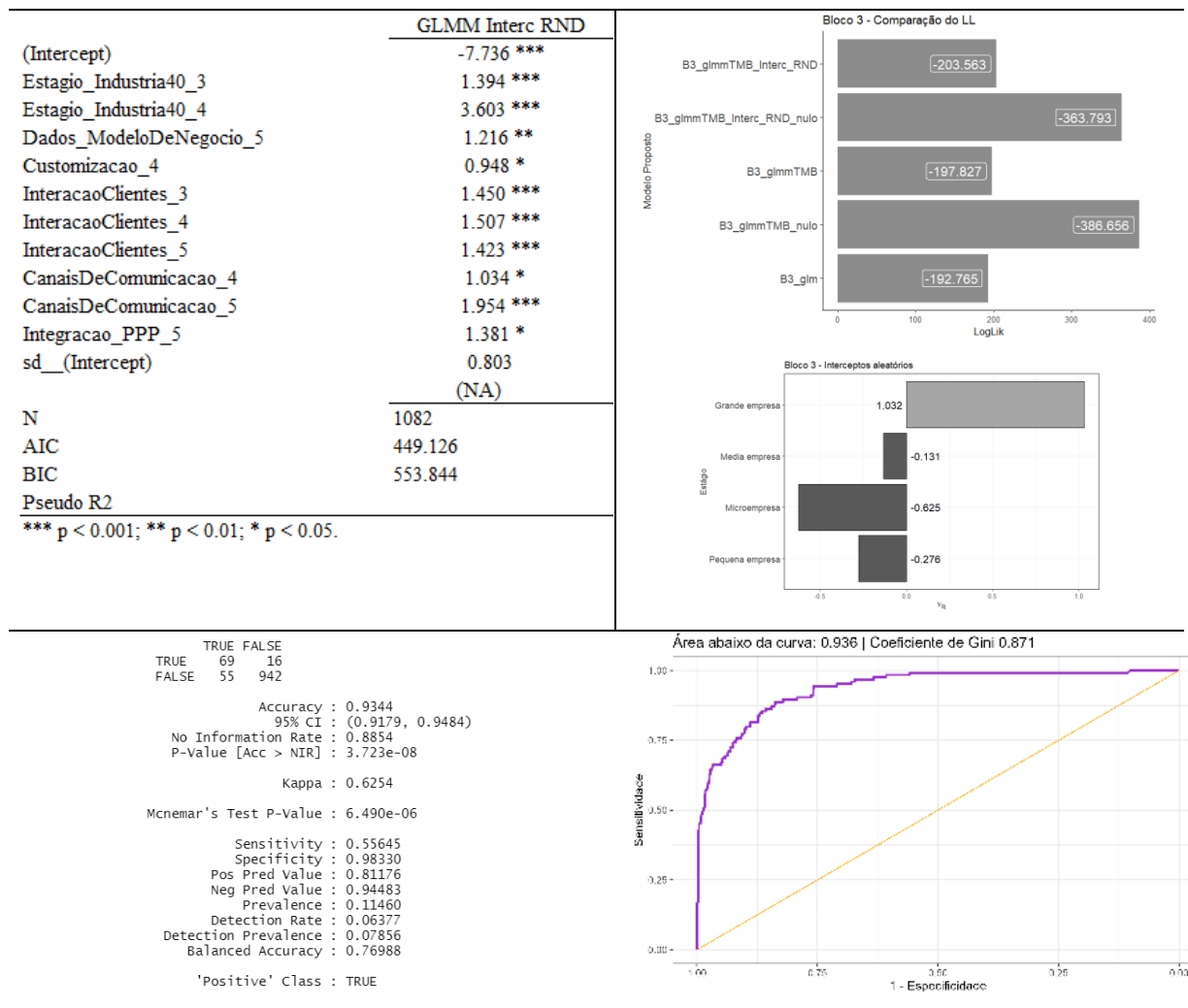
Desta forma, pode-se observar que se a empresa não investir na implementação da cultura *Lean*, automatizar processos, realizar a coleta de dados da produção em tempo real, criar um ambiente para tomada de decisões e investir na segurança cibernética do seu ambiente, ela dificilmente entrará no mundo da I4.0. Assim, a possibilidade dessa empresa, é de menos de 3% para avançar nessa direção.

