

1 2



9 0

UNIVERSIDADE D COIMBRA

Maria João Clemente Ferreira da Silva

Difusão da Inovação e Condução de Calor Validação de uma Analogia

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial
orientado por Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão e apresentada
Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e
Tecnologia

Julho de 2023

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Difusão da Inovação e Condução de Calor

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

Diffusion of Innovation and Heat Conduction

Autor

Maria João Clemente Ferreira da Silva

Orientador

Miguel Rosa Oliveira Panão

Júri

Presidente	Professor Doutor Luís Miguel Domingues Fernandes Ferreira Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogal	Professora Doutora Aldora Gabriela Gomes Fernandes Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2023

*"Tenho em mim todos os sonhos do mundo."
Fernando Pessoa*

Agradecimentos

Gostaria de fazer uma menção especial de reconhecimento e agradecimento a todos os que, de alguma forma, contribuíram para a minha motivação e apoio para a realização desta dissertação e que de outro modo não seria possível concretizar.

Um agradecimento muito especial ao Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Pannão, pela orientação científica, apoio contínuo e valioso ao longo da elaboração deste trabalho. Que continue a inspirar os alunos do Departamento de Engenharia Mecânica com tanto sucesso como conseguiu comigo.

Agradeço à minha família e aos amigos, pela compreensão, carinho e incentivo constante ao longo da minha vida e, em especial, ao longo desta jornada académica. Por não me deixarem desistir de perseguir os meus sonhos, um grande obrigado.

Resumo

A difusão de inovação é representada por uma curva-S descrita por diversos modelos reportados na literatura que consideram somente o efeito temporal na evolução da taxa de adotantes. Esta dissertação apresenta a validação da proposta de aplicar por analogia os modelos de condução de calor em regime transiente para descrever esse comportamento. A abordagem metodológica adotada neste trabalho envolveu a aplicação de duas propostas: o Método da Capacitância Inovativa Global (MCIG) e Método da Difusão Espaço-temporal da Inovação (MDEI). A validação foi conduzida através da simulação computacional de ambas as abordagens e corroborada recorrendo a dados de inovações, tendo como principal objetivo avaliar a qualidade do ajuste dos modelos propostos.

A validação das propostas inclui uma análise de risco, considerando o fator de risco associado à sensibilidade dos parâmetros a variações e a incerteza associada ao ajuste da curva de inovação. O Risco, calculado como o produto do fator de risco com base em pesos e a entropia da informação normalizada, oferece uma apreciação da aplicabilidade do método na descrição da curva de inovação. Para além do mais, o Coeficiente de Correlação de Pearson foi utilizado para aferir a relação linear entre os valores observados e as curvas ajustadas por ambas as propostas. O coeficiente mencionado mede a força e a direção dessa relação, reflectindo uma medida da qualidade do ajuste das abordagens propostas.

Os resultados da validação demonstraram uma concordância entre as previsões das propostas MCIG e MDEI e os valores observados. O Coeficiente de Correlação de Pearson revelou uma relação positiva forte entre os parâmetros, indicando uma boa qualidade de ajuste. Quanto ao Risco, analisado de um ponto de vista relativo revela que o método difusivo espaço-temporal apresenta um menor crescimento, favorecendo o seu valor na descrição das curvas-S de inovação.

O resultado da investigação que compões esta dissertação revela avanços significativos na potencial compreensão da difusão da inovação recorrendo a modelos de engenharia como o da condução de calor em regime transiente. No entanto, ainda existem áreas promissoras para futuras investigações.

Palavras Chave: Difusão da Inovação, Condução de Calor, Validação de uma Analogia.

Abstract

The diffusion of innovation is represented by an S-curve described by various models reported in the literature that only consider the temporal effect in the evolution of the adopter rate. This dissertation presents the validation of the proposal to apply, by analogy, the models of transient heat conduction to describe this behavior.

The methodological approach adopted in this work involved the application of two proposals: the Global Innovative Capacitance Method (GICM) and the Spatio-temporal Innovation Diffusion Method (SIDM). The validation was conducted through the computational simulation of both approaches and corroborated using innovation data, with the main objective being to evaluate the quality of the fit of the proposed models.

The validation of the proposals includes a risk analysis, considering the risk factor associated with the sensitivity of the parameters to variations and the uncertainty associated with the innovation curve fit. Risk, calculated as the product of the risk factor based on weights and normalized information entropy, offers an appreciation of the applicability of the method in describing the innovation curve. Furthermore, the Pearson Correlation Coefficient was used to ascertain the linear relationship between the observed values and the curves adjusted by both proposals. The aforementioned coefficient measures the strength and direction of this relationship, reflecting a measure of the quality of the fit of the proposed approaches.

The validation results demonstrated an agreement between the predictions of the GICM and SIDM proposals and the observed values. The Pearson Correlation Coefficient revealed a strong positive relationship between the parameters, indicating a good quality of fit. As for Risk, analyzed from a relative point of view, it reveals that the spatio-temporal diffusion method presents a lower growth, favoring its value in describing the S-curves of innovation.

The result of the research that composes this dissertation reveals significant advances in the potential understanding of the diffusion of innovation using engineering models such as transient heat conduction. However, there are still promising areas for future investigations.

Keywords: Innovation Diffusion, Heat Conduction, Validating an Analogy.

Conteúdo

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
Conteúdo	xiii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Abreviações e Acrónimos	xix
Nomenclatura	xxi
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Estrutura da Dissertação	3
2 Fundamentos e Revisão Bibliográfica	5
2.1 Difusão de Inovação	5
2.1.1 Elementos principais na Difusão de Inovação	5
2.1.2 Modelos Padrão de Difusão de Inovação	10
2.2 Transmissão de Calor por Condução	15
2.2.1 Número de Biot	16
2.2.2 Método da Capacitância Global com atraso	18
2.2.3 Condução transiente com variação espaço-temporal da temperatura	19
3 Analogia e Metodologia	23
3.1 Analogia paramétrica entre Difusão de Inovação e Difusão de Calor.	24
3.1.1 Método da Difusão Espaço-temporal da Inovação – MDEI .	26
3.1.2 Método da Capacitância Inovativa Global – MCIG	27
3.2 Metodologia de Análise e Processamento de Dados	27
3.2.1 Tratamento dos dados e algoritmo de análise	28
3.2.2 Análise de riscos	31
4 Resultados e Discussão	35
4.1 Análise Geral de Dados	35
4.1.1 Análise do ajuste das curvas	35
4.1.2 Análise Paramétrica dos Resultados do Ajuste	38
4.2 Análise de Risco	42
5 Conclusões e Trabalhos Futuros	45
Bibliografia	47

Apêndice A	Resultados dos Ajustes das Curvas da Inovação	49
Apêndice B	Resultados para a Análise Paramétrica	57

Lista de Figuras

1.1	Categorias de adotantes de uma inovação de Rogers (2003).	1
2.1	Iustração do processo de Difusão de Inovação adaptado de Rogers (2003)	6
2.2	Ilustração do modelo dos cinco estágios no processo de inovação-decisão adaptado de Rogers	9
2.3	Interpretação dos modelos de Bass da Eq. (2.11) e o de Geroski da Eq. (2.10) ilustrando a diferença entre os efeitos da difusão da inovação pelos Media e quando existe comunicação interpessoal.	14
2.4	Exemplo de aplicação da Eq. (2.32) incluindo os efeitos de cada parâmetro sobre a evolução temporal de $T(t, x) - T_{\infty 0}$	21
2.5	Efeito da posição analisada x relativamente ao tamanho da região da condição inicial a , $\xi = x/a$ na forma da evolução da temperatura desde os primeiros instantes até se atingir o equilíbrio térmico.	21
3.1	Exemplos de taxas de adoção nos EUA de inovações consideradas na análise.	28
3.2	Gama de inovações analisadas contendo o intervalo de tempo desde que se dispõe do primeiro dado para a taxa de adoção até ao último ano.	30
4.1	Resultados obtidos para a analogia das curvas da inovação Automóvel (esquerda) e máquina de lavar roupa (direita) aos métodos de condução de calor transiente.	36
4.2	Resultados obtidos para a analogia das curvas da inovação ignição electrónica (ajuste MCIG superior a MDEI) e do congelador (ajuste MDEI superior a MCIG).	36
4.3	Comparação entres as estimativas do coeficiente de correlação para o modelo MDEI e o modelo MCIG	37
4.4	Comparação das diferenças significativas entre o MDEI e o MCIG	38
4.5	Histogramas para a abordagem MCIG	39
4.6	Matriz Dispersão e Correlação para a abordagem MCIG	39
4.7	Histogramas para a abordagem MDEI	40
4.8	Matriz Dispersão e Correlação para a abordagem MDEI	41
4.9	Correlação entre o alcance inovativo (ξ) e a difusividade inovativa (α) obtidos pelo MDEI.	42
4.10	Relação entre o fator de risco ($S_{\bar{\zeta},j}$) e a incerteza (H_n) para ambos os métodos.	43
4.11	Estimativas de risco relativizado pelo máximo para as abordagens MCIG E MDEI.	44
4.12	Distribuição cumulativa dos valores de risco relativo em cada método (MCIG e MDEI).	44

Lista de Tabelas

3.1	Analogia entre parâmetros da condução de calor e da difusão de inovação	24
3.2	Analogia entre propriedades da condução de calor e difusão da inovação	25
3.3	Gama de procura dos coeficientes envolvidos nos métodos MCIG e MDEI	29
3.4	Pesos de cada parâmetro no Risco obtidos para os métodos MCIG e MDEI	32

Lista de Abreviações e Acrónimos

MCIG Método da Capacitância Inovativa Global

MDEI Método da Difusão Espaço-temporal da Inovação

Nomenclatura

$A(t)$	Taxa de adoção temporal
a	u.c. - raio de ação da região inicial de difusão da inovação
b	Constante expoente associada ao tempo
C	Fator de escala
c	Calor específico [$J/(kgK)$]
E_i	Energia interna [J]
h	Coefficiente de convecção [$W/(m^2K)$]
H_n	Entropia de informação normalizada
k	Condutibilidade térmica [$J/(mK)$]
m	Massa [kg]
$n(t)$	Número de adotante num determinado instante
N	Número total de potenciais adotantes
p	Taxa de inovação
q	Taxa de imitação
$q_{in,out}$	Potência térmica de entrada (in) e saída (out) [W]
R	Risco
R^2	Coefficiente de correlação de Pearson
R_t	Resistência Térmica [K/W]
S	Factor de risco
T	Temperatura [K]
t	u.t. - unidade temporal
V	Volume [m^3]
w	Peso no factor de risco

x u.c. - unidade de comprimento

Bi Número de Biot = hx/k

Símbolos Gregos

α Difusividade térmica [m^2/s] ou de inovação

λ Proporção de potenciais adotantes

Φ Percentagem de potenciais adotantes a captar

ϕ Probabilidade de influenciar adotantes

ρ Massa volúmica [kg/m^3]

σ Desvio padrão

τ, Γ Tempo de resposta de um sistema

Θ Percentagem de contactos efetivos

θ Diferença de temperatura [K]

φ Probabilidade de contactar adotantes

$\varphi(t)$ Evolução de temperatura relativa

ξ Alcance de uma inovação = x/a

Subscritos

∞ Ambiente

cond, cd Condutivo

conv, cv Convectivo

0 Inicial

1. Introdução

A *difusão de inovação* é um conceito teórico que descreve como novas ideias, serviços e tecnologias são adotadas e se espalham dentro de uma sociedade ou grupo ao longo do tempo. Everett Rogers (2003) foi precursor no desenvolvimento deste conceito, muitas vezes representado por uma curva em forma de “S” (Fig. 1.1), que mostra a taxa de adoção de uma inovação ao longo do tempo. A difusão da inovação passa por várias etapas: conhecimento, persuasão, decisão, implementação e confirmação. E Rogers categorizou ainda os indivíduos em grupos com base no tempo que demoram a adotar uma nova inovação: inovadores, primeiros adotantes (*early adopters*), maioria inicial (*early majority*), maioria tardia (*late majority*) e retardatários (*laggards*).

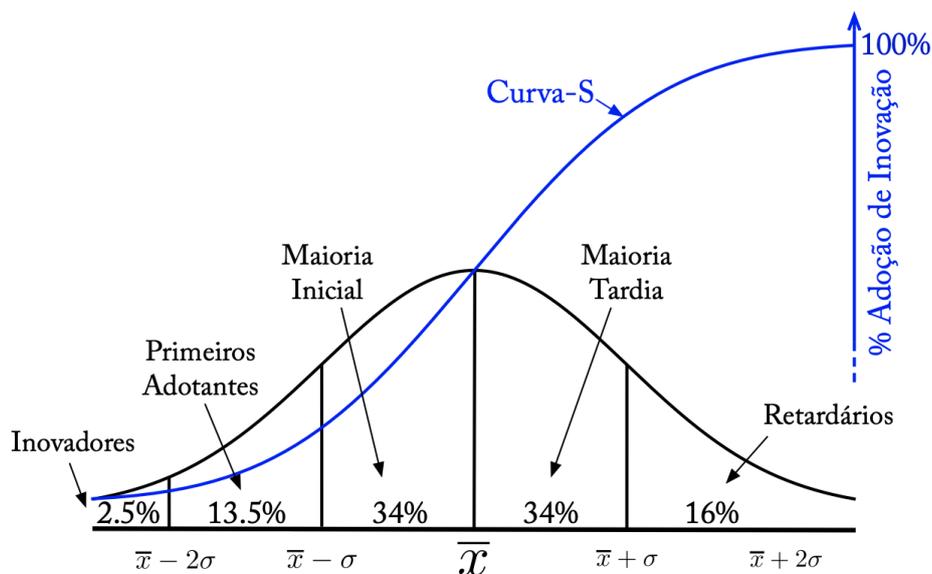


Figura 1.1: Categorias de adotantes de uma inovação de Rogers (2003).

Inovadores: Os primeiros indivíduos a adotarem uma inovação sendo caracterizados como Inovadores. Estes representam uma pequena fração da população total. Por sua vez, denotam elevada propensão para a exposição ao risco experimentando novas ideias e tecnologias. Por norma, estes indivíduos tomam o risco mesmo sem saberem a fiabilidade da inovação, uma vez que frequentemente têm acesso a recursos e conhecimento avançados em relação aos demais.

Primeiros Adotantes: Os indivíduos que adotam posteriormente aos *Innovators* uma inovação. Estes são considerados dirigentes de opinião, conduzindo à persuasão de outros indivíduos no seu grupo social ou setor a adotarem a inovação. Estes indi-

víduos estão altamente envolvidos a nível social, o que lhes viabiliza a divulgação de informações sobre a inovação de forma eficaz.

Maioria Inicial: Esta fase é constituída pelos adotantes os quais adotam a inovação antes da maior parte da população. Estes, por sua vez, são persuadidos pelos *Innovators* e *Early Adopters*, sendo vistos como indivíduos mais prudentes no que diz respeito à adoção de inovações em comparação com os restantes grupos anteriormente mencionados. Antes de adotar a inovação estes indivíduos aguardam por indícios em como a mesma é eficaz.

Maioria Tardia: Os indivíduos constituintes deste grupo adotam a inovação posteriormente aos *Early Majority*. Estes apresentam algum cepticismo relativamente às novas invenções e por norma precisam de evidências significativas da eficácia e benefícios antes de adotá-las. Estes indivíduos são influenciados pela adoção por parte dos *Early Majority* e tende a ser uma adoção mais lenta e cautelosa.

Retardários: São os últimos indivíduos a adotar a inovação. Usualmente, apresentam um menor acesso a recursos e conhecimento, sendo resistentes à mudança. Estes poderão adotar uma inovação apenas quando esta se encontrar extensivamente estabelecida na sociedade ou no mercado, e poderão se deparar com desafios na sua adoção como barreiras sociais, económicas ou culturais.

Na gestão industrial, a difusão de inovação pode fazer parte: do plano estratégico de introdução de novos produtos e tecnologias no mercado; da gestão de um produto ao longo do período em que está a difundir a inovação, de modo a decidir se deve modificar, atualizar ou eliminar esse produto; da competitividade e diferenciação da empresa no seu nicho de mercado comparando a difusão da inovação em relação a outras de indústrias concorrentes; e da gestão de mudanças quando se pretende implementar novas ideias, processos tecnologia no interior de uma indústria e compreender a dinâmica da difusão da inovação com a intenção de otimizar a sua adoção.

A teoria da difusão de inovação tem vindo a suscitar interesse em várias áreas científicas e, como tal, tem sido alvo de vários estudos. A difusão de inovação alocada ao último estágio do processo de inovação pode ser utilizada como indicador de desempenho, a fim de avaliar e compreender o sucesso do mesmo. Assim, o sucesso do processo de inovação depende da velocidade e da intensidade da difusão de inovação. Existem vários fatores que influenciam a difusão de inovação e a disseminação de informação entre os diferentes sujeitos, nomeadamente o impacte da densidade das conexões entre os participantes no processo de difusão de informação relativa à inovação. Por sua vez, identificar a densidade de conexões possibilita a gestão do processo da difusão de inovação num mercado específico e num certo período de tempo, demonstrando como a difusão de inovação poderá ser modelada.

No que diz respeito à modelação do processo da difusão de inovação, uma das abordagens recentemente considerada recorre à analogia entre a difusão de inovação e o mecanismo de difusão molecular de energia térmica que ocorre na transmissão de calor por condução. A proposta feita por Diakonova et al. (2020) baseia-se num paralelo entre a equação que descreve a condução de calor em regime transiente e a sua analogia na descrição da difusão de uma inovação. Por meio de uma condição inicial apropriada, assim como condições de fronteira, a solução integral da equação da condução de calor

corresponde à curva S, curva esta típica da difusão de inovação. Inicialmente, as forças de retorno (*feedback*) positivo tendem a atuar, aumentando da velocidade de difusão das inovações. Por outro lado, quando a taxa de difusão alcança um certo valor crítico, o retorno negativo é automaticamente ativado, o que faz com que a taxa de difusão baixe, o que por sua vez conduz à saturação do processo de inovação.

1.1. Objetivos

A presente dissertação visa compreender o fenómeno da difusão de inovação, bem como os fatores que influenciam a sua propagação, através de uma analogia entre essa e a transmissão de calor em regime transiente. Apesar de Diakonova et al. (2020) ter proposto esta analogia, uma análise cuidada ao significado dos termos merece revisão e os autores não apresentam qualquer validação. Assim, o objectivo principal desta dissertação será validar a analogia entre difusão de inovação e a condução de calor transiente com dados existentes na literatura. Os objectivos específicos serão *i*) aprofundar a linguagem usada nesta analogia e *ii*) estruturar a primeira versão de uma aplicação que permita uma empresa avaliar as características da difusão de uma sua inovação.

1.2. Estrutura da Dissertação

Após o presente capítulo introdutório, no capítulo 2 exploram-se os fundamentos subjacentes ao conceito de difusão de inovação e à transmissão de calor por condução em regime transiente cujo mecanismo é a difusão molecular. Assim, o capítulo 3 dedica-se ao detalhe entre a analogia da difusão de inovação e difusão de calor, apresentando a metodologia de obtenção dos parâmetros que caracterizam a difusão de inovação. O capítulo 4 apresenta os dados das curvas de diversas inovações usadas para validar a abordagem, os resultados dos parâmetros obtidos por ajuste das curvas e respectiva discussão dos mesmos. Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho e as linhas de orientação para futuros desenvolvimentos nesta área de investigação que sintetiza a área da inovação ligada à gestão industrial com a transmissão de calor, mais ligada à engenharia, uma interação que em si mesma poderá revelar-se uma inovação. Espera-se que esta dissertação dê o primeiro impulso nesse sentido.

2. Fundamentos e Revisão Bibliográfica

Este capítulo estabelece os fundamentos em duas partes principais. Na primeira, define-se o que é a difusão de inovação e faz-se uma revisão sucinta de diversos aspectos e conceitos relacionados com essa, incluindo uma sub-secção final com a apresentação e crítica dos modelos principais desenvolvidos na literatura. Na segunda parte, exploram-se os fundamentos físicos associados à transmissão de calor por condução em regime transiente em dois tipos de condições: variação apenas temporal e variação espaço-temporal da temperatura.

2.1. Difusão de Inovação

Everett Rogers (2003) afirma que a *difusão de inovação* é caracterizada como o processo no qual um produto, tecnologia ou serviço inovador é comunicado com o auxílio de certos canais e num determinado tempo entre os membros de um sistema social. Define-se a *comunicação da inovação* como um processo de convergência ou divergência, mediante o número de indivíduos envolvidos na troca de informação, com o fim da experiência da inovação mover-se entre esses indivíduos consoante o significado que dão a certos eventos. Por sua vez, um evento é apenas uma parte de um processo total em que a informação é trocada entre dois indivíduos. A difusão é um tipo especial de comunicação em que as mensagens centram-se numa nova ideia, estando inerente a essa novidade um certo grau de incerteza na difusão da informação. No que concerne à incerteza, esta representa o grau que um número de alternativas à mensagem original representa no conjunto total possível com que a ideia pode ser disseminada (e.g., por diferentes meios de comunicação social). Considera-se que uma inovação difunde-se quando gera alguma mudança social, determinada pelo efeito que produz na estrutura e função de um sistema social, por exemplo, como o impacte da emergência do telefone no modo como as pessoas comunicam em tempo-real. A mudança social sucede quando novas ideias são inventadas, difundidas, e adotadas ou rejeitadas. Por fim, a difusão de uma inovação pode corresponder à divulgação de novas ideias de forma planeada ou espontânea.

2.1.1. Elementos principais na Difusão de Inovação

O processo de difusão no qual uma inovação é comunicada através de certos canais ao longo do tempo entre os membros de um sistema social requer quatro elementos principais: a inovação propriamente dita; os canais de comunicação; tempo; e o sistema social. A forma que quantifica essa difusão consiste na percentagem acumulada de adotantes ao longo do tempo dentro do grupo de adotantes possíveis. A figura 2.1

ilustra o processo de difusão de três inovações que ocorrem em períodos de tempo diferentes, destacando as categorias extremas (Inovadores no início e retardatários no fim) e a região do período de *arranque*. O período de "arranque" na difusão da inovação refere-se ao momento em que a taxa de adoção de uma inovação se torna significativa e o crescimento de sua difusão começa a acelerar. Geralmente, este período ocorre quando a inovação passa dos "primeiros adotantes" para o grupo da "maioria inicial". Nos estágios iniciais, a adoção de uma inovação é relativamente lenta porque o grupo do inovadores é pequeno. Estes são indivíduos dispostos a correr riscos, possuem maior status social, têm liquidez financeira, são sociais e, pela extensão da sua rede de conexões, tornam-se fundamentais no início do período de arranque de uma inovação. À medida que os primeiros adotantes começam a usar e a partilhar as suas experiências sobre a inovação, cresce a visibilidade e valor da inovação. Por isso, quando a inovação atinge a maioria inicial - um grupo maior que é deliberado e cauteloso na adoção de novas inovações - o período de arranque termina. A partir desse momento, a taxa de adoção torna-se autossustentável e experimenta um crescimento significativo.

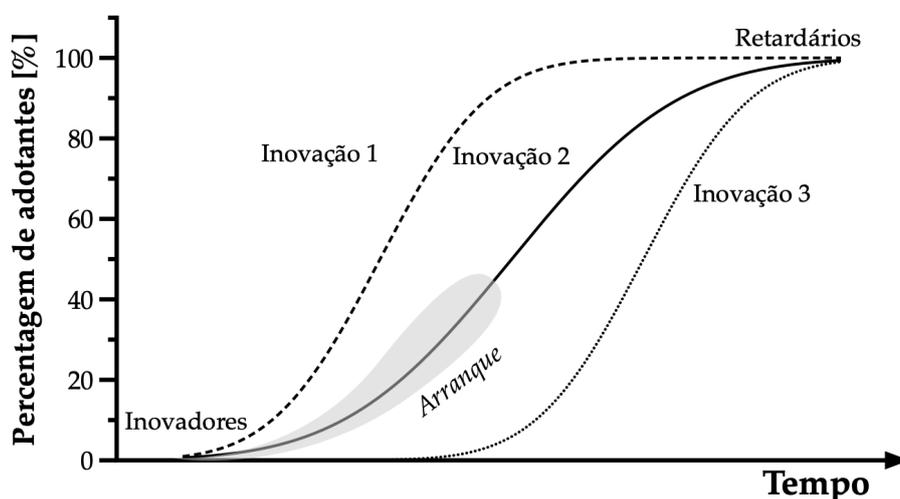


Figura 2.1: Ilustração do processo de Difusão de Inovação adaptado de Rogers (2003)

Rogers define, então, que a difusão é o processo pela qual uma inovação é comunicada através de certos canais ao longo do tempo entre os membros de um sistema social.

Inovação

Segundo Rogers, a inovação é uma ideia, prática, ou objeto compreendido como novo por um indivíduo ou outra unidade de adoção. Por conseguinte, a percepção da novidade da ideia para o indivíduo determina a sua reação à mesma. Assim, se uma ideia parece nova para o indivíduo, é uma inovação. Rogers referiu que uma novidade não tem de implicar apenas novos conhecimentos, dado que alguém poderá ter conhecimento de uma inovação já algum tempo, mas ainda não desenvolveu uma atitude favorável ou desfavorável face à mesma. Descreve, também, que a novidade poderá ser manifestada pela forma de conhecimento, persuasão, ou uma decisão a adoptar. Neste sentido de reagir diante da possibilidade de adotar, ou não, uma inovação, torna-se

imperativo entender os atributos de uma inovação e relacioná-los com o efeito produzido na variação da taxa de adoção. Os atributos associados à possível adoção de uma inovação são: vantagem relativa; compatibilidade; complexidade; experimentação e observabilidade. Posteriormente, Rogers (2003) abordou os fatores que afetam a densidade de conexões entre os participantes no processo de difusão de inovação.

Vantagem relativa consiste no nível em que uma inovação é recebida como melhor do que a ideia que está a substituir. Segundo Rogers, esta determinação poderá ser feita em termos económicos, mas fatores como prestígio social, conveniência e satisfação são razões tidas em consideração. Quanto maior for a percepção da vantagem relativa de uma inovação, maior será a taxa de adoção.

Compatibilidade consiste no nível em que uma inovação é considerada consistente com os valores, experiências passadas e necessidades de potenciais adotantes. Ou seja, uma ideia que vá de encontro aos ideais de um sistema social será adotada mais rapidamente, enquanto que uma inovação que vá no sentido contrário requer a adaptação dos adotantes aos novos valores, o que pode levar algum tempo.

Complexidade consiste no nível em que compreensão da razão e utilidade de uma inovação. Assim, novas ideias que sejam mais simples de compreender são adotadas mais rapidamente, em comparação com inovações que requerem do adotante o desenvolvimento de novas competências.

Experimentação relaciona-se com o nível em que uma inovação pode ser experimentada numa base limitada, isto é, experimentar parceladamente. As inovações que permitem fasear a sua adoção em etapas tendem a ser adotadas mais rapidamente, em comparação com as que precisam de ser adotadas integralmente para serem aproveitadas.

Observabilidade consiste no nível de visibilidade perante os resultados da aplicabilidade de uma dada inovação aos demais potenciais adotantes. Neste âmbito, os resultados de uma inovação são visíveis para os outros, pelo que, quanto mais perceptíveis forem os resultados positivos de uma inovação para os potenciais adotantes, maior a probabilidade de a adotarem.

Segundo Rogers, os primeiros dois atributos – vantagem relativa e compatibilidade – são particularmente importantes para a taxa de difusão da inovação. Cada um desses atributos influencia a taxa de difusão, sendo ainda possível observar a natureza comunicacional em que Rogers se apoia para desenvolver esta teoria. Assim, este diz-nos que a taxa de difusão é influenciada a partir de um traço de percepção entre os potenciais adotantes, e destes relativamente à percepção do que seria adotar a nova tecnologia. Neste sentido, o processo de difusão da inovação poderá ser encarado como interdependente e não como um evento exclusivamente isolado. Rogers reforça que a experiência de um indivíduo com uma determinada inovação poderá influenciar a percepção deste sobre uma nova adoção no futuro. De acordo com Rogers, as inovações visíveis em que o indivíduo tem um grau de observação elevado levam a taxas de difusão mais elevadas.

Segundo Granovetter (1978), a adoção de uma dada inovação é tanto mais rápida quanto a variação do nível de limiar dos indivíduos do sistema social em causa. Isto

deve-se ao facto de um indivíduo se comprometer com um novo comportamento mediante a proporção de pessoas que já estão comprometidas no sistema social ao qual pertence. Assim, caso o sistema social tenha um nível de limiar considerado baixo (fácil adesão a inovações), a adoção da inovação ocorrerá rapidamente comparativamente a um nível de limiar elevado.

Canais de Comunicação

A essência do processo de difusão consiste na troca de informação através da qual um indivíduo comunica uma nova ideia a um ou vários outros indivíduos. Assim, um canal de comunicação é o meio através do qual as mensagens passam de um indivíduo para o outro. Se compreendermos a natureza da relação da troca de informação entre os indivíduos, saberemos melhor o que determina as condições em que uma fonte irá ou não transmitir a inovação para o receptor e o efeito dessa mesma transferência. Destaca-se, de igual modo, a influência dos meios de comunicação social, dado que estes apresentam uma maior rapidez e eficiência na passagem de informação a uma audiência de potenciais adoptantes sobre a existência de uma inovação. Neste sentido, os meios de comunicação criam consistência e conhecimento face à inovação a difundir. No entanto, é de salientar que os canais interpessoais são mais eficazes para persuadir um indivíduo a aceitar uma nova ideia, bem como a comunicação interativa. Por exemplo, salienta-se o caso específico da Internet que se tornou fundamental na difusão de certo tipo de inovações, demonstrando como a difusão é um processo social que envolve relações interpessoais.

A comunicação interpessoal tem um maior sucesso na difusão de novas tecnologias quando existe similaridade entre as unidades adotantes. Essa similaridade poderá ser expressa, no caso dos indivíduos, em semelhanças educacionais, socioeconómicas ou outro tipo de inclinações análogas, as quais contribuem para que o poder de persuasão e aceitação seja amplificado entre os mesmos.

Outro aspeto que Rogers defende, e que acentua a importância do papel da comunicação no processo de difusão, recai no facto dos indivíduos dificilmente avaliarem a inovação a partir de bases científicas. Por norma, apenas os primeiros indivíduos tendem a recorrer a bases científicas por forma a avaliar uma inovação. Para as etapas subsequentes da difusão da inovação, as avaliações subjetivas tem um carácter significativo como critério de adoção.

Tempo

O tempo constitui um dos elementos essenciais no processo de difusão. Como tal, a dimensão temporal está envolvida no processo de difusão em várias fases, definidas por Rogers (2003) como:

1. o processo de inovação/decisão pelo qual um indivíduo passa do conhecimento de uma inovação, para a formação da sua opinião e posteriormente para a sua adoção ou rejeição;
2. a inovação de um indivíduo ou outra unidade de adoção em comparação com outros membros do sistema;

3. a taxa de adoção de uma inovação num sistema.

No modelos a explorar na secção 2.1.2, salienta-se o instante a partir do qual o grupo de adotantes inicial começa a persuadir outros na adoção de uma inovação através da comunicação interpessoal.

Estágios do processo de decisão da adotar uma inovação

O processo de inovação/decisão compreende uma sequência composta por cinco fases:

1. **Conhecimento** da uma inovação por parte do sujeito;
2. **Persuasão** do sujeito pela formação de uma opinião sobre o valor de uma inovação;
3. **Decisão** como o processo pelo qual um sujeito adota ou rejeita uma inovação;
4. **Implementação** quando a inovação é posta em circulação;
5. **Confirmação** quando os sujeitos procuram informações que validem o valor da decisão tomada.

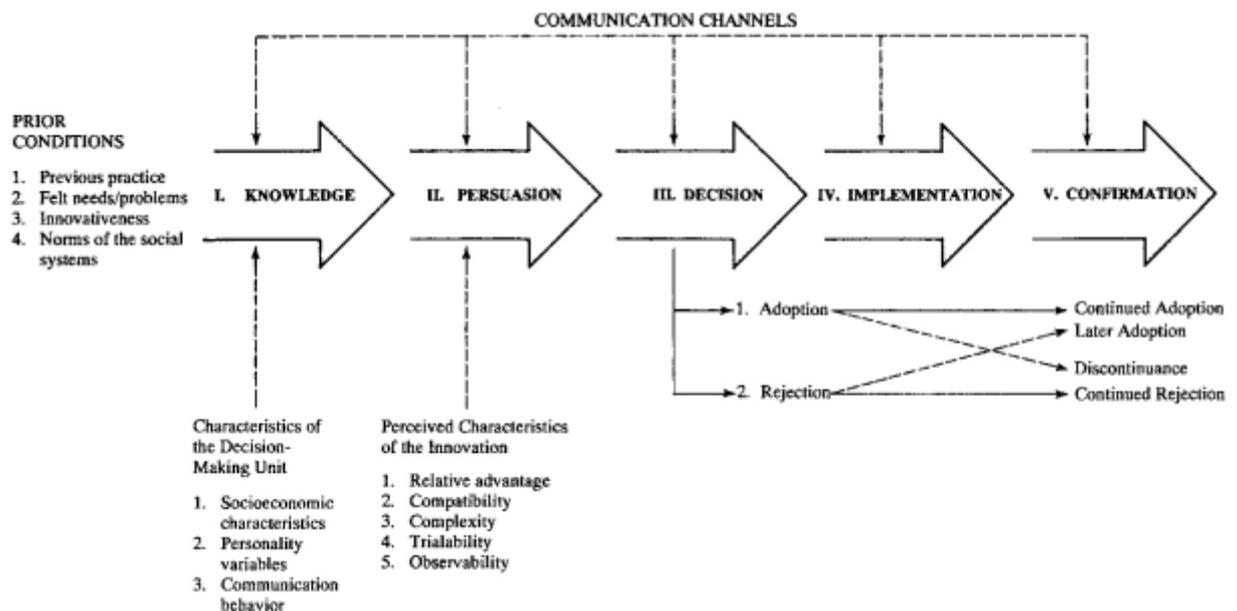


Figura 2.2: Ilustração do modelo dos cinco estágios no processo de inovação-decisão adaptado de Rogers

No decorrer do processo de inovação/decisão, os indivíduos constituintes do sistema social não adotam a inovação simultaneamente, mas de forma categórica, sendo mais profícuo utilizar categorias de adotantes que expressem a adoção de uma inovação como um processo incremental no tempo entre os membros do sistema social.

Sistema Social

O Sistema Social define-se como um conjunto de unidades inter-relacionadas e comprometidas em resolver problemas para alcançar um objetivo comum. Por sua vez, os membros ou as unidades de um sistema social podem ser indivíduos, grupos informais, organizações e/ou subsistemas. O processo de difusão de inovação que ocorre dentro de um sistema social depende da sua estrutura, pelo que se torna significativo avaliar o modo como a estrutura social do sistema afeta a difusão, o efeito de normas sobre a difusão, os agentes de mudança, os tipos de decisões de inovação e as consequências da inovação.

Rogers (2003) classifica os três principais tipos de decisões de inovação como: opcional; coletiva; e autoridade. Na decisão opcional de adotar uma inovação, o indivíduo é completamente autônomo nessa decisão, desprezando as decisões dos restantes indivíduos no sistema social. No caso da decisão coletiva, adotar ou rejeitar uma inovação depende do conjunto dos indivíduos que constituem o sistema social. Por fim, na decisão por autoridade, o grupo de indivíduos constituintes do sistema social possuem poderes, “status”, ou algum tipo de superioridade sobre os demais na adoção de uma inovação. A fusão de dois ou mais tipos de decisão relativa à adoção de uma inovação seria uma quarta categoria, embora não principal, denominada por decisão contingente.

Quando esta trajetória do processo de difusão da inovação é quantificada pela percentagem de adotantes ao longo do tempo, a sua representação revela uma curva cumulativa em forma de “S”. No início, somente algumas pessoas adotam a inovação e, como tal, a curva apresenta um crescimento lento. Progressivamente, à medida que mais pessoas adotam a inovação, a curva apresenta um crescimento exponencial. E, subsequentemente, como existem cada vez menos pessoas que ainda não adotaram a inovação, emerge um ponto de inflexão que estabiliza a curva num valor ≤ 1 . Existem diversas abordagens à modelação desta curva de inovação.