O modelo selecionado foi glmmTMB Intercepto RND. Apesar de não atender plenamente os critérios de maior *log-likelihood* e menor AIC, ele foi selecionado para preservar a identidade metodológica adotada em toda a análise dos blocos e avaliar os efeitos introduzidos pelos cortes no cálculo das probabilidades estimadas.

Segundo o modelo, quase todos os grupos de variáveis analisadas possuem categorias que contribuem fortemente (estatisticamente significativas) para o sucesso na jornada rumo a I4.0.

Dessa forma, e como roteiro básico, observou-se que o sucesso é garantido para todas as empresas que já desenvolveram a estratégia para a I4.0 e estão em fase de implantação, ou seja, saíram da inércia; Entenderam que o uso de dados é muito relevante para definição de negócios, novos produtos e serviços. Perceberam que atender os clientes é o caminho e, nesse sentido, oferecem os principais produtos completamente customizáveis. Disponibilizaram vários canais de comunicação para venda de seus produtos. Utilizam vários canais de comunicação para coleta de informações e relacionamento com os clientes e o desenvolvimento de produtos, planejamento do processo produtivo e produção está totalmente integrado, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Modelo de negócio, produtos e serviços – Modelo estimado



Fonte: Elaborado pelos autores.

Segundo o modelo, quase todos os grupos de variáveis analisadas possuem categorias que contribuem fortemente (estatisticamente significativas) para o sucesso na jornada rumo a I4.0.

Dessa forma, e como roteiro básico observa-se que o sucesso é garantido para todas as empresas que já desenvolveram a estratégia para a I4.0 e, estão em fase de implantação, ou seja, saíram da inércia; entenderam que o uso de dados é muito relevante para definição de negócios, novos produtos e serviços. Perceberam que atender os clientes é o caminho e, nesse sentido, oferecem os principais produtos completamente customizáveis. Disponibilizaram vários canais de comunicação para venda de seus produtos. Utilizam vários canais de comunicação para coleta de informações e relacionamento com os clientes, o desenvolvimento de produtos, planejamento do processo produtivo e a produção está totalmente integrada, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Modelos de negócio, produtos e serviços - Jornada à I4.0

Categorias	Porte das empresas								Todas	
	Grandes		Médias		Pequenas		Micro		média	
	Ideal ¹	Míni mo	Ideal	Míni mo	Ideal	Míni mo	Ideal	Mínim o	Ideal	Míni mo
Plano	4,3%	4,3%	1,4%	1,4%	1,2%	1,2%	0,9%	0,9%	1,9%	1,9%
+Utiliz. dados p/ modelos de negócio	13,1%	7,3%	4,5%	2,4%	3,9%	2,1%	2,8%	1,5%	6,1%	3,3%
+Customização principais prods.	24,0%	8,8%	9,0%	2,9%	7,9%	2,5%	5,7%	1,8%	11,6%	4,0%
+Canais inter. clientes	56,7%	29,1%	29,0%	11,4%	26,1%	10,0%	20,0%	7,3%	32,9%	14,4%
+Canais p/ comunic. e coleta de dados	90,2%	44,3%	74,2%	19,9%	71,4%	17,7%	63,8%	13,2%	74,9%	23,7%
+Integr. desenv. prod., planej. e produção	97,4%	41,1%	92,0%	17,9%	90,8%	15,9%	87,5%	11,7%	91,9%	21,6%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota:

1 - Ideal: Possui um plano em implantação + Decisão é tomada em todos os níveis + Estratégia de qualificação já estruturada + Conscientização total dos funcionários + comunicação interna muito eficiente

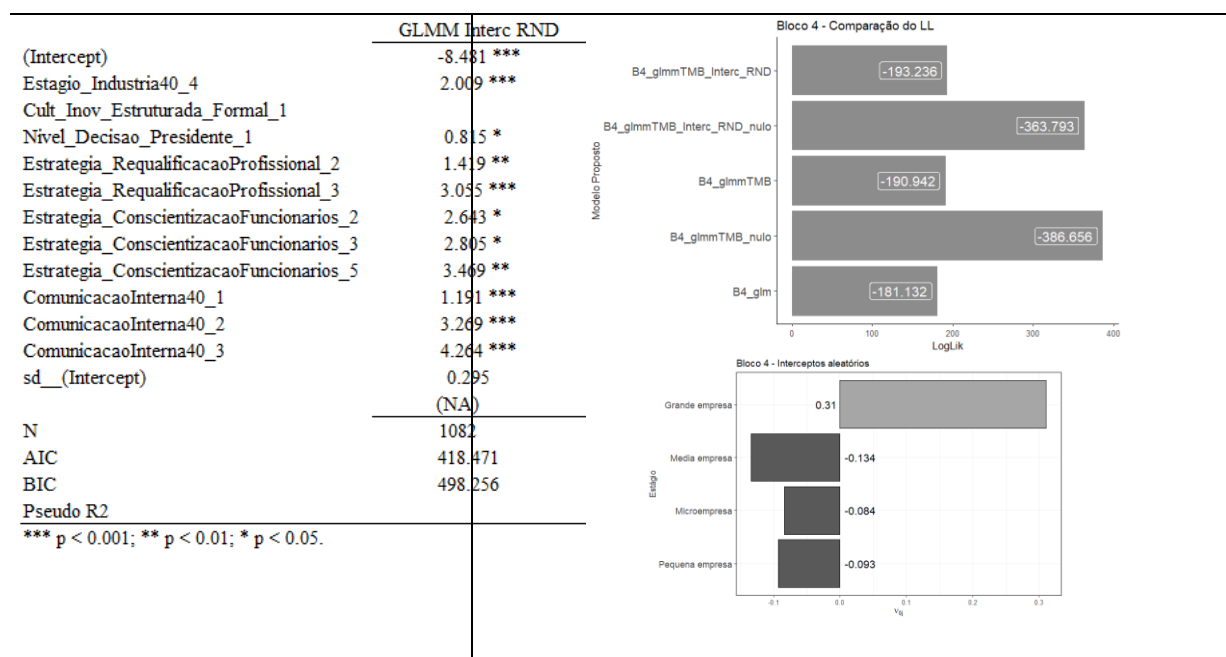
2 - Mínima: Possui um plano em implantação + Decisão tomada apenas pelo presidente + Estratégia ainda em desenvolvimento + Funcionários não totalmente engajados+ comunicação interna pouco eficiente

Ao simular os resultados do modelo, incluindo as categorias uma a uma, observa-se que os elementos que efetivamente fizeram a diferença na jornada para I4.0, na dimensão de Modelos de negócio, produtos e serviços, foram: os Canais de interação com os clientes e, os Canais para comunicação e coleta de dados nas interações com os clientes.

Isso confirma que o caminho que os modelos de negócio, produtos e serviços devem seguir nessa jornada para a I4.0, mais do que implementar novas tecnologias, passa por ouvir, interagir e adequar os produtos aos interesses efetivo dos clientes.

O modelo selecionado foi glmmTMB Intercepto RND. Apesar de não atender plenamente os critérios de maior log-lik e menor AIC, ele foi selecionado para garantir a identidade metodológica adotada na análise dos blocos anteriores. Observa-se também que os efeitos dos portes micro, pequenas e médias empresa são equivalentes, porém diferentes da grande empresa, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Cultura e pessoa – modelo estimado



```

TRUE FALSE
TRUE 74 24
FALSE 50 934

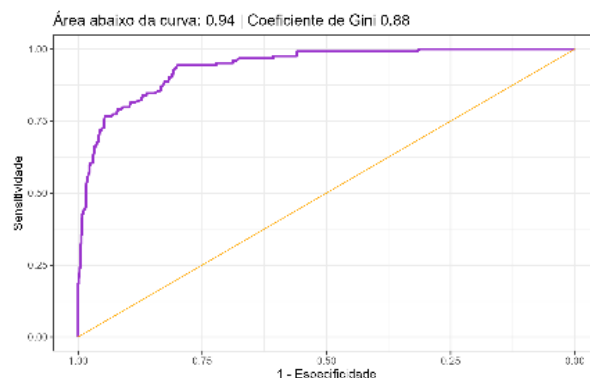
Accuracy : 0.9316
95% CI : (0.9149, 0.9459)
No Information Rate : 0.8854
P-Value [Acc > NIR] : 2.253e-07

Kappa : 0.6291
McNemar's Test P-Value : 0.003659

Sensitivity : 0.59677
Specificity : 0.97495
Pos Pred Value : 0.75510
Neg Pred Value : 0.94919
Prevalence : 0.11460
Detection Rate : 0.06839
Detection Prevalence : 0.09057
Balanced Accuracy : 0.78586

'Positive' Class : TRUE