2.1.2. Modelos Padrão de Difusão de Inovação

Num comentário em 2004, Frank Bass, autor de um dos modelos de difusão de inovação mais usados, afirma que

Os modelos são abstrações e simplificações da realidade. Os modelos úteis captam a essência da realidade de uma maneira que melhora a nossa compreensão dos fenómenos (Bass, 2004).

A curva-S da inovação descreve a difusão de uma tecnologia, serviço ou produto mediante a evolução da percentagem de adotantes, $A(t)$. Essa percentagem corresponde à razão entre o número daqueles que adotam a tecnologia num determinado instante, $n(t)$, e o número total de potenciais adotantes, N . Assim,

$$A(t) = \frac{n(t)}{N} \quad (2.1)$$

Edwin Mansfield (1961) terá sido um dos primeiros a formular o problema que caracteriza os diversos factores envolvidos na difusão de uma inovação que leva à variação da sua adoção ao longo do tempo, dn/dt . Mansfield propõe que a proporção de

adotantes (e.g., empresas) que potencialmente aderirá à inovação, $\lambda(t)$, seja a razão entre a variação de adoção de uma inovação numa unidade temporal, de tal modo que $n(t+1) - n(t) \approx dn/dt$, e o número de adotantes que falta aderir à inovação,

$$\lambda(t) = \frac{dn/dt}{N - n(t)} \quad (2.2)$$

Posteriormente, Mansfield desenvolve esta proporção numa expansão de Taylor (cujos detalhes se encontram em Mansfield (1961)) com o intuito de que nessa série sejam incluídas as interacções entre três factores que afectam a difusão de inovação:

- a percentagem de adoção da inovação $(n(t)/N)$ ¹;
- o lucro obtido pela adoção da inovação;
- e o investimento necessário para adotar a inovação.

Agrupando nessa série os termos que não envolvem $n(t)/N$, p , e num factor q os que envolvem $n(t)/N$, Mansfield expressa $\lambda(t)$ como²

$$\lambda(t) = p + q \frac{n(t)}{N} \quad (2.3)$$

Mansfield designa q como a taxa de imitação, mas não oferece um significado para p . Considerando as relações propostas na Eq. (2.2) e Eq. (2.3), o problema que descreve a evolução de uma inovação formula-se como

$$\frac{dn(t)}{dt} = \left(p + q \frac{n(t)}{N} \right) N \left(1 - \frac{n(t)}{N} \right) \quad (2.4)$$

Depois, uma análise cuidada da solução que apresenta na sua Eq. (6) para Eq. (2.4), existe um erro porque ao dividir todos os termos por q , excluiu os termos exponenciais, pelo que a solução corrigida (obtida pelo Wolfram Mathematica) seria

$$n(t) = \frac{N (e^{(p+q)t+b} - p)}{e^{(p+q)t+b} + q} \quad (2.5)$$

em que b é uma constante de integração. Mansfield procura simplificar esta relação, mas comete diversas imprecisões que aqui se esclarecem para explicar como chega ao resultado fundacional que apresenta na sua Eq. (9) para explicar matematicamente a difusão de inovação. Mansfield obtém essa solução considerando que se fossemos atrás no tempo, o número de adotantes deverá tender para zero, explorando o limite $t \rightarrow -\infty$, quando o mais correcto seria o que Bass (1969) fez oito anos depois. Isto é, considerar como fronteira o instante de lançamento da inovação onde $\lim_{t \rightarrow 0} n(t) = 0$.

¹No artigo original, este termo usa uma nomenclatura diferente, $m_{ij}(t)/n_{ij}$, em que i corresponde a uma determinada empresa e j a uma determinada inovação.

²Note-se que p no artigo de Mansfield é referido como Q_{ij} e q como ϕ_{ij} . A razão desta adaptação deve-se à semelhança existente, e pouco ou nada reconhecida, entre esta formulação e o modelo de Bass (1969).

Neste caso, a constante $b = \ln(p)$ que levaria ao mesmo resultado que Bass propôs em 1969. Porém, na prática, a solução de Mansfield só faz sentido se o factor p , ao qual não atribui significado, for considerado nulo na Eq. (2.4), cuja formulação corresponde a

$$\frac{dA(t)}{dt} = qA(t) \cdot (1 - A(t)) \quad (2.6)$$

e cuja solução resolvida para $A(t)$ iguala à que apresenta em 1961:

$$A(t) = (1 + e^{-q(t-t_0)})^{-1} \quad (2.7)$$

com $t_0 = b/q$ significando o ano inicial da difusão da inovação, sendo esta conhecida como a curva logística que caracteriza os primeiros desenvolvimentos na descrição da curva de inovação. Outros como Stoneman (2002) usaram o conceito de propagação de uma epidemia cuja formulação da evolução que descreve a curva da inovação oferece uma leitura diferente, formulada como

$$\frac{dA(t)}{dt} = \frac{\phi\vartheta}{N^2} A(t) \cdot (1 - A(t))^{-1} \quad (2.8)$$

considerando ϕ como a probabilidade de alguém ser influenciado ao ponto de adquirir uma nova tecnologia, ϑ como a probabilidade do contacto entre um utilizador e um não-utilizador ser efectiva na adoção da nova tecnologia, e note-se também que o termo $1 - A(t)$ aparece invertido nesta formulação. Porém, a Eq. (2.8) é igual à formulação simplificada de Mansfield na Eq. (2.6) porque se multiplicarmos e dividirmos essa por $(1 - A(t))$, no numerador aparecem dois termos de segunda e terceira ordem ($A(t)^2, A(t)^3$) que podem ser desprezados como verificado por Mansfield (1961). Devido a esta igualdade, a analogia da difusão de inovação ao modelo epidémico resulta na mesma solução logística obtida no modelo baseado na taxa de imitação q . Contudo, na analogia epidémica, há uma sugestão de correção interpretativa. Isto é, os termos ϕ e ϑ são considerados como probabilidades, mas como $\frac{\phi\vartheta}{N^2} = \frac{\phi}{N} \cdot \frac{\vartheta}{N}$, da mesma forma de $A(t) = \frac{n(t)}{N}$ corresponde à percentagem de novos adotantes, sugere-se que $\Phi = \frac{\phi}{N}$ seja a percentagem de potenciais adotantes influenciados a adotar a inovação e $\Theta = \frac{\vartheta}{N}$ seja a percentagem de contactos efectivos entre utilizadores com não-utilizadores que adotarão a inovação. Assim, a síntese do modelo original de Mansfield (1961) com a proposta de Stoneman (2002) oferece a seguinte chave de leitura: a taxa de imitação é o produto entre a influência e a interactividade

$$q = \Phi \cdot \Theta \quad (2.9)$$

Contudo, na revisão que Lechman et al. (2016) faz do modelo de Stoneman, q é designado antes como *taxa (velocidade) de difusão* ao passo que no modelo de Mansfield q associado a $A(t)$ é designado como taxa de imitação, existindo alguma diversidade interpretativa quanto ao significado de cada parâmetro. Porém, Geroski (2000) fez uma crítica aos modelos epidémicos expressos pela Eq. (2.7) porque não produzem o efeito inicial de crescimento mais lento que leva à produção da típica curva-S. Geroski (2000) sugere incluir-se o *passa-palavra (word of mouth)* da informação no processo de difusão, onde um conjunto de utilizadores inicial interage, independentemente, com um conjunto de não-utilizadores, influenciando-os na adoção da inovação. Neste caso, ao contrário do pressuposto de Mansfield onde $n(t \rightarrow 0) = 0$, existe um número

de adotantes inicial $n(0) = n_0$ que tem uma probabilidade de contacto β com não-utilizadores, de tal modo que q na Eq. (2.6) expressa-se como $q = \beta N$, ou seja, como a influência da probabilidade do contacto do grupo n_0 no número total de potenciais adotantes. A solução considerando um número inicial de adotantes e um significado diferente para q expressa-se como

$$A(t) = (1 + (A_0^{-1} - 1)e^{-qt})^{-1} \quad (2.10)$$

com $A_0 = A(0) = n_0/N$. Geroski (2000) reconhece que um modelo mais próximo da realidade seria incluir no anterior, o período de adoção por parte do grupo n_0 . Para isso, sugere uma mistura simples aditiva entre a fonte central que adere inicialmente à adoção e os que adotam por contacto, obtendo-se um termo semelhante a $\lambda(t)$ na Eq. (2.3), formulação igual à Eq. (2.4), mas cuja condição inicial passa a ser $A(0) = 0$, o resultado acaba por ser o conhecido modelo de Bass (1969)

$$A(t) = \frac{1 + \exp(-(p+q)t)}{1 + \frac{q}{p} \exp(-(p+q)t)} \quad (2.11)$$

em que p corresponde ao coeficiente de inovação que mede o impacto da exposição externa na taxa de adoção, e q ao coeficiente de imitação que mede a proporção de adotantes iniciais que influenciam outros a adotar a inovação. Neste caso, existe alguma coerência entre os significados de Bass (1969) e Geroski (2000), mas não deixa de ser curioso que Geroski não dá crédito a Bass apesar da igualdade entre os modelos. Por outro lado, ao voltar à condição inicial de Mansfield, a informação sobre o tempo mínimo para atingir n_0 , t_0 perde-se. Assim, caso fosse usada $A(t_0) = A_0$, a solução obtida com o Wolfram Mathematica seria mais completa do que o modelo de Bass e igual a

$$A(t) = \frac{1 - \zeta \exp(-(p+q)(t-t_0))}{1 + \psi \exp(-(p+q)(t-t_0))} \quad (2.12)$$

$$\zeta = \frac{p(1-A_0)}{p+qA_0} \quad (2.13)$$

$$\psi = \frac{q(1-A_0)}{p+qA_0} \quad (2.14)$$

que se iguala ao modelo de Bass da Eq. (2.11) quando t_0 e A_0 forem nulos.

No modelo da difusão de Bass (1969), um novo produto/serviço ou ideia difunde-se entre os membros constituintes de uma população, fornecendo respostas plausíveis à incerteza associada à introdução desse mesmo produto/serviço no mercado. O modelo da difusão de Bass depreende que os potenciais adoptantes de uma dada inovação são influenciados por dois tipos de canais de comunicação: *i*) meios de comunicação de massa e; *ii*) canais interpessoais. Os indivíduos os quais adoptam um novo produto/serviço na consequência de uma mensagem dos meios de comunicação de massas, apesar da sua divulgação contínua ao longo do processo de difusão, mas concentra-se nos períodos de tempo iniciais, como evidenciado na Fig. 2.3. Por outro lado, os indivíduos que adoptam um novo produto/serviço em resultado de mensagens interpessoais, tendem a aumentar em número durante a primeira metade do processo de difusão diminuindo em número nos períodos subsequentes, como evidenciado na Fig. 2.3. Assim, o modelo de difusão de Bass deduz que a taxa de adoção na primeira fase é simétrica à

da segunda fase, resultando numa curva em forma de S. No fundo, este modelo assenta na premissa de que a taxa de adoção diminui à medida que diminui a proporção de adotantes potenciais que ainda não adotaram a inovação.

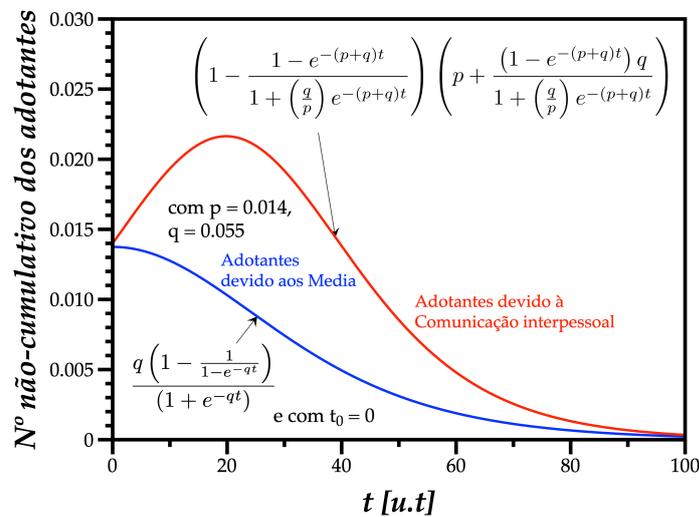


Figura 2.3: Interpretação dos modelos de Bass da Eq. (2.11) e o de Geroski da Eq. (2.10) ilustrando a diferença entre os efeitos da difusão da inovação pelos Media e quando existe comunicação interpessoal.

Quando a taxa de imitação q é elevada, a inovação tende a disseminar-se mais rapidamente entre os consumidores. Isto é, quanto mais consumidores adotarem a inovação, maior será a probabilidade de que outros consumidores também a adotem, acelerando a taxa de adoção. Caso q apresente um valor baixo, a disseminação da inovação ocorre mais lentamente, visto que a adoção tende a depender da publicidade externa. Os modelos de difusão de Bass e Geroski estão relacionados na medida em que abordam a ideia da adoção do processo de difusão de inovação depender de fatores internos e externos. Para além desse aspecto, ambos destacam a importância da comunicação para a disseminação da inovação, seja por via interna ou externa.

No que diz respeito às limitações, o modelo de difusão de Bass evidencia três limites conceptuais. Em primeiro lugar, o modelo assume que a taxa de imitação q permanece constante durante todo o período de penetração. No entanto, esta suposição é inconsistente, pois segundo a revisão que Kotler (1971) faz dos diversos modelos, q deverá diminuir ao longo do decorrer do processo de difusão, uma vez que os potenciais adotantes restantes são menos sensíveis ao produto e às comunicações associadas. Em segundo lugar, o modelo de Bass pressupõe que a taxa máxima de penetração alcançada para qualquer difusão de inovação, não poderá ocorrer posteriormente a uma inovação ter penetrado em 50% do seu mercado potencial. Contudo, para que o modelo de difusão seja flexível, e capaz de se ajustar a vários padrões de difusão da inovação, é crucial que esse corresponda ao protótipo específico da difusão da inovação, sendo legítimo que o ponto de inflexão ocorra na fase anterior ou posterior do desenvolvimento. Por último, a terceira limitação decorrente do modelo de Bass baseia-se no princípio de que, para qualquer inovação, a curva de difusão é simétrica. Isto significa que o padrão da difusão após o ponto de inflexão seria a imagem espelhada do padrão de difusão anterior ao ponto de inflexão. Segundo Rogers (2003), espera-se que os adotantes tardios que possuem características diferentes dos adoptantes iniciais, respondam de forma diferente

e, como tal, os modelos de difusão deverão ter em conta esse facto.

Apesar de o modelo de difusão de Bass ter sido amplamente utilizado para descrever a propagação de inovações, este apresenta algumas limitações. Por forma a superar algumas das limitações e obter uma compreensão mais abrangente do processo de difusão da inovação recorreu-se à transmissão de calor. Dado que, a condução transiente é um conceito fundamental na transferência de calor, o qual descreve como a temperatura varia no decorrer do tempo num sistema.

Identicamente como o calor se propaga por meio da condução transiente num qualquer objeto, a inovação também se propaga por intermédio de um processo o qual envolve tempo e a penetração espacial. Assim, a aplicação dos princípios da condução transiente ao estudo da difusão da inovação, permitem obter uma visão mais abrangente dos mecanismos subjacentes.

Por seu lado, a condução transiente considera a variação temporal da temperatura e como a mesma se propaga espacialmente no sistema. De igual forma, na difusão da inovação a propagação de um produto/serviço, também, é influenciada por fatores temporais e espaciais. Assim, a incorporação do fator espaço-temporal no estudo do processo da difusão da inovação, possibilita a captura de padrões, os quais não seriam possíveis recorrendo apenas a modelos temporais. A integração do conceito da transmissão de calor com o conceito de difusão da inovação, fornece uma compreensão do fenómeno diferenciada, conduzindo ao desenvolvimento de estratégias mais eficazes e próximas da realidade.

Na próxima secção, será apresentado em detalhe os conceitos da transmissão de calor relacionados à condução transiente, salientando a aplicabilidade desta na análise da difusão da inovação e as suas contribuições para impulsionar a mesma.

2.2. Transmissão de Calor por Condução

A transmissão de calor compreende um processo pelo qual a energia térmica é transferida entre corpos ou meios a diferentes temperaturas. Existe três mecanismos com que o calor se transmite. A radiação por ondas eletromagnéticas, e a convecção pelas trocas de calor entre um escoamento e uma interface, são modo de transmitir o calor em superfícies. O terceiro mecanismo actua quando o calor se transmite por difusão molecular em materiais cuja velocidade dos seus constituintes se considera nula. O modo que transmite o calor por difusão é a *condução*. Será este modo em regime transiente, isto é, quando a transferência de energia altera no tempo a temperatura do material que será aqui introduzido como analogia que viabiliza desenvolver um novo modelo que pretende explicar a difusão da inovação. Esta analogia será detalhada no capítulo 3. Esta secção sintetiza a forma como descrevemos, fisicamente, a transmissão de calor por condução, de modo a estabelecer as bases de compreensão da analogia a propor.

O fenómeno de transmissão de calor por condução descreve-se a partir da conservação de energia interna de um sistema ($E_i[J]$) que varia no tempo se houver trocas na fronteira. No modelo a desenvolver nesta secção considera-se não haver geração interna de energia, nem mudança de fase, e que as trocas de calor na fronteira ocorrem

por convecção e são descritas pelo coeficiente de transmissão de calor por convecção $h [W \cdot m^{-2} K^{-1}]$. A conservação de energia expressa-se como o equilíbrio entre a energia que varia no interior do sistema (dE_i/dt) e as trocas de calor no fronteira

$$\frac{dE_i}{dt} = q_{in} - q_{out} \quad (2.15)$$

em que $q_{in} [W \equiv J/s]$ corresponde à potência térmica que entra no sistema e q_{out} à potência térmica que sai pela fronteira do sistema. Assumindo não haver variação de massa no sistema ao longo do tempo, a energia interna está relacionada com:

- a variação da temperatura (T) numa massa $m = \rho V$ (em que ρ corresponde à massa volúmica e V ao volume do sistema),
- através da propriedade do *calor específico* a volume constante, c_v , que em líquidos e sólidos é, praticamente, igual ao calor específico a pressão constante, pelo que $c_v \approx c_p \approx c$,

expressando-se, por isso, como $dE_i = \rho V c dT$. Logo, o balanço de energia a considerar na análise formula-se como

$$\rho V c \frac{dT}{dt} = q_{in} - q_{out} \quad (2.16)$$

Em geral, a variação da temperatura num material por condução é uma função espaço-temporal, $T(t, x)$, simplificando já a variação espacial a uma só dimensão (x). Porém, existem condições em que as variações espaciais são desprezáveis face às temporais que ocorrem sempre numa condição de condução de calor transiente. De modo a discernir se a temperatura é apenas uma função temporal $T(t)$ ou espaço-temporal $T(t, x)$, importa introduzir o número adimensional de Biot.