```



Fonte: Elaborado pelos autores.

Segundo o modelo, quase todos os grupos de variáveis analisadas possuem categorias que contribuem fortemente (são estatisticamente significativas) para o sucesso na jornada rumo a I4.0.

Dessa forma, e como roteiro básico observa-se que o sucesso é garantido para todas as empresas que já desenvolveram uma estratégia para a I4.0 e, está em fase de implantação, ou seja, saíram da inércia. As decisões são tomadas em vários níveis, pelos gerentes e/ou pelo presidente. A direção da empresa sabe que precisa de profissionais qualificados e já implementou uma estratégia de requalificação deles. Os funcionários têm consciência de seu papel nessa jornada e mantêm uma atitude proativa em sugerir mudanças e desenvolveram uma estratégia de comunicação interna muito eficiente, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Cultura e pessoas – Jornada à I4.0

Categorias	Porte das empresas								Todas	
	Grandes		Médias		Pequenas		Micro		média	
	Ideal ¹	Mínimo	Ideal	Mínimo	Ideal	Mínimo	Ideal	Mínimo	Ideal	Mínimo
Plano	0,2%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,2%
+Nível decisão	0,7%	0,5%	0,5%	0,3%	0,5%	0,3%	0,5%	0,3%	0,5%	0,4%
+Requalificação funcionários	13,3%	1,9%	9,0%	1,3%	9,3%	1,3%	9,4%	1,3%	10,2%	1,4%
+Conscientização dos funcionários	83,1%	21,7%	76,0%	15,1%	76,7%	15,6%	76,9%	15,7%	78,2%	17,0%
+Comunicação interna	99,7%	47,7%	99,6%	36,9%	99,6%	37,8%	99,6%	38,0%	99,6%	40,1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota:

1 - Ideal: Possui um plano em implantação + Decisão é tomada em todos os níveis + Estratégia de qualificação já estruturada + Conscientização total dos funcionários + comunicação interna muito eficiente

2 - Mínima: Possui um plano em implantação + Decisão tomada apenas pelo presidente + Estratégia ainda em desenvolvimento + Funcionários não totalmente engajados+ comunicação interna pouco eficiente

Ao simular os resultados do modelo, incluindo as categorias uma a uma, observa-se que os elementos que efetivamente fizeram a diferença na jornada para I4.0, na dimensão de Cultura e Pessoas, foram: a conscientização dos funcionários e a eficácia da comunicação interna.

Dessa forma, o engajamento dos funcionários no processo de evolução para a I4.0, aliados a um plano eficiente de comunicação interna transparente, que valorize o esforço coletivo no programa de inovação, irão contribuir efetivamente para o sucesso da empresa nessa jornada

Assim, a partir da análise dos blocos (Figuras) constata-se que a estratégia e organização mais eficiente, rumo a indústria 4.0 está no investimento consciente em P&D&I, adequando processo e inovando produtos e o investimento em marketing, para divulgar a marca e produtos da empresa. Na etapa seguinte, investir na área comercial para consolidar esse processo.

No bloco manufatura e cadeia de suprimentos, deixa-se evidente que o caminho para a I4.0 está em consolidar a cultura *Lean* na empresa, automatizar processos, coletar dados em tempo real, criar um ambiente para tomada de decisões ágeis, investir em *cyber* segurança, com ênfase na utilização de antivírus e no controle e gerenciamento de usuários.