2.2.1. Número de Biot

Existem duas Leis na transmissão de calor que estão na base da definição do número de Biot (ver mais detalhes em Panão and Panão (2021)). A Lei de Fourier que relaciona o fluxo de calor $q'' [W/m^2]$ com a variação espacial da temperatura

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.17)$$

onde $k [W \cdot m^{-1} K^{-1}]$ corresponde à capacidade de um material *conduzir* o calor e designa-se por condutibilidade térmica, e o sinal negativo serve somente para que o fluxo seja positivo no sentido do fluir da energia, uma vez que sendo esta transmitida da matéria que tem mais para a que tem menos, $dT/dx < 0$. A outra é a Lei de Newton para quantificar a transmissão de calor por convecção como

$$q'' = h(T - T_\infty) \quad (2.18)$$

com h como o coeficiente de convecção empírico e obtido através de correlações, e T_∞ como a temperatura do escoamento que troca calor com a superfície à temperatura T . Uma interface (área) tem, naturalmente, volume nulo, logo, a aplicação de um balanço de energia da Eq. (2.16) a uma interface implica que $q_{in} = q_{out}$. Considerando:

- *in* o lado em que a energia se transmite por condução,
- *out* o lado em que se transmite por condução,
- e que os gradientes de temperatura no material são lineares, $\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1}$, com $L = x_2 - x_1$

na interface, quantitativamente,

$$q''_{cond} = q''_{conv} \Leftrightarrow k \frac{T_1 - T_2}{L} = h(T - T_\infty)$$

onde $T_1 > T_2$ e $T > T_\infty$. Se esta relação for resolvida de modo a colocar à esquerda tudo o que tem a ver com a temperatura resulta em

$$\frac{T_1 - T_2}{T - T_\infty} = \frac{hL}{k} = \text{Bi} \quad (2.19)$$

com Bi como o número de Biot. Para explicar o seu significado físico, é necessário expressar a potência térmica como a relação entre um potencial para a energia fluir obtido como uma diferença de temperatura (ΔT [K]) e tudo o resto compõe a resistência térmica a esse fluir (R_t [K/W]),

$$q = \frac{\Delta T}{R_t}$$

que:

- no caso da condução de calor, partindo da Lei de Fourier se expressa como

$$R_{t,cd} = \frac{L}{kA} \quad (2.20)$$

- e no caso da convecção de calor, partindo da Lei de Newton se expressa como

$$R_{t,cv} = \frac{1}{hA} \quad (2.21)$$

com A como a área de troca de calor. Relacionando a resistência da condução em relação à convecção

$$\frac{R_{t,cd}}{R_{t,cv}} = \frac{\frac{L}{kA}}{\frac{1}{hA}} = \frac{hL}{k} = \text{Bi}$$

obtem-se o número de Biot e explica-se o seu significado físico. Se $\text{Bi} \ll 1$, implica pela Eq. (2.19) que $T_1 - T_2 \ll T - T_\infty$, pelo que $T_1 \approx T_2$ e a temperatura varia essencialmente com o tempo $T(t)$. Se $\text{Bi} \gg 1$, implica o contrário e não se podem desprezar as variações espaciais da temperatura associados à difusão de calor por condução, pelo que a temperatura possui uma variação espaço-temporal $T(t, x)$.

A partir daqui existem formulações diferentes para saber como varia a temperatura em condições de condução transiente. Em primeiro lugar considera-se o caso em que a temperatura possui apenas uma variação temporal. O método mais comum designa-se por Método da Capacitância Global, mas este implica que o coeficiente de convecção seja constante. Em Panão (2023), apresentou-se uma interpretação nova que considera a possibilidade de h ser constante ou variar temporalmente, introduzido como *Método da Capacitância Global com Atraso Térmico*, uma abordagem relevante para validar a analogia entre a difusão de calor e a difusão de inovação.

2.2.2. Método da Capacitância Global com atraso

No Método da Capacitância Global, com h constante, o balanço energético de acordo a Eq. (2.16) implica que

- $q_{in} = hA(T_{\infty} - T(t))$ se $T_{\infty} > T(t)$, logo $q_{out} = 0$;
- ou $q_{out} = hA(T(t) - T_{\infty})$ se $T(t) > T_{\infty}$, logo $q_{in} = 0$;

pelo que, em ambos os casos, a Eq. (2.16) simplifica-se em

$$\frac{dT(t)}{dt} = \tau^{-1}(T_{\infty} - T(t)) \quad (2.22)$$

com $\tau [s] = \frac{\rho V c}{hA}$ como resposta temporal do sistema à perturbação térmica que faz variar a sua temperatura no tempo. Esta resposta temporal é um produto de duas características térmicas do sistema,

$$\tau = \rho V c \cdot \frac{1}{hA} = C_t \cdot R_{t,cv}$$

em que C_t corresponde à *capacitância térmica* associada à capacidade de um material armazenar calor (e daí o nome deste método), e $R_{t,cv}$ corresponde à resistência térmica por convecção explicada anteriormente. Habitualmente, este problema resolve-se em transmissão de calor fazendo $\theta(t)$ corresponder à diferença de temperatura entre o material e a do ambiente que troca calor com esse, $\theta(t) = T(t) - T_{\infty}$. Porém, com vista à analogia com a difusão da inovação, Panão (2023) propõe considerar-se antes a razão das temperaturas como $\varphi(t) = \frac{T(t)}{T_{\infty}}$. Assim, a Eq. (2.22) seria formulada como

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \tau^{-1}(1 - \varphi(t)) \quad (2.23)$$

e a solução considerando a condição inicial $\varphi(0) = T(0)/T_{\infty} = \varphi_0$ resulta em

$$\varphi(t) = 1 - (1 - \varphi_0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.24)$$

Salienta-se que as temperatura em $\varphi(t)$ deverão estar sempre em Kelvin. Se $\varphi_0 < 1$, o material aquece até atingir o equilíbrio térmico $\varphi(t \rightarrow \infty) = 1$, e arrefece até à mesma condição caso $\varphi_0 > 1$. Na abordagem convencional deste método que considera $\theta(t)$ em vez de $\varphi(t)$, sabendo que $\varphi(t) = 1 + \frac{\theta(t)}{T_{\infty}}$, substituindo esta relação na Eq. (2.24) obtém-se a solução convencional do Método da Capacitância Global como

$$\frac{\theta(t)}{\theta_0} = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.25)$$

com $\theta_0 = \theta(0) = T(0) - T_{\infty}$. Porém, esta solução para as condições em que $Bi \ll 1$ não admite qualquer atraso à variação da temperatura que implicaria haver um ponto de inflexão. Fisicamente, Panão (2023) alerta que isso apenas aconteceria caso o coeficiente de convecção variasse com o tempo. Algo que só poderia provir de um efeito da temperatura sobre as condições empíricas de determinação desse coeficiente. Assim,

assumindo a possibilidade de $h(t)$ variar com o tempo, de tal modo que τ deixasse de ser constante, a formulação da Eq. (2.23) alteraria. Assim, considere que, empiricamente,

$$h(t) = C\varphi(t) \quad (2.26)$$

em que C corresponde à escala de variação do coeficiente de convecção e mantém-se constante. Neste caso,

$$\tau(t) = \frac{\rho V c}{C\varphi(t)A} \quad (2.27)$$

e a Eq. (2.23) habitual passaria a

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = q\varphi(t)(1 - \varphi(t)) \quad (2.28)$$

com $q [s^{-1}] = \frac{CA}{\rho V c}$ como a velocidade constante de variação do coeficiente de convecção. Neste caso, o Método da Capacitância Global *com Atraso Térmico*, com a variação temporal da resistência térmica da convecção associada à variação da temperatura da superfície a produzir impacto sobre a evolução da temperatura, resulta numa solução que permite descrever sistemas que possam ter um atraso na resposta à perturbação térmica

$$\varphi(t) = (1 + (\varphi_0^{-1} - 1)e^{-qt})^{-1} \quad (2.29)$$

Uma outra possibilidade ser que h fosse uma função somente do tempo e não de $\varphi(t)$, por exemplo, $h = C \cdot t^b$. Neste caso, a solução da Eq. (2.23) com $\tau^{-1} = q \cdot t^b$ seria

$$\varphi(t) = 1 - (1 - \varphi_0) \exp\left(-\frac{q \cdot t^{b+1}}{b+1}\right) \quad (2.30)$$

De acordo com Panão (2023), ambas Eqs. (2.29) and (2.30) possuem a possibilidade de captar um atraso térmico inicial na evolução da temperatura, embora apliquem o Método da Capacitância Global. Do ponto de vista da analogia desta abordagem à descrição da curva de inovação, o método será designado por Condução Transiente Temporal (CTT), enquanto que a abordagem descrita na próxima secção será designada por Condução Transiente Espaço-Temporal (CTET).

2.2.3. Condução transiente com variação espaço-temporal da temperatura

Quando a resistência térmica à condução é significativamente superior à resistência térmica convectiva, $Bi \gg 1$, a variação da temperatura não ocorre apenas no tempo, mas também no espaço. Neste caso, usando as variações de potência térmica na fronteira, e restringindo a análise à condução uni-dimensional, e assumindo que as propriedades termofísicas mantêm-se constantes, o problema de transmissão de calor formula-se como

$$\frac{\partial T(t, x)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(t, x)}{\partial x^2} \quad (2.31)$$

Por forma a compreender e prever o processo de difusão da inovação recorre-se a soluções aproximadas onde se assume a condição inicial como sendo de temperatura

uniforme. Contudo essa abordagem pressupõem que a inovação é adotada homoganeamente em toda a população não tendo em consideração outros fatores, os quais poderão influenciar no processo de difusão da inovação. Assim, para o caso concreto da difusão da inovação essa abordagem não reproduz o esperado, isto é, embora as soluções aproximadas sejam amplamente utilizadas, para este caso específico não reproduzem o comportamento de forma fidedigna da difusão da inovação. Por conseguinte, para analisar a difusão da inovação é indispensável o reconhecimento das limitações das soluções aproximadas e considerar as condições específicas do contexto desta.

Os autores investigaram a difusão da inovação tendo em consideração um modelo de condução transiente. Assim, embora, a contribuição deste tenha sido notória para a compreensão do processo da difusão da inovação, não foi apresentada nenhuma razão explícita para a utilização deste modelo. Posto isto, propomos uma abordagem mais abrangente, tendo em consideração a heterogeneidade de diversos fatores.

A difusão da inovação destaca-se como um fenómeno temporal, no qual as novas ideias se espalham no decorrer do tempo. No entanto, o processo de difusão da inovação poderá ocorrer simultaneamente numa outra vertente, pela penetração espacial da inovação. Por sua vez, este vertente é muitas vezes negligenciada, conduzindo a possíveis limitações na capacidade de previsão do modelo. Assim, ao considerar tanto a dimensão temporal como a dimensão espacial, estamos a diminuir a imprecisão do modelo.

A incorporação da abordagem espaço-temporal no modelo, permite a integração da condição inicial, reconhecendo a importância desta e a sua influência na análise do processo de difusão da inovação. A escolha adequada desta é fulcral para modelar o processo de difusão de inovação de forma precisa. Assim, espera-se obter uma compreensão mais profunda e completa da difusão, permitindo uma melhor ajuste e precisão da curva de adoção.

Tendo em mente a analogia entre a condução transiente e a difusão da inovação, uma condição inicial relevante seria o caso de considerar a difusão de calor num espaço infinito ($-\infty < x < \infty$) em que no início ($t = 0$), uma determinada região ($|x| < a$) está a uma temperatura constante T_0 e T_x fora dessa região ($|x| > a$). Neste caso, Carslaw and Jaeger (1959) apresentam a solução analítica baseada no trabalho de Lovering (1935) que, relativizada pela temperatura ambiente T_∞ , se expressa como

$$\varphi(t, x) = \varphi_x + \frac{\varphi_0}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{a(1 - \xi)}{2\sqrt{\alpha t}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{a(1 + \xi)}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \right] \quad (2.32)$$

em que $\xi = x/a$, $\alpha [m^2/s] = \frac{k}{\rho c}$ corresponde à difusividade térmica que relaciona a capacidade do material conduzir o calor ($k [W \cdot m^{-1}K^{-1}]$, condutibilidade térmica) e a capacidade de o armazenar ($\rho [kg/m^3]$, massa volúmica; $c [J \cdot kg^{-1}K^{-1}]$, calor específico). A Fig. 2.4 mostra um exemplo de aplicação desta relação, de onde se pode visualizar os efeitos de cada parâmetros que nos ajuda a compreender o seu papel nesta solução.

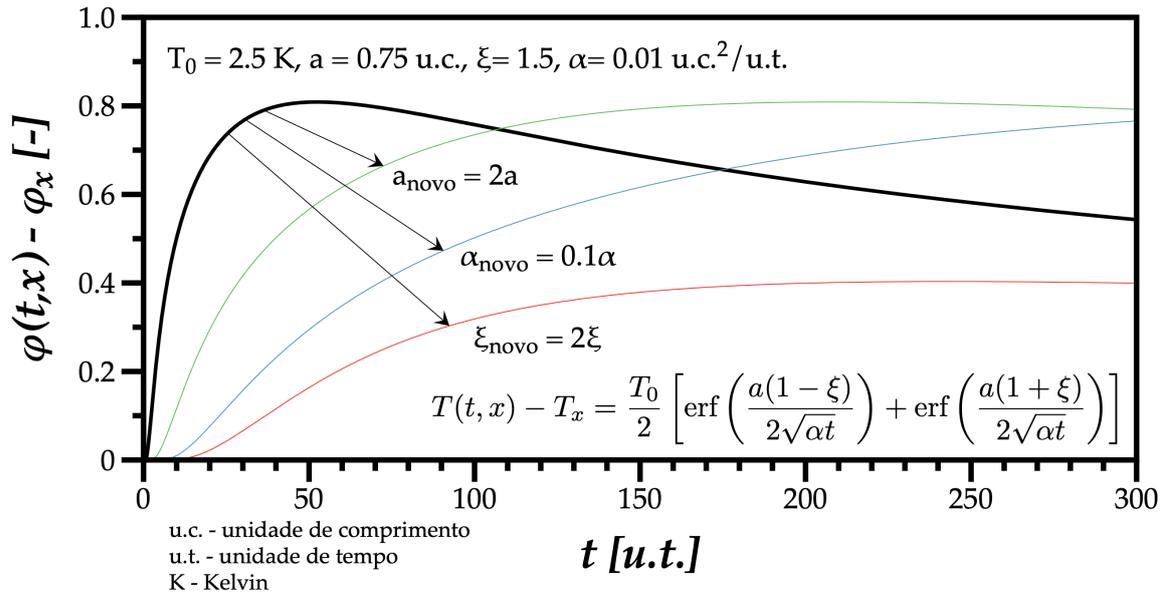


Figura 2.4: Exemplo de aplicação da Eq. (2.32) incluindo os efeitos de cada parâmetro sobre a evolução temporal de $T(t,x) - T_{\infty 0}$.

Uma diminuição da difusividade térmica desacelera a evolução da temperatura. Uma aumento da região associada à condição inicial (a) torna o crescimento inicial mais lento, assim como atrasa a ocorrência da diferença máxima de temperatura. Na Fig. 2.4, um aumento da relação entre a posição de temperatura avaliada relativamente ao tamanho da região, implica que a evolução se afasta da zona da condição inicial, desacelerando a evolução da diferença de temperatura, assim como a magnitude da mesma. Porém, o parâmetro ξ está também relacionado com a forma da evolução de temperatura, como ilustra a Fig. 2.5, onde ξ varia de 0 a 10.

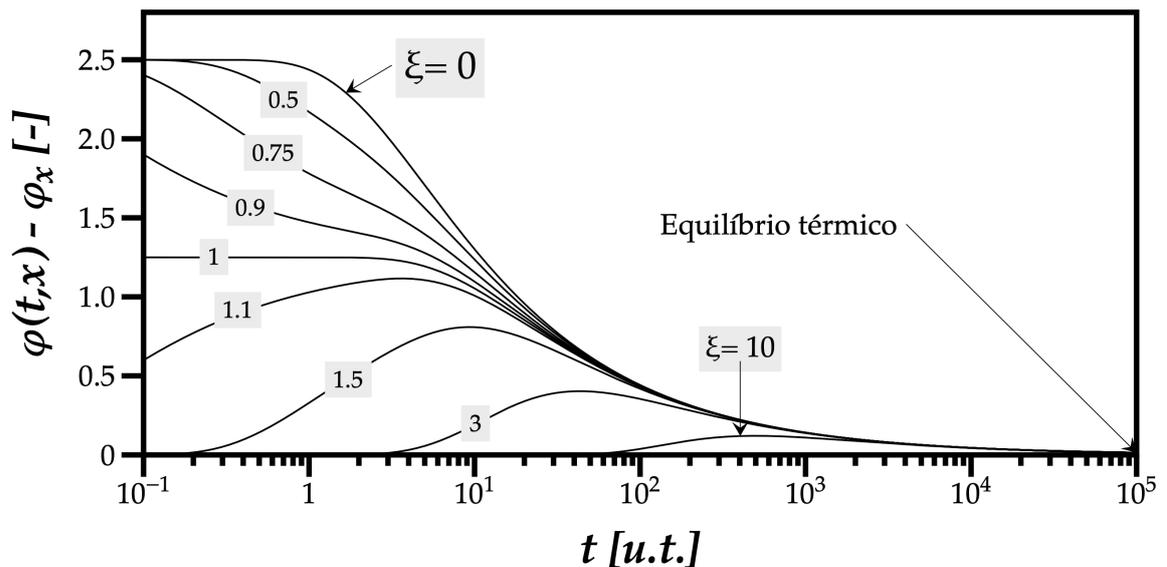


Figura 2.5: Efeito da posição analisada x relativamente ao tamanho da região da condição inicial a , $\xi = x/a$ na forma da evolução da temperatura desde os primeiros instantes até se atingir o equilíbrio térmico.

É de notar que na Eq. (2.32), se a passasse para dentro da raiz quadrada em denominador, obtinha o número adimensional de Fourier, $Fo = \frac{\alpha t}{a^2}$ que compara cada instante t com a escala de tempo de penetração da perturbação térmica até ao limite da região da condição inicial, $\frac{a^2}{\alpha}$. Existem outras soluções para o problema de condução transiente formulado na Eq. (2.31), mas a explorada no final deste capítulo é a que mais se adequa à analogia pretendida com a difusão de inovação, como será explicado no próximo capítulo.

3. Analogia e Metodologia

Difusão é um mecanismo de transmissão de algo através da proximidade entre os elementos que são afectados por aquilo que se pretende transmitir. Assim, a primeira analogia seria entre o calor e a inovação propriamente dita. Depois, do mesmo modo que a temperatura é uma medida indirecta da energia, também o número de adotantes é uma medida do carácter inovador de uma ideia, tecnologia, serviço ou qualquer outro tipo de inovação. O primeiro trabalho que estabelece esta analogia é de Diakonova et al. (2020) que, na prática, aplica a afirmação de Bass (2004) do modelo ser uma abstracção e simplificação da realidade, tomando a semelhança entre o formato da curva obtida pela difusão de calor e difusão da inovação como base para estabelecer, matematicamente, a devida analogia. Mais tarde, Diakonova et al. (2021) questiona –

«Seria mais justo escolher para descrever o processo de difusão de inovações alguma outra curva em forma de S com as propriedades acima, por exemplo, a função *erfz* bem conhecida ou a integral de probabilidade?»

E responde com o trabalho anterior (Diakonova et al., 2020) dizendo terem mostrado a exequibilidade da analogia. Porém, nenhum dos dois trabalhos apresenta qualquer aplicação do modelo de condução transiente na descrição de qualquer inovação ou infere sobre os valores assumidos pelas diferentes propriedades inovativas (por analogia a termofísicas) do sistema. Neste capítulo faz-se uma crítica à analogia apresentada por Diakonova et al. (2020, 2021) e apresentam-se razões da validação dessa analogia que não sejam somente por semelhança entre o formato das curvas.

A palavra “difusão” vem do latim *diffio* (-onis), que significa a ação de *espalhar*. A analogia entre o processo físico de difusão e o processo sociológico associado a uma inovação é apropriada por três razões:

1. **Propagação:** À semelhança da energia que flui pelas partículas em um sistema físico, as inovações disseminam-se entre indivíduos em um sistema social.
2. **Taxa de Adoção:** Assim como a energia transmitida num material pode ocorrer a diferentes velocidades dependendo das suas propriedades, também a taxa de adoção das inovações pode variar dependendo de vários fatores, como a natureza da própria inovação, canais de comunicação, tempo e o sistema social.
3. **Equilíbrio:** Num sistema fechado, a difusão continua até que a energia se distribua uniformemente pelo material, atingindo-se o designado por equilíbrio térmico. Da mesma forma, num sistema social, o processo de difusão continua até

que a inovação seja adotada por todos os membros (ou até que chegue a um ponto em que não é provável que haja mais novos adotantes).

Os modelos logísticos de caracterização de uma difusão são, essencialmente, modelos temporais, sem terem em conta efeitos espaciais, tal como acontece com o modelo da capacitância global com atraso térmico (ver secção 2.2.2). Porém, Heidenreich (2012) dedica a segunda parte deste livro ao efeito da distribuição espacial nas redes de inovação e respectiva difusão, pelo que um modelo como a condução transiente uni-dimensional, considerando variações espaço-temporais da energia, poderia servir, realmente, de analogia como propôs Diakonova et al. (2020). Porém, a explicação aqui proposta está na consideração do efeito temporal como de primeira ordem ($\partial/\partial t$), enquanto o efeito espacial seria de segunda ordem ($\partial^2/\partial x^2$), ou seja, denota a influência que pontos vizinhos têm uns sobre os outros na difusão do calor ou da inovação, tal como expressa a comunicação interpessoal.

3.1. Analogia paramétrica entre Difusão de Inovação e Difusão de Calor

Qual a correspondência, por analogia, de uma propriedade termofísica ou característica do sistema quando aplicada na descrição da difusão de uma inovação? Uma adequada interpretação do significado de cada parâmetro será essencial na posterior análise dos resultados obtidos aquando do ajuste da evolução da taxa de adoção de uma inovação a uma curva que depende desses parâmetros. A Tabela 3.1 estabelece a analogia entre parâmetros usados na transmissão de calor e o respectivo correspondente na difusão da inovação.

Tabela 3.1: Analogia entre parâmetros da condução de calor e da difusão de inovação

Difusão de Calor	→	Difusão da Inovação
Energia interna, E_i [J]	→	Inovação [In]
Temperatura, T [K]	→	Percentagem de adotantes [Ad]
Massa, m [kg]	→	Contatos [Co]
Comprimento, x [x]	→	igual [u.c.] = unidade de comprimento
Tempo, t [s]	→	igual [u.t.] = unidade de tempo
Potência térmica, q [W]	→	Potência de adoção da inovação [Po]
Coefficiente de convecção, h [W/(m ² · K)]	→	Coefficiente de convecção inovativa [Po/(u.c. ² · Ad)]

Na condução de calor é a temperatura que evolui no tempo e no espaço e daí a correspondência entre a temperatura e a percentagem de sujeitos que adota uma inovação. Num material, a massa é o componente na condução de calor que possui energia e permite a sua transmissão, sendo a temperatura uma medida indirecta da mesma. Por isso, o componente da difusão de inovação que a possui, e cujo adotante é uma medida indirecta seria o *contacto*, sem o qual não é possível haver transmissão de informação que abra a possibilidade de uma inovação se propagar. Tanto o comprimento como o tempo, no contexto da difusão de inovação, emergem iguais a si mesmos, mas com unidades arbitrárias por haver casos em que o metro seja adequado e noutros o quilómetro, e no caso do tempo poder ser a hora a medida adequada ou os anos. Contudo, a variável da direcção da transmissão de calor, representada por x na equação da condução

de calor, pode ser equiparada à posição no processo de difusão da inovação. A posição indica a localização geográfica ou alcance onde a inovação está a ser adotada e disseminada. A velocidade da propagação poderá ser influenciada pelo nível de conexões que existam no sistema social. Por fim, o coeficiente de convecção inovativa por analogia ao coeficiente de convecção, admite haver a possibilidade de transporte de inovação por meio do movimento dos contatos. Por exemplo, através da livre circulação de pessoas que alarga o espaço de influência.

Tabela 3.2: Analogia entre propriedades da condução de calor e difusão da inovação

Difusão de Calor	→	Difusão da Inovação
Condutibilidade térmica, $k [W/(m \cdot K)]$	→	Condutibilidade inovativa [$Po/(u.c. \cdot Ad)$]
Massa volúmica, $\rho [kg/m^3]$	→	Densidade de contatos [$Co/u.c.^3$]
Calor específico, $c [J/(kg \cdot K)]$	→	Capacidade de retenção da inovação por parte dos adotantes [$In/(Co \cdot Ad)$]
Capacitância térmica volúmica, $\rho \cdot c_p [J/(m^3 \cdot K)]$	→	Capacitância inovativa adotante [$In/(u.c.^3 \cdot Ad)$]
Difusividade térmica, $\alpha = \frac{k}{\rho c_p} [m^2/s]$	→	Taxa de difusividade da inovação [$u.c.^2/u.t.$]

A condutibilidade térmica expressa a capacidade que um dado material tem de transmitir calor. Assim, a condutibilidade inovativa representa a velocidade de transferência ($Po \equiv In/u.t.$) com que uma inovação é disseminada numa determinada região ($u.c.$) entre os potenciais adotantes (Ad). A massa volúmica, ρ , do ponto de vista da difusão de inovação relaciona-se com a densidade de contatos que formam uma rede de conexões de capital importância no processo de difusão. A densidade de contactos expressa a quantidade de interações e conexões entre indivíduos envolvidos no processo da difusão da inovação. Um maior densidade de contatos aumenta os fluxos de informação entre adotantes. No caso do calor específico, esta propriedade na perspectiva da inovação associa-se à capacidade de manter a adesão à inovação por parte dos adotantes. Da mesma maneira que o calor específico mede a quantidade de calor necessária para elevar em 1 K a temperatura de uma porção de material, a capacidade de retenção designa a disposição dos indivíduos em reter a inovação adotada.

O produto $\rho \cdot c$ das duas propriedades anteriormente descritas permite obter a capacidade de reter uma inovação no espaço definido pela rede de conexões entre os adotantes, semelhante a uma intensidade da adoção cuja magnitude depende da propagação da inovação num determinado sistema social. Uma maior capacitância inovativa produz um impacto significativo na influência da inovação no próprio sistema social. Por fim, a difusividade térmica, α , será a propriedade que mede directamente a difusividade da inovação, representando a rapidez com que a inovação se propaga e dissemina entre os adotantes.

Esta analogia oferece as referências de linguagem que permitem interpretar quaisquer resultados de aplicação do modelo matemático da condução transiente ao ajuste

das curvas S da inovação. As secções seguintes interpretam os modelos temporal (Método da Capacitância Global) e espaço-temporal à luz da analogia feita anteriormente, começando pela temperatura relativa e a taxa de adoção de uma inovação. Na secção 2.2, a evolução da temperatura $T(t)$ seria análogo à evolução do número de adotantes $n(t)$. Por isso, quando uma temperatura ambiente T_∞ diferente e mantida constante seria análogo ao número de potenciais adotantes da inovação N , de tal modo que $\varphi(t) \equiv A(t)$.

3.1.1. Método da Difusão Espaço-temporal da Inovação – MDEI

Quando Diakonova et al. (2020, 2021) propuseram o ajuste de uma solução para a equação de calor que considerasse o termo de segunda ordem espacial, pretendia usar uma solução de condução transiente capaz de produzir uma curva-S. Sem a proposta de Panão (2023) que descreve um atraso térmico no método da capacitância global, a solução resultante apresenta uma exponencial incapaz de descrever a evolução da difusão da inovação. A relação para a evolução da taxa de adoção com base na Eq. (2.32) pode apresentar um comportamento de uma função logística como se pretende e expressa-se como

$$A(t, x) = A(0, |x| > a) + \frac{C \cdot A_0}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{a(1 - \xi)}{2\sqrt{\alpha t}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{a(1 + \xi)}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \right] \quad (3.1)$$

considerando C como um parâmetro de escala para o ajuste da curva, $a, \alpha > 0$ e $\xi > 1$, caso contrário, a solução obtida não seria uma curva em S (ver Fig. 2.5). Um valor de $\xi > 1$ representa que o alcance da inovação é igual ou maior do que a região a que delimita a capacidade de disseminação da inovação. O valor para o grupo inicial estaria no intervalo $0 \leq A_0 < 1$. O efeito de cada parâmetro foi explorado na secção 2.2.3. A curva-S para a difusão da inovação é monotónica, pelo que não deveria haver qualquer decréscimo na taxa de adoção de uma inovação.

Em cenários do mundo real, podem ocorrer flutuações devido a vários fatores, como mudanças nas condições de mercado, concorrência, obsolescência tecnológica, etc. Essas flutuações podem potencialmente levar a um máximo local, mas isso geralmente não é representado no modelo padrão da curva S. Porém, uma das vantagens do MDEI, como ilustra a Fig. 2.4, é a possibilidade de capturar a diminuição da taxa de adoção. As inovações não funcionam sozinhas, mas em aglomerados (*clusters*). Isto significa que os aglomerados causam um efeitos de sinergia descritos como resultado da interação de inovações dentro desse aglomerado que provocam um grande crescimento cumulativo da economia e favorecem o carácter inovador do seu desenvolvimento. Os aglomerados formam novos ciclos económicos comparados à fase ascendente do *Ciclo de Kondratiev*. O Ciclo de Kondratiev é uma teoria proposta pelo economista russo Nikolai Kondratiev na década de 1920. Ele postula que as economias capitalistas experimentam ciclos de longo prazo de alta e baixa atividade económica, cada uma duração de, aproximadamente, 40 a 60 anos. Esses ciclos são frequentemente divididos em quatro fases: expansão, estagnação, recessão e recuperação. No contexto da difusão da inovação, o Ciclo de Kondratiev sugere que grandes ondas de inovação impulsionam esses ciclos económicos de longo prazo. Cada onda é caracterizada pelo surgimento, difusão e eventual saturação de uma tecnologia transformadora ou conjunto de tecnologias. Cada onda começa com um período de inovação incremental, onde a nova tecnologia

é gradualmente aprimorada e difundida por toda a economia. Isso leva a um período de rápido crescimento económico. Eventualmente, a tecnologia amadurece e satura, levando a um período de crescimento mais lento ou até mesmo declínio (ver Hirooka (2005)). No entanto, uma nova onda de inovação eventualmente surge, iniciando o ciclo novamente. É de notar que o Ciclo de Kondratiev fornece uma estrutura útil para entender as tendências económicas de longo prazo, mas é uma simplificação. As economias do mundo real são influenciadas por uma diversidade grande de fatores, e o seu comportamento pode ser altamente complexo e imprevisível.

3.1.2. Método da Capacitância Inovativa Global – MCIG

O Método da Capacitância Inovativa Global é uma abordagem somente temporal à descrição da difusão da inovação, onde a Eq. (2.22) com variação temporal incluída na resposta do sistema a uma perturbação se escreveria como

$$A(t) = \Gamma(t)^{-1} (1 - A(t)) \quad (3.2)$$

com $\Gamma(t) = \frac{C_{in}}{H(t)}$ como a resposta inovativa do sistema social que relaciona a capacidade inovativa adotante ($C_{in} = \rho \cdot c \cdot x_i$) numa determinada região de influência e o coeficiente de convecção inovativo que pode variar no tempo. De acordo com as relações exploradas na secção 2.2.2, existem várias possibilidades para $\Gamma(t)^{-1}$, por exemplo, uma de carácter mais “epidémico” – $qA(t)$ ou uma que se assemelhe à sugestão de Bass (1969) de haver um elemento de ponderação inovativa (p) e outro de ponderação imitativa (q), ficando $\Gamma(t)^{-1} = C(p + q \cdot t^b)$. Nestes casos, as relações a usar nos ajustes seriam

$$A(t) = (1 + (A_0^{-1} - 1)e^{-qt})^{-1} \quad (3.3)$$

$$A(t) = 1 - (1 - A_0) \exp \left[-\frac{Ct}{b+1} (p(b+1) + q \cdot t^b) \right] \quad (3.4)$$

com A_0 como o número inicial de adotantes inovadores. A Eq. (3.3) é igual à Eq. (2.10), enquanto que a Eq. (3.4), não explorada por Diakonova et al. (2021) é uma analogia directa puramente temporal com a condução transiente de calor introduzida nesta dissertação. É de notar que uma análise de sensibilidade ao efeito de cada parâmetro na Eq. (3.4) denota alguma lógica do ponto de vista da difusão da inovação. p afecta a taxa de adoção antes do ponto de inflexão q afecta após o ponto de inflexão

Os limites desta abordagem aquando do ajuste serão o englobar de vários conceitos no mesmo parâmetro. Por exemplo,

$$C^{-1} = C_{in} = \rho c x_i \quad (3.5)$$

representa, por analogia, a capacitância inovativa associada à retenção da inovação, e o inverso de $H(t) = p + qt^b$ associado (por analogia) à convecção inovativa que permite transportar uma inovação no espaço de influência representaria a resistência à transmissão convectiva de inovação.

3.2. Metodologia de Análise e Processamento de Dados

Os dados para validar a abordagem condutiva à difusão de inovação provêm de Ortiz-Ospina (2019), contendo as percentagens de adoção de diversos produtos, serviços

e tecnologias. Em muitos casos havia uma distância considerável entre o ano com indicação de 0% de adoção e o primeiro ano com alguma percentagem. Outros casos, a primeira taxa de adoção apresentada era muito elevada, levando à inaplicabilidade de um ou dos dois métodos. Esses casos não foram considerados na análise. A Fig. 3.1 mostra algumas das pouco mais de 40 inovações analisadas neste trabalho.

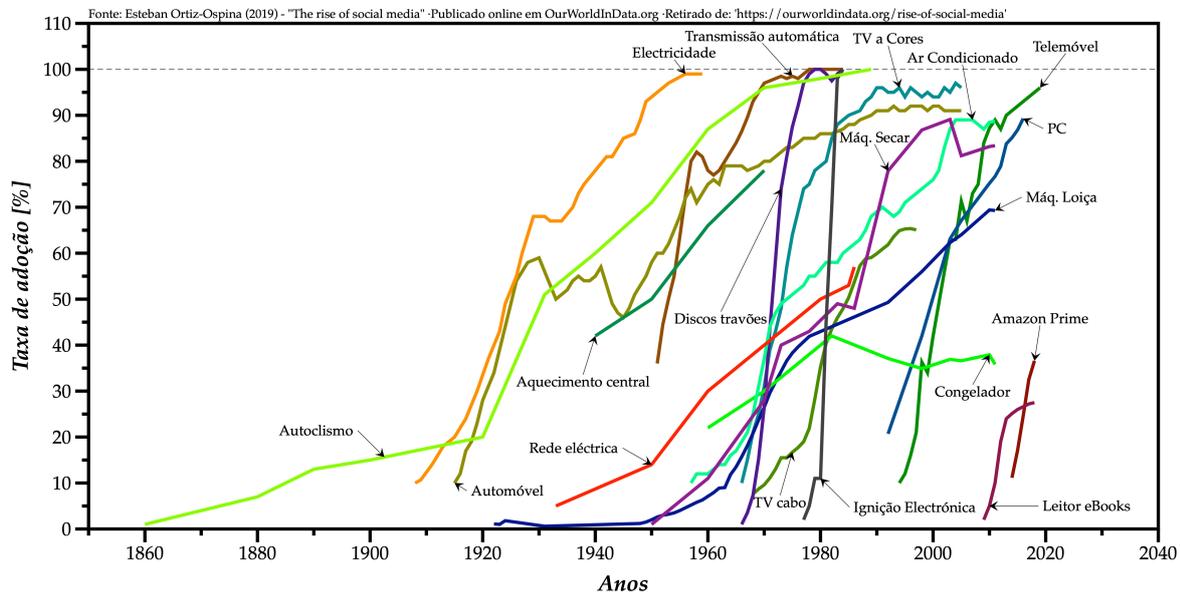


Figura 3.1: Exemplos de taxas de adoção nos EUA de inovações consideradas na análise.