No entanto, como as empresas brasileiras podem implementar todos esses mecanismos se suas máquinas são obsoletas, com idade média superior a 14 anos (CNI 2023), ou seja, anterior a discussão da I4.0? Essa situação impõe as empresas uma barreira difícil de transpor sozinha. Portanto, é necessário a criação de políticas públicas concretas, no sentido de reverter esse cenário, concedendo linhas de créditos específicas para a renovação do parque fabril brasileiro.

Em relação aos modelos de negócio, produtos e serviços, o caminho está em ouvir, interagir e adequar os produtos aos interesses efetivo dos clientes. Todos os canais devem ser utilizados.

Por fim, em cultura e pessoas, fica evidente que o engajamento efetivo dos funcionários da empresa no processo de evolução para a I4.0 é fundamental. Implementar um plano eficiente de comunicação interna, transparente e que valorize o esforço coletivo no programa, contribui para o sucesso.

3 CONSIDERAÇÕES

Os dados fornecidos pelo SENAI foram fundamentais para a realização desse estudo. No entanto, alguns ajustes tiveram que ser implementados. Alguns registros foram removidos por apresentarem inconsistências com o formato do questionário atual, duplicidades e as empresas fora da indústria de transformação.

A base de dados, após ajustes, contou com 1.089 empresas da indústria de transformação e 111 variáveis distribuídas em 4 blocos distintos. A proporção de empresas consideradas na variável de interesse (fase de Indústria 4.0) responde por apenas 11%.

O resultado da análise das correspondências evidencia que o adensamento formado ao redor da variável de interesse, pelas demais variáveis, é muito menor do que o observado na variável complementar. Esse comportamento sugere que pode haver um número exagerado de variáveis consideradas no levantamento.

Na etapa de modelagem dos dados os modelos glmmTMB com intercepto apresentaram os melhores resultados e foram, portanto, utilizados efetivamente na análise. No entanto, os critérios de *log-likelihood* e AIC tiveram que ser flexibilizados nos blocos 3 e 4 para permitir o uso do glmmTMB e assim, manter a mesma estrutura de modelos entre todos eles.

Os modelos glmmTMB atenderam bem aos propósitos do estudo, ou seja, foi possível identificar as variáveis determinantes ao estudo em cada um dos blocos, e com isto, permitiu-se criar uma medida para avaliar o hiato de evolução para a I4.0.

A identificação de modelos específicos para cada bloco, traz uma nova perspectiva, proativa e descentralizada, para a avaliação da maturidade tecnológica das empresas. Eles permitem, entre outras coisas, avaliar conjuntamente o comportamento de cada variável considerada, avaliar o estágio atual frente ao desafio da mudança, mensurar as chances de sucesso para cada uma das ações,

tornando as decisões mais assertivas e, por fim, um radar de monitoramento dessa evolução.

Como resultados contata-se que investir conscientemente em P&D&I para adequar processos e inovar produtos, investir em marketing, consolidar a cultura *Lean* na empresa e investir em *cyber* segurança, interagir e adequar os produtos aos interesses dos clientes, utilizando todos os canais, e engajar efetivamente todos os funcionários da empresa no processo de evolução para a I4.0 é um caminho a ser percorrido pelas as empresas brasileiras, frente ao uso destas novas tecnologias da I4.0.

REFERÊNCIAS

AGRESTI, A. **Análise de Dados Categóricos**. Nova York: Wiley-Interscience, 1994.

AKDIL, KY; USTUNDAG, A.; CEVIKCAN, E. Modelo de maturidade e prontidão para estratégia da indústria 4.0. *In: Indústria 4.0: Gerenciando a transformação digital*. Springer, Cham, 2018. p. 61-94.

BATÓG, J.; BATÓG, B. Aplicação da análise de correspondência à identificação da influência das características dos desempregados na duração do desemprego. **Revista de Economia e Negócios**, v. 16, pág. 25–44, 2016.

BRZEZIŃSKA, J. Análise estatística da pobreza económica na Polónia usando R. *Econometrics. Econometria. Avanços na Análise Aplicada de Dados*, v. 22, n. 2, pág. 45–53, 2018.

CGEE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Indústria 4.0 – **Mapeamento das principais metodologias de aproximação entre o setor produtivo e as tecnologias 4.0**. Série Documentos Técnicos, n. 32, Brasília, DF: CGEE, 2022.