A Fig. 3.2 mostra a gama temporal da taxa de adoção de cada inovação analisada neste trabalho. O ponto inicial corresponde ao ano em que se dispõe do primeiro dado para $A(t)$ e no final, o não preenchimento do círculo significa que $A(t)$ não atingiu os 100%. Em alguns casos, esse não preenchimento pode indicar alguma falta de informação.

3.2.1. Tratamento dos dados e algoritmo de análise

O tratamento dos dados consiste em subtrair ao vector temporal o ano inicial registado nos dados, de modo a que se considere o tempo inicial como o ano em que se dispõe do primeiro dado.

$$t = t [\text{Anos}] - t [\text{Ano } 0] + \delta t \quad (3.6)$$

em que $\delta t = 10^{-5}$, caso contrário a regressão linear realizada em Matlab apresentava erro.

Durante o processo de procura dos valores para cada parâmetro da Eq. (3.1) no caso do Método de Difusão Espaço-temporal da Inovação (MDEI), e da Eq. (3.4) no caso do Método da Capacitância Inovativa Global (MCIG), estabelece-se uma gama de procura como indicado na Tabela 3.3. Além de alguns dos limites terem sido estabelecidos quando os métodos foram descritos, outros provieram de uma primeira iteração no processamento, uma vez que intervalos mais restritos em alguns parâmetros facilitam o processo de procura da solução que mais ajusta a curva aos dados disponíveis.

Tabela 3.3: Gama de procura dos coeficientes envolvidos nos métodos MCIG e MDEI

Método →	MCIG					MDEI				
Limites ↓	A_0	C	p	q	b	C	A_0	a	ξ	α
Min.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
Max.	1	∞	∞	∞	6	∞	0.5	3	∞	1

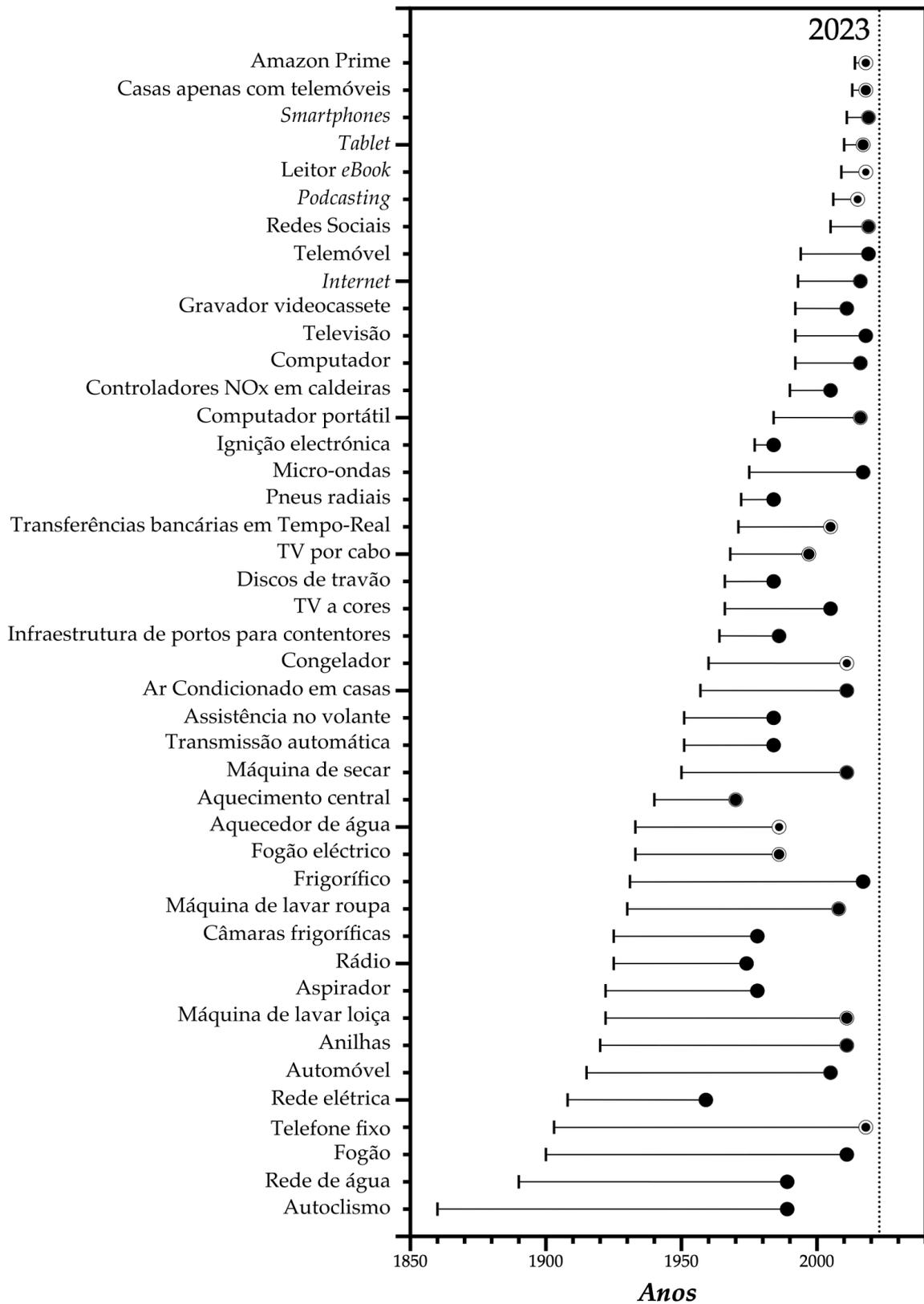


Figura 3.2: Gama de inovações analisadas contendo o intervalo de tempo desde que se dispõe do primeiro dado para a taxa de adoção até ao último ano.

A função do Matlab usada para realizar o ajuste dos dados a cada função não-linear foi a `lsqcurvefit`. A função `lsqcurvefit` do MATLAB é usada para ajustar um modelo a dados usando o método dos mínimos quadrados não-lineares. Esta função é útil quando dispomos de um conjunto de dados e um modelo de como os dados devem se comportar em que os parâmetros do modelo não são conhecidos. A função `lsqcurvefit` procura os parâmetros do modelo que minimizam a soma dos quadrados das diferenças entre os dados observados e os previstos pelo modelo. A sintaxe básica da função –

$$c = \text{lsqcurvefit}(\text{fun}, c0, \text{xdata}, \text{ydata})$$

onde

- `fun` – corresponde à função que se pretende ajustar.
- `c0` – é um vetor inicial de estimativas para os parâmetros/coeficientes que fazem parte do modelo.
- `xdata` e `ydata` – são vetores de dados que usamos no ajuste.

A função retorna – `c` – que é o vetor com os valores dos parâmetros do modelo que resultam no melhor ajuste aos dados. Também é calculado o coeficiente de Pearson (R^2) entre o dados e os resultados da função, sendo estabelecido um valor mínimo aceitável de $R_{min}^2 = 0.85$. Caso o resultado não permita obter esse mínimo, pode ser devido aos valores dos coeficientes em `c0` dados no início (*Priors*). Nesse caso, cria-se um novo vector inicial aleatório, até que se obtenha $R^2 \geq R_{min}^2$ ou se atinja o número máximo de 100 iterações. Os *Priors* de base escolhidos para cada método, com base na experiência aquando do desenvolvimento do algoritmo foram:

- MCIG – `c0 = [1, -1, 1, 1, 1]`;
- MDEI – `c0 = [10, 1, 1, 3, 0.1]`;

A próxima secção explica como se realizou a análise de riscos associada à sensibilidade de cada modelo a variações dos seus parâmetros.

3.2.2. Análise de riscos

Aven (2012) fez uma revisão de diversos conceitos de risco e verificou não haver uma definição consensual na literatura. O risco pode ser definido através de probabilidades, oportunidades, valores esperados, perigos e incertezas. Por isso, existem diferentes perspectivas de risco alocadas a diferentes áreas. Das definições revistas, a que Aven (2012) considera mais plausível é a que considera as consequências e as incertezas por ser uma perspectiva que se alinha mais com a linguagem quotidiana e a etimologia da palavra “risco”.

Neste contexto específico, existe um intervalo de valores associado a cada parâmetro do modelo de ajuste, pelo que a optimização do mesmo poderá ter várias soluções

com variações ínfimas do coeficiente de correlação de Pearson. Por exemplo, o ajuste com um parâmetro A elevado e B pequeno para um certo C, poderá assemelhar-se a um ajuste com A baixo, B elevado para um C alterado, pelo que a sensibilidade do modelo $f(A, B, C, \dots)$ a variações de cada um dos parâmetros apresenta “consequências” diferentes aquando da análise com base no significado que tem cada parâmetro. Neste sentido, uma análise dos pesos que representam o efeito da variabilidade de cada parâmetro no ajuste final é considerado a parte *consequente* do risco em análise.

Considerando $\tilde{\zeta} = (\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n)$ como o número de parâmetros envolvidos em cada função que caracteriza a taxa de adoção de uma inovação, $A(\tilde{\zeta}, t)$, nos métodos MCIG e MDEI, a sensibilidade do modelo a cada parâmetro obtém-se a partir da sua derivada, $S_{\zeta_i} = \frac{\partial A}{\partial \zeta_i}$. Para a gama obtida em cada parâmetro, $\zeta_i \in [\zeta_{i,min}, \zeta_{i,max}]$, foi construída uma malha de m pontos para cada ζ_i , resultando em m^n combinações possíveis em cada instante t . O peso w_{ζ_i} de cada parâmetro no resultado de $A(\tilde{\zeta}, t)$ é obtido para k instantes, a partir dos pesos obtidos para cada instante

$$w_{\zeta_i} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k w_{\zeta_i, t_l} \quad (3.7)$$

em que o peso obtido em cada instante a partir das m^n combinações obtém-se a

$$w_{\zeta_i, t_l} = \sum_{j=1}^{m^n} \frac{S_{\zeta_i, j}}{S_{\tilde{\zeta}, j}} \quad (3.8)$$

com

$$S_{\tilde{\zeta}, j} = \sum_{i=1}^n S_{\zeta_i, j} \quad (3.9)$$

como a soma dos valores das sensibilidade em cada instante e combinação possível, significando que w_{ζ_i} se obtém à custa de $k \times m^n$ de pontos ($10^6 - 10^7$ no caso deste trabalho).

Tabela 3.4: Pesos de cada parâmetro no Risco obtidos para os métodos MCIG e MDEI

Método →	MCIG					MDEI			
Pesos ↓ de ζ_i →	A₀	C	p	q	b	C · A₀	a	ξ	α
w_{ζ_i}	0.40	0.36	0.03	0.11	0.10	0.18	0.04	0.48	0.30

Por outro lado, a *incerteza* no ajuste final depende da diferença entre $A(t_i)$ obtido pela curva no tempo t_i e o dado real da taxa de adoção (A_i) correspondente a esse tempo. Assim, a incerteza associada a cada ajuste feito é avaliada com base na entropia de informação (introduzida por Claude Shannon (1948)) normalizada pelo valor máximo (Panão and Moreira, 2008) do resíduo, $r_i = A_i - A(t_i)$. O número de classes (N_k) do resíduo segue a regra de Rice (ver em Terrell and Scott (1985)), $N_k = 2\sqrt[3]{N}$, com N como o número da amostra de pontos considerado. Considerando f_i como o valor da frequência obtida em cada classe, de tal modo que $\sum_{i=1}^{N_k} f_i = 1$, a entropia de informação normalizada corresponde a (Panão and Moreira, 2008)

$$H_n = \frac{-\sum_{i=1}^{N_k} f_i \cdot \ln(f_i)}{\ln(N_k)} \quad (3.10)$$

A quantificação da incerteza com base na entropia de informação normalizada é diferente do desvio padrão do resíduo que mede apenas a dispersão de valores e assume que essa segue sempre uma distribuição normal, não admitindo qualquer multimodalidade. Pelo contrário, a entropia de informação é uma medida da incerteza ou do “grau de surpresa” de um conjunto de probabilidades. Essa expressa a quantidade de informação que seria necessária para especificar um resultado de uma distribuição de probabilidade. Uma entropia maior indica uma maior incerteza ou “surpresa”, enquanto uma entropia menor indica uma menor incerteza. Por exemplo, se todos os resultados têm a mesma probabilidade de ocorrência, como numa distribuição uniforme, $H_n = 1$, mas se houver apenas uma classe, de tal maneira que todos os valores se inserem dentro dessa classe, $H_n = 0$.

Seguindo a sugestão de Aven (2012), o risco (R) associado à adequada modelação da curva de inovação seria

$$R = S_{\zeta,j} \times H_n \quad (3.11)$$

Salienta-se que esta análise não compete com o habitual coeficiente de correlação de Pearson (R^2 , onde R não tem o mesmo significado que o Risco) por se restringir apenas ao ajuste de uma curva a dados, enquanto que o Risco envolve a sensibilidade da variação de cada parâmetro no resultado final, bem como a incerteza associada à descrição que a curva faz da evolução da inovação. Poder-se-ia afirmar que a entropia de informação normalizada quantifica a incerteza na distribuição dos resíduos de um ajuste de curva, enquanto o coeficiente de correlação de Pearson é usado para quantificar a relação linear entre os dados e a curva ajustada.

4. Resultados e Discussão

A análise de resultados apresenta um papel fulcral para a compreensão e interpretação da potencialidade explicativa da analogia da condução transiente de calor para explicar os fenómenos de difusão de uma inovação. Por conseguinte, o objetivo principal desta análise consiste em avaliar a visão abrangente das semelhanças e diferenças obtidas aquando da utilização de ambos os modelos. Importa salientar que por “dados” se entende as estimativas obtidas no ajuste dos dois modelos aos dados das curvas de inovação. A análise pretende escrutinar potenciais variabilidades. Primeiramente, será feita uma síntese descritiva dos valores estimados em ambos os modelos. De seguida, será realizada uma análise de sensibilidade, através da aplicação de uma métrica de desempenho. Por fim, a comparação geral dos modelos tem como principal objetivo compreender as capacidades e limitações de cada abordagem, identificando as diferenças de desempenho e as áreas em que cada modelo se destaca ou apresenta restrições. Além do mais, esta análise permitirá avaliar a confiabilidade e a robustez dos resultados obtidos para a explicação da evolução da taxa de adoção de uma inovação e proporcionará uma base sólida para investigações futuras.

4.1. Análise Geral de Dados

Na análise geral de dados, irão ser explorados os ajustes obtidos pelos diferentes métodos, a qualidade desses ajustes e será realizada uma análise descritiva dos valores estimados para cada parâmetro. O objetivo principal é avaliar a eficácia dos dois métodos aplicados e compreender a qualidade dos ajustes obtidos.

4.1.1. Análise do ajuste das curvas

O primeiro resultado a apresentar será a precisão dos métodos da capacitância inovativa global (MCIG) e da difusão espaço-temporal da inovação (MDEI) na representação das curvas de inovação. Pretende-se compreender a capacidade de ambos os métodos em capturar os padrões e as tendências das curvas reais de adoção de uma inovação, como também identificar eventuais divergências. As Figuras 4.1 e 4.2 exemplificam os ajustes de cada método aos dados disponíveis para a taxa de adoção de quatro inovações. Nos casos da transmissão automática e da máquina de lavar roupa (Fig. 4.1), existem patamares após o início da difusão de inovação que se referem à existência de múltiplas fases de crescimento na adoção de uma inovação. Nestes casos, enquanto no primeiro caso (transmissão automática) ambos os modelos captam a tendência, no segundo caso (máquina de lava roupa), isso não acontece. Contudo, seria necessário desenvolver um algoritmo de ajuste mais avançado que contemplasse

misturas de curvas de crescimento para múltiplos períodos como a média ponderada de duas ou mais curva características.

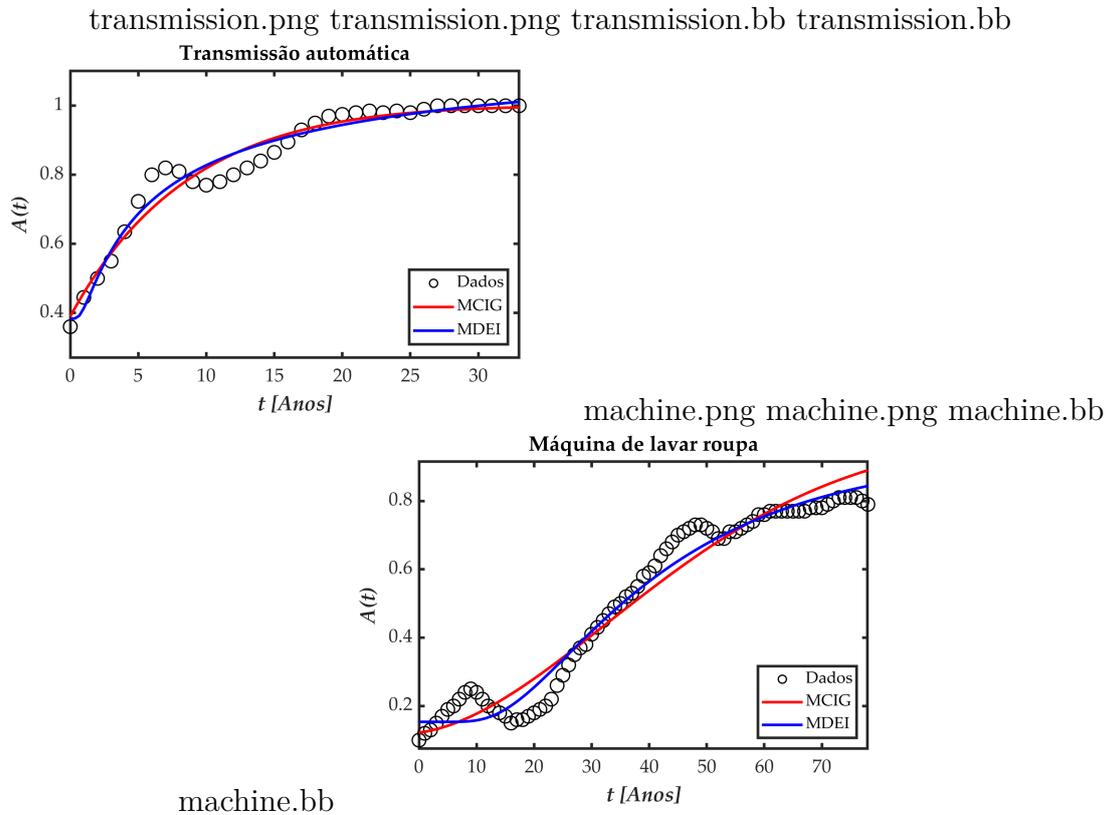


Figura 4.1: Resultados obtidos para a analogia das curvas da inovação Automóvel (esquerda) e máquina de lavar roupa (direita) aos métodos de condução de calor transiente.

Na Fig. 4.2, no caso da ignição electrónica, o MCIG consegue captar a estabilização final ao passo que o MDEI não consegue reagir. Porém, o MCIG no infinito estabiliza e não consegue captar o que acontece em alguns casos, como no congelador, onde pode haver um máximo local na taxa de adoção de uma inovação. Algo que o MDEI possui a capacidade de captar.

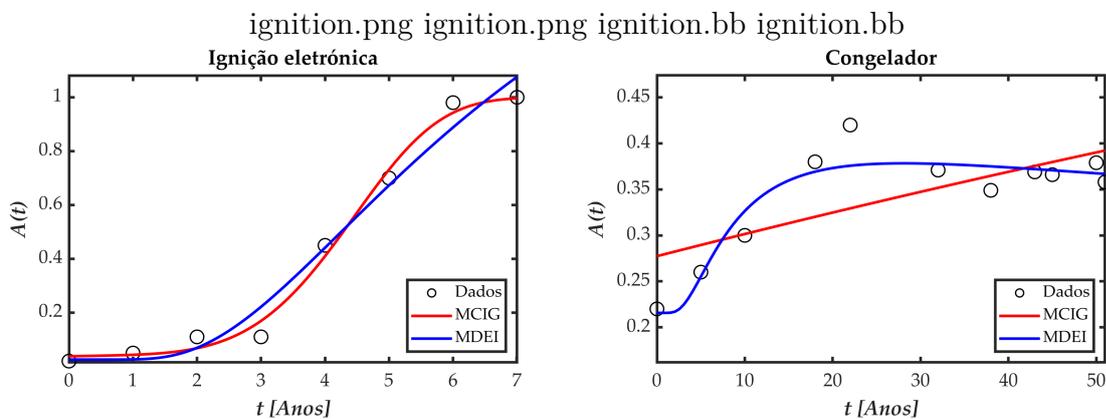


Figura 4.2: Resultados obtidos para a analogia das curvas da inovação ignição electrónica (ajuste MCIG superior a MDEI) e do congelador (ajuste MDEI superior a MCIG).

Por forma a avaliar a precisão dos métodos recorreu-se ao coeficiente de correlação de Pearson, R^2 , que oferece uma medida da proporção da variação nos dados, explicada por ambos os métodos. No decorrer da análise, para cada um dos modelos avalia-se a capacidade de cada modelo em explicar a variabilidade dos dados individualmente. Ao examinar os valores estimados para o coeficiente de correlação de Pearson, constataram-se algumas diferenças entre os modelos, contudo estas não são muito significativas. Através da análise da Fig. 4.3 é possível observar que o modelo MDEI apresenta um desempenho superior relativamente ao modelo MCIG, descrevendo aproximadamente 60% do total das inovações, enquanto que o modelo MCIG descreve apenas aproximadamente 40% destas.

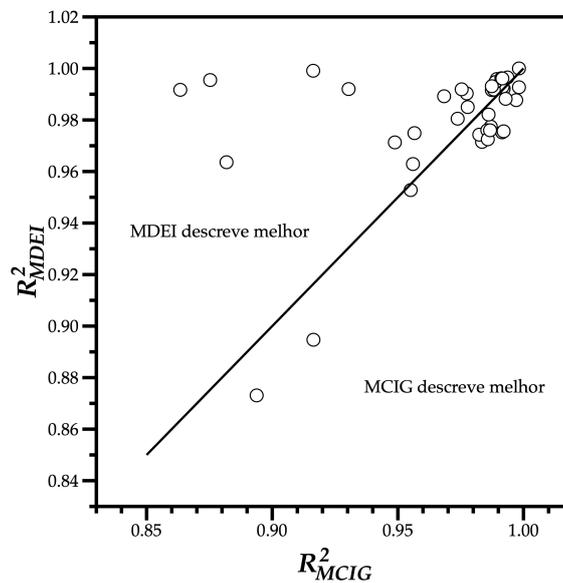


Figura 4.3: Comparação entres as estimativas do coeficiente de correlação para o modelo MDEI e o modelo MCIG

Posteriormente, realizou-se a diferença entre os coeficientes de determinação R^2 para o modelo MDEI e para o modelo MCIG normalizada pela média dos coeficientes de correlação, permitindo comparar a diferença entre estes considerando a diversidade possível na escala de R^2 . Desta forma, é possível avaliar não apenas o desempenho individual de cada um dos modelos, mas também a diferença relativa entre eles, possibilitando uma análise mais completa e contextualizada da capacidade dos modelos de explicar a variabilidade dos dados. Os resultados reportados na Fig. 4.4 em função no número de anos em que a difusão de inovação ocorreu, revelaram que, na maior parte dos casos, a diferença normalizada é inferior a 5%. Porém, a Fig. ?? mostra que o MDEI apresenta cinco resultados acima de 5% em termos de precisão na descrição das curvas de inovação. Estes resultados indicam que o MDEI é capaz de capturar com maior sucesso as características das curvas reais de inovação, como aconteceu nos casos das inovações Máquina de lavar loiça, Leitor Ebook, Videocassete, Casas apenas com telemóveis e Transferências bancárias em tempo-real (ver ajustes no Apêndice A).

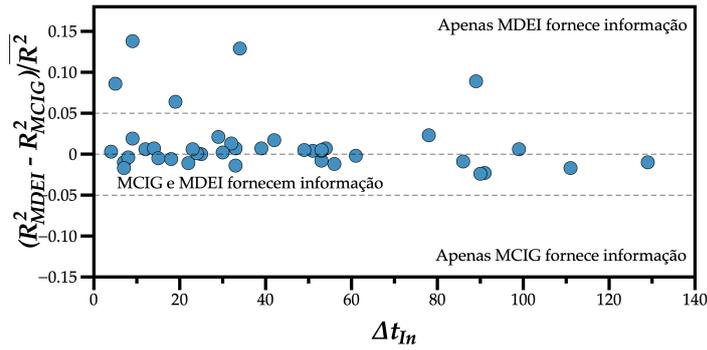


Figura 4.4: Comparação das diferenças significativas entre o MDEI e o MCIG

Ao contrário do modelo MCIG cujo domínio de variação é somente temporal, o modelo MDEI compreende a componente espaço-temporal da difusão da inovação. Este leva em consideração a disseminação da inovação no decorrer do tempo, mas também como essa disseminação ocorre em diferentes regiões geográficas. Esta abordagem espaço-temporal possibilita uma análise mais completa e precisa da difusão da inovação. No entanto, é de salientar que as divergências observadas não invalidam a utilidade de usar os métodos de forma complementar. Por exemplo, em alguns casos, o MCIG descrevia melhor uma parte da evolução da difusão da inovação, enquanto o MDEI, uma outra parte. Por isso, se considerarmos $A_{MCIG}(t)$ e $A_{MDEI}(t)$ como os ajustes de cada método a um conjunto de dados, um desenvolvimento futuro seria desenvolver um algoritmo que otimiza a modelação da curva de inovação como

$$A(t) = \begin{cases} A_{MCIG}(t) & \text{se } 0 \leq t \leq t_m \\ A_{MDEI}(t) & \text{se } t > t_m \end{cases} \quad (4.1)$$

em que, neste exemplo, o MCIG descreve melhor $A(t)$ até ao ano t_m de transição entre modelos, passando o MDEI a descrever a difusão da inovação a partir desse momento.

4.1.2. Análise Paramétrica dos Resultados do Ajuste

Nesta secção, exploram-se os resultados obtidos para os parâmetros que fazem parte dos métodos da capacitância inovativa global (MCIG) e da difusão espaço-temporal da inovação (MDEI), a fim de identificar padrões e relações relevantes. A análise permitirá comparar os resultados obtidos para cada modelo, bem como avaliar a consistência e a confiabilidade dos mesmos. Primeiramente, realizou-se uma análise estatísticas dos valores obtidos para cada parâmetro através de histogramas, por forma a visualizar a distribuição dos valores estimados.

Método da Capacitância Inovativa Global

Através da observação dos histogramas é possível identificar uma considerável dispersão nos resultados, significando que os valores estimados para cada parâmetro apresentam uma ampla variação, desde valores muito baixos a valores muito altos. A dispersão, obtida para os valores estimados, poderá indicar a heterogeneidade na adoção das inovações estudadas.

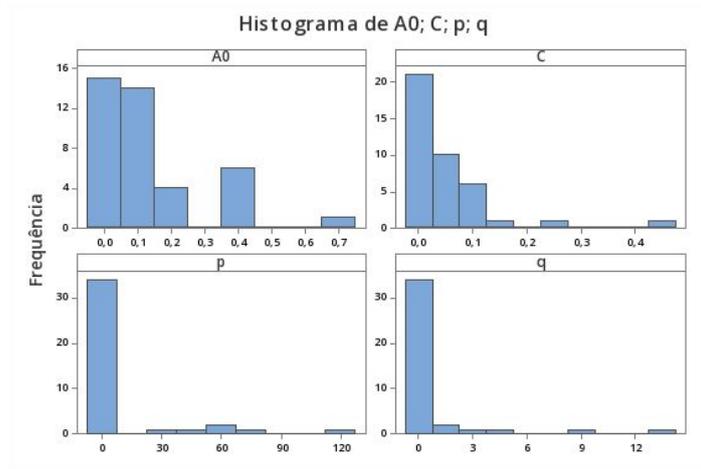


Figura 4.5: Histogramas para a abordagem MCIG

A matriz de correlações entre os diversos parâmetros não indica qualquer tendência, nem entre si, nem com os intervalos de anos de difusão da inovação (ver Fig. 3.2).

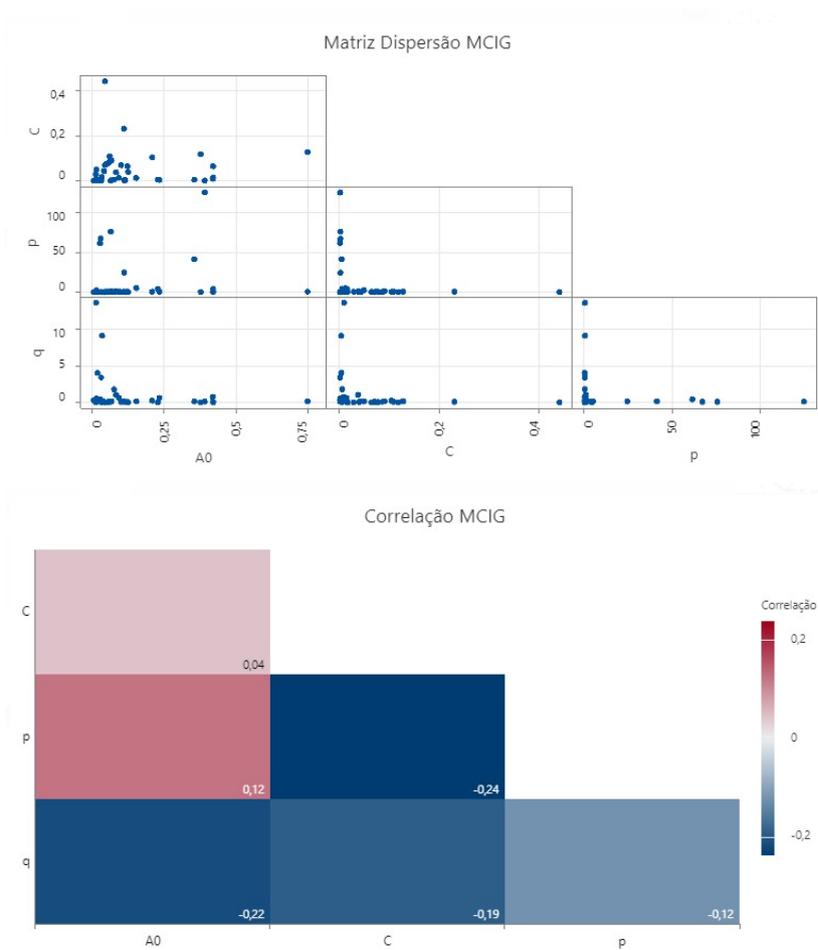


Figura 4.6: Matriz Dispersão e Correlação para a abordagem MCIG

Salienta-se que seria necessária uma análise mais detalhada e trabalhada, usando

métodos de análise de dados mais complexos, como por exemplo recorrer a uma Análise Multivariada remetidos para trabalho futuro.

Método da Difusão Espaço-temporal da Inovação

No caso do MDEI, à semelhança do MCIG, a maior parte dos resultados paramétricos não favorece qualquer tipo de tendência, excepto entre o alcance inovativo ξ e a difusividade inovativa α .

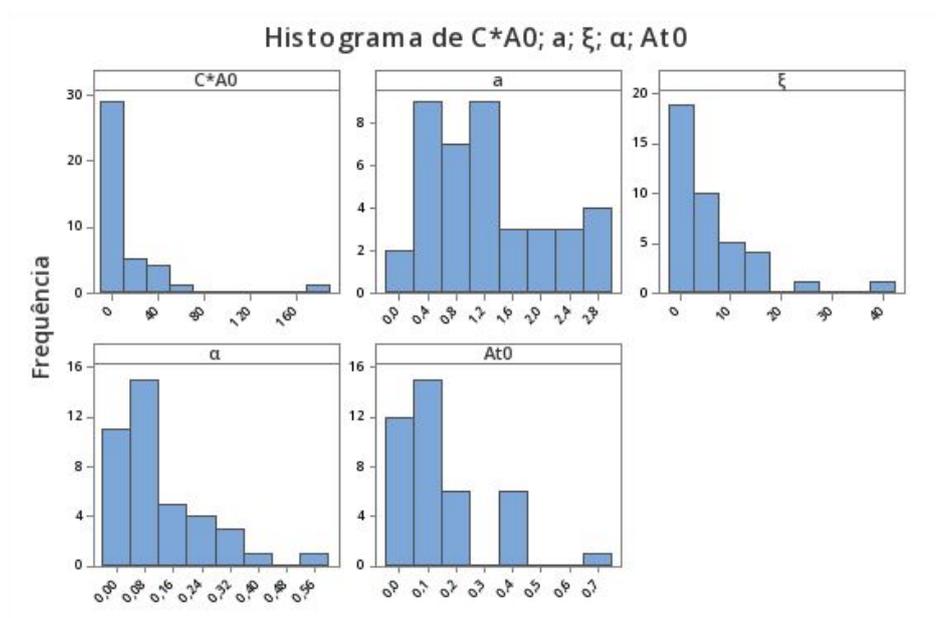


Figura 4.7: Histogramas para a abordagem MDEI

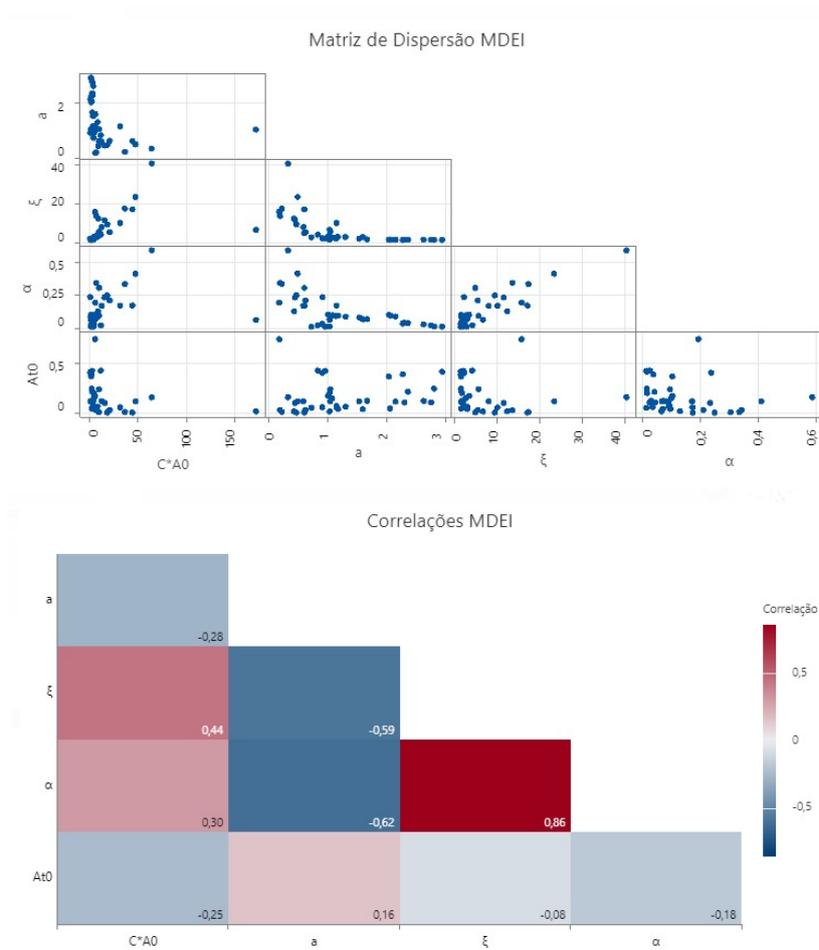


Figura 4.8: Matriz Dispersão e Correlação para a abordagem MDEI

De modo a restringir a análise paramétrica às inovações melhor descritas por cada modelo, procedeu-se a uma distinção simples com base no método que produziu maior R^2 . Analogamente à análise geral dos resultados realizada para avaliar tendências correlativas entre parâmetros, nesta análise restrita a cada método, os valores otimizados no MCIG mantêm-se dispersos e sem qualquer tendência correlativa (ver Apêndice B), não se conseguindo identificar um padrão na maioria dos casos, excepto para a abordagem MDEI como a Fig. 4.8 já havia indicado.