CNI. **A difusão das tecnologias da indústria 4.0 em empresas brasileiras**. Brasília: Confederação Nacional da Indústria, 2020.

CNI. **Indústria 4.0: Cinco anos depois**. Sondagem Especial, n. 83, Ano 21. Brasília: Confederação Nacional da Indústria, 2022.

CNI. **Indústria 4.0**. Sondagem Especial - nº 66, Ano 17. Brasília: Confederação Nacional da Indústria, 2016.

JESUS, C.; LIMA, RM. Literatura Pesquisa de Fatores Chave para o Desenvolvimento de Modelos de Maturidade Genéricos e Específicos para a

Indústria 4.0. **Ciências Aplicadas**, v. 10, n. 17, pág. 1-19, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/17/5825> .

DOGEAA, R.; STOLTA, R. Identificando Desafios Relacionados à Indústria 4.0 em Cinco Empresas de Manufatura. *In*: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE AUTOMAÇÃO FLEXÍVEL E FABRICAÇÃO INTELIGENTE (FAIM2021), 30., **Anais [...]**, 7 a 10 de setembro de 2021, Atenas, Grécia, 2021.

ELHUSSEINY, HM; CRISPIN, JÁ. Uma Revisão dos Modelos de Maturidade da Indústria 4.0: Adoção de PMEs nos Setores de Manufatura e Logística. *In*: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE SISTEMA DE INFORMAÇÃO EMPRESARIAL CENTERIS. Conferência Internacional sobre Gerenciamento de Projetos PROJMAN. Conferência Internacional sobre Sistemas e Tecnologias de Informação em Saúde e Assistência Social, HCIST, 2023, p. 286. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.010.286>. Acesso em: 2023.

FÁVERO, LP; BELFIORE, P. **Manual de Análise de Dados – Estatística e Modelagem Multivariada com Excel, SPSS e Stata**. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

GREENACRE, M.; BLASIUS, J. **Análise de Correspondência em Ciências Sociais**. Londres: Academic Press Ltd., 1994.

CABELO Jr, JF; PRETO, WC; BABIN, BJ; ANDERSON, RÉ; TATHAM, RL **Análise Multivariada de Dados**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

SARBU, M. O impacto da indústria 4.0 no desempenho da inovação: Insights de empresas alemãs de manufatura e serviços. **Tecnologianovação**, v. 113, p. 102415, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2021.102415> . Acesso em: 2022.

SCHUH, G.; ANDERL, R.; DUMITRESCU, R.; KRUGER, A.; HOMPEL, M. **Índice de Maturidade Industrie 4.0 – Gerenciando a Transformação Digital das Empresas**. ACATECH – Academia Nacional de Ciências e Engenharia, 2020.

SENAI. **SENAI 4.0** – Avaliação Maturidade Indústria 4.0 – Questionário. Disponível em: <https://maturidade.senai40.com.br> . Acesso em: 2021.

TSAKALEROUA, M.; AKHMADIA, S. Agentes de inovação: Clusters na Indústria 4.0. *In*: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE AUTOMAÇÃO FLEXÍVEL E FABRICAÇÃO INTELIGENTE (FAIM2021), 30., 2021, Atenas. *Procedia Manufacturing*, v. 319-327, 2021.

BIOGRAFIA DOS AUTORES

Edson Velloso dos Santos Junior

Estatístico formado pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro, com uma sólida carreira na Confederação Nacional da Indústria (CNI) iniciada em 1987. Atualmente ocupa o cargo de Gerente de Estatística da Superintendência de Economia da CNI e responsável pelas Pesquisas Nacionais realizadas pela entidade.

Delmo Alves de Moura

Professor Associado da Universidade Federal do ABC (UFABC), Santo André, São Paulo, Brasil. Professor do programa de mestrado acadêmico em Engenharia de Produção da UFABC. Pesquisador na área de sistemas logísticos, engenharia de operações portuárias e Data Science and Analytics.



Artigo recebido em: 29/01/2024 e aceito para publicação em: 26/04/2024

DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v24i1.5156>