No caso das inovações melhor descritas pelo modelo MDEI, existe uma correlação entre o parâmetro ξ e o parâmetro α com $R^2 = 0.7370$, evidenciada na figura 4.9, sugerindo a existência de uma relação não linear entre estes dois parâmetros. Segundo Baptista (2000) a presença de aglomerados aumenta a competitividade, estimula a atividade e acelera a difusão de novas tecnologias. O parâmetro ξ poderá representar a região inicial de abrangência da inovação, isto é, a extensão geográfica do alcance da inovação a partir da região em que essa é adotada inicialmente. Por outro lado, o parâmetro α representa a velocidade de espalhamento de uma inovação. Ao analisar a correlação entre estes parâmetros, observamos uma associação positiva relevante. A correlação estimada sugere que um maior alcance face à região inicial de adoção ($\xi = x/a$, com x como o alcance e $|a|$ como o tamanho da região inicial) está relacionada a uma aceleração (α) da inovação. Indicando que uma inovação adotada, inicialmente,

numa região, mas que se difunde e amplia em alcance, significa que chegou a um número maior de adotantes, acelerando a disseminação da inovação. Este resultado alinha-se com os efeitos dos aglomerados, conforme mencionado por Baptista (2000), e reforça a importância de uma rede densa de contactos, criando ambientes propícios para a colaboração e maior evolução na adoção de novas tecnologias. No entanto, é de salientar que a correlação por si só não indica necessariamente causalidade.

Correlation.png Correlation.png Correlation.bb Correlation.bb

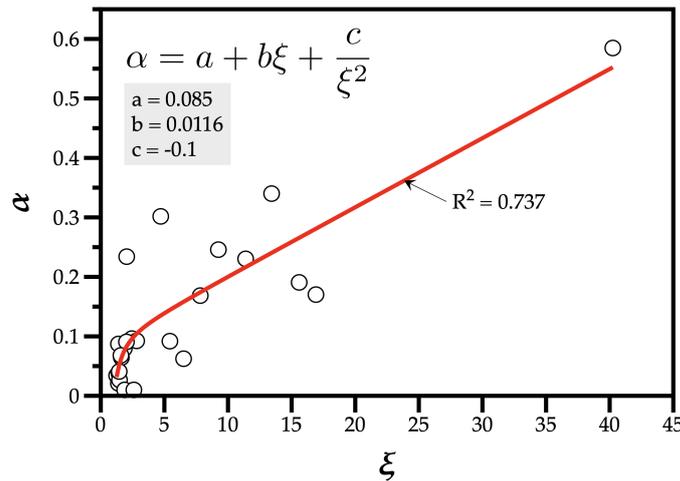


Figura 4.9: Correlação entre o alcance inovativo (ξ) e a difusividade inovativa (α) obtidos pelo MDEI.

Na generalidade conclui-se que apesar do formato ser o mesmo (curva-S), cada inovação é muito singular e única na sua evolução do ponto de vista da analogia feita com os modelos de condução transiente. Talvez uma análise mais aprofundada da ordem de grandeza dos parâmetros e comparação com outros parâmetros de modelos mais convencionais, pudesse ajudar a compreender o sentido e significado dos valores obtidos. Porém, esse aprofundamento será remetido para trabalho futuro.

4.2. Análise de Risco

A ferramenta análise de risco permite avaliar a confiabilidade dos resultados obtidos, quantificando a variabilidade que os parâmetros de cada modelo pode induzir na obtenção da curva do modelo que melhor se ajusta aos dados e, conseqüentemente, avaliar a robustez das conclusões provenientes de ambas as abordagens. Na análise de risco foram utilizados os valores estimados pelo Método da Capacitância Inovativa Global (MCIG) e pelo Método da Difusão Espaço-temporal da Inovação (MDEI). No capítulo 3 foram ajustados os pesos associados a cada parâmetro para cada modelo como o elemento *consequência* ou fator de risco ($S_{\xi,j}$) e, em seguida, a incerteza do ajuste foi avaliada considerando a entropia da informação normalizada. A entropia da informação normalizada (H_n) permite medir a quantidade de informação ou incerteza necessária para conhecer o sistema. Quanto maior a entropia da informação normalizada, maior será a incerteza associada aos dados. Esta medida é fundamental, pois exprime a variação e a imprevisibilidade dos dados no que respeita ao modelo ajustado. O fator de risco tem em conta a sensibilidade de cada parâmetro para cada uma das abordagens, no fundo, este pondera sobre a importância de cada parâmetro na análise

de risco. A Fig. 4.10 mostra como a sensibilidade dos parâmetros no método MDEI é muito superior ao do método MCIG. Porém, a incerteza associada ao ajuste dos modelos aos dados é da mesma ordem de grandeza.

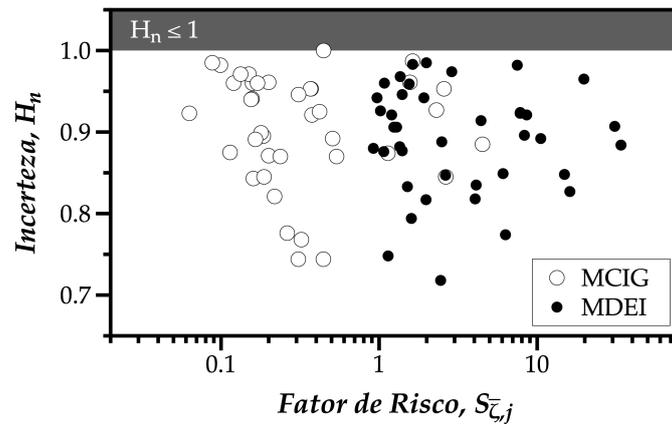


Figura 4.10: Relação entre o fator de risco ($S_{\bar{\zeta},j}$) e a incerteza (H_n) para ambos os métodos.

Como referido no capítulo 3, o risco representa o produto do factor de consequência com base nos pesos e na entropia de informação normalizada. A análise de risco permitiu obter uma estimativa do risco para cada inovação em relação a cada um das abordagens, o que reflete a potencialidade explicativa do ajuste de cada uma delas à descrição da evolução das taxas de adoção de uma inovação. Porém, de modo equalizar as escalas dos riscos, adimensionalizou-se o valor estimado do risco pelo máximo obtido em cada uma das abordagens (≈ 4 para o MCIG e ≈ 33.9 para o MDEI).

Na figura 4.11 é possível averiguar que o risco relativizado pelo máximo possui a mesma ordem de grandeza relativa entre métodos em pouco menos do que 22% dos ajustes feitos. Por isso, em 78% dos casos o risco relativo tende a ser disperso, uns casos maior com o MDEI e noutros casos maior com o MCIG. A linha a tracejado no gráfico indica os ajustes com menor risco relativo o MCIG tendem a ter maior risco relativo o MDEI. Este resultado indica que os métodos, aquando do ajuste, podem apresentar riscos bastante distintos.

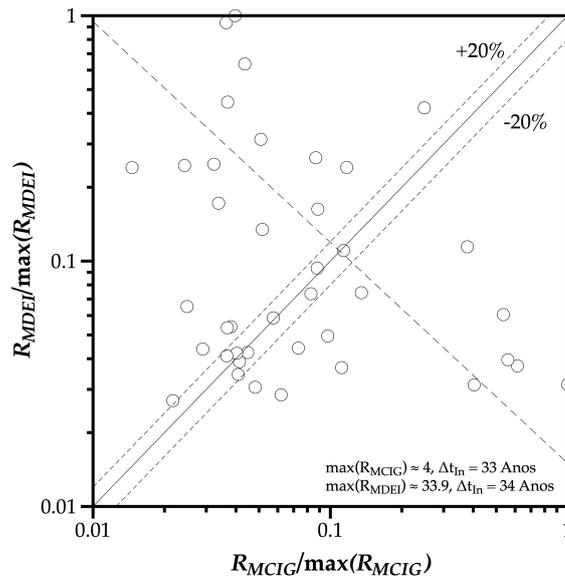


Figura 4.11: Estimativas de risco relativizado pelo máximo para as abordagens MCIG E MDEI.

A dispersão de pontos para o risco relativo sugere uma análise do efeito cumulativo estatístico ilustrado na Fig. 4.12. Desta forma é possível visualizar como o crescimento do risco relativo é maior no MCIG, justificando-se a razão do valor de considerar na modelação de curvas de inovação os efeitos espaço-temporais, em vez de somente efeitos temporais.

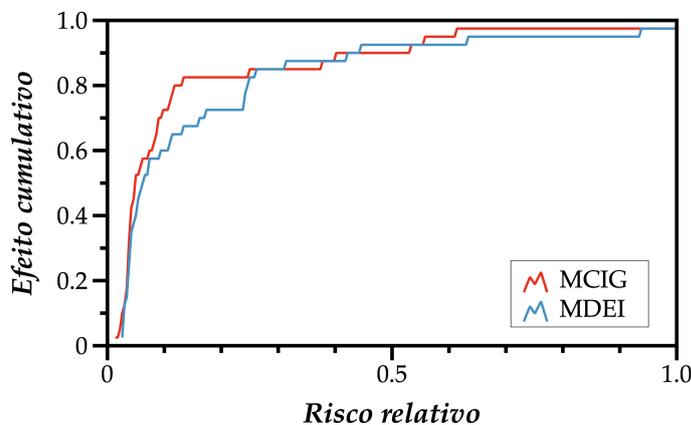


Figura 4.12: Distribuição cumulativa dos valores de risco relativo em cada método (MCIG e MDEI).

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

A difusão da inovação é um conceito amplamente estudado e aplicado em diversas áreas, e das abordagens mais recentes à modelação da curva-S da inovação, destaca-se a analogia recorrendo à transmissão de calor por condução, cujo mecanismo de transferência de energia é, também, a difusão. A abordagem lançada (mas não concretizada) por Diakonova et al. (2020) pretende representar a difusão da inovação usando as relações da condução de calor transiente, na tentativa de melhorar a precisão da descrição da curva e contextualização dos parâmetros de ajuste na explicação da evolução da adoção de uma inovação. Esta visa aproximar a realidade da difusão da inovação ao utilizar um modelo de condução transiente considera as flutuações e as condições variáveis ao longo do tempo. Ao contrário das abordagens tradicionais baseadas na função logística, as quais providenciam uma representação exclusivamente temporal da difusão da inovação, o modelo de condução transiente proposto por Diakonova et al. (2020) permite uma descrição espaço-temporal do processo de adoção e propagação de inovações por analogia à condução de calor.

Neste contexto, a presente dissertação apresenta a validação de uma das propostas por Diakonova et al. (2020) na área de transmissão de calor e adiciona uma outra, somente temporal, que antes de Panão (2023) não seria possível aplicar pela impossibilidade de simular o atraso temporal que muitas vezes acontece no início. Assim, a abordagem metodológica adotada integrou a aplicação de duas propostas: o Método da Capacitância Inovativa Global (MCIG) e o Método da Difusão Espaço-temporal da Inovação (MDEI). Por sua vez, a validação da proposta foi conseguida por meio de uma simulação computacional e de análise estatística.

O Método da Capacitância Inovativa Global (MCIG) e o Método da Difusão Espaço-temporal da Inovação (MDEI) apresentam duas abordagens distintas para descrever o processo de difusão de uma curva de adoção. O MCIG é uma abordagem somente temporal, refletindo-se na resposta do sistema a uma perturbação ao longo do tempo. Este método relaciona a capacidade inovativa adotante (C_{in}) com o coeficiente de convecção inovativo, o qual pode variar no tempo. Adicionalmente, considera diferentes possibilidades para a resposta inovativa do sistema, como a combinação ponderada de fatores inovativos e imitativos ($p + q * t^b$). A equação resultante deste modelo descreve a taxa de adoção da inovação no decorrer do tempo.

O modelo MDEI propõem uma equação que considera o termo de segunda ordem espacial. Por sua vez, esta abordagem permite capturar a evolução espaço-temporal da difusão da inovação. A equação utilizada descreve a taxa de adoção como uma função de erro $\text{erf}(x)$, em vez de logística, dependente de parâmetros espaciais (a , ξ), propriedades difusivas (α) e coeficiente de escala (C). A solução conseguida é capaz de capturar flutuações na taxa de adoção, incluindo decréscimos em vez de estabilização permanente.

Na comparação de ambos os modelos, observam-se diferenças significativas nas abordagens e na capacidade de ajuste aos dados de adoção das diversas inovações. Enquanto o modelo MCIG compreende uma abordagem temporal que se concentra na resposta do sistema ao longo do tempo, o modelo MDEI tem em consideração tanto a dimensão espacial quanto a temporal. Isto conduz a que a abordagem MDEI capture melhor as características espaciais da difusão e flutuações na taxa de adoção, explicado pelo melhor desempenho deste método na aproximação do ajuste das curvas às diversas inovações estudadas.

Recorreu-se ao Coeficiente de Correlação de Pearson e à Análise de Risco para avaliar a força da relação entre as curvas ajustadas e os valores observados, bem como a qualidade do ajuste de ambas as abordagens. Embora os resultados tenham revelado uma concordância satisfatória no alcance do ajuste das curvas de adoção para ambos os modelos, um modelo mais adequado revelou ser o MDEI por apresentar uma melhor qualidade de ajuste para um número de inovações mais amplo, contendo uma componente espaço-temporal que aproxima o modelo à realidade, por exemplo, relacionada com o efeito positivo de aglomerados (*clusters*) na difusão de uma inovação. A componente espaço-temporal permite assim uma maior exatidão entre os valores estimados e os valores observados. Para além disso, o MDEI apresentou uma correlação positiva relevante entre o parâmetro ξ e o parâmetro α . Embora esta correlação não indique necessariamente causalidade, é um ponto de partida para inferir que, quanto maior o alcance de uma inovação relativa à área da região inicial de disseminação, maior será a difusividade da inovação. No entanto, os valores estimados para estes parâmetros teriam de ser alvo de uma análise estatística mais complexa.

Em síntese, esta investigação pretende contribuir para o desenvolvimento de modelos explicativos no campo de estudo da difusão da inovação, usando como metáfora a difusão de energia como ocorre na condução de calor em regime transiente, apresentando resultados interessantes. Salienta-se a existência de questões em aberto, as quais requerem desenvolvimentos futuros, nomeadamente:

- no uso de uma maior diversidade de dados de inovações complementares, para uma subcategorização mais eficaz e eficiente;
- num estudo estatístico mais aprofundado da análise dos valores estimados dos modelos desenvolvidos;
- e, ainda, numa exploração mais afincada dos efeitos da variação espaço-temporal, visando impulsionar a difusividade e a eficiência no decorrer deste processo.

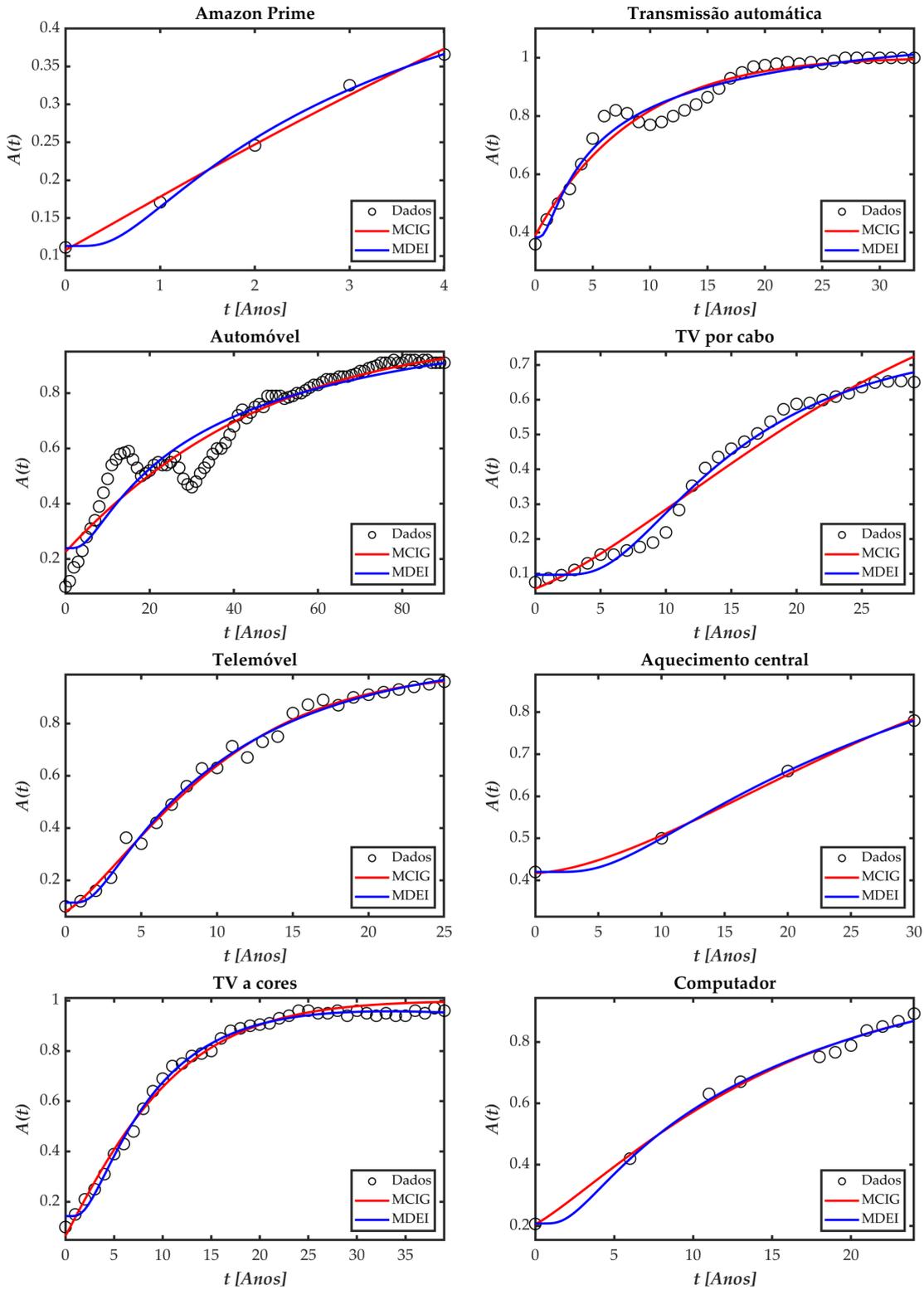
Bibliografia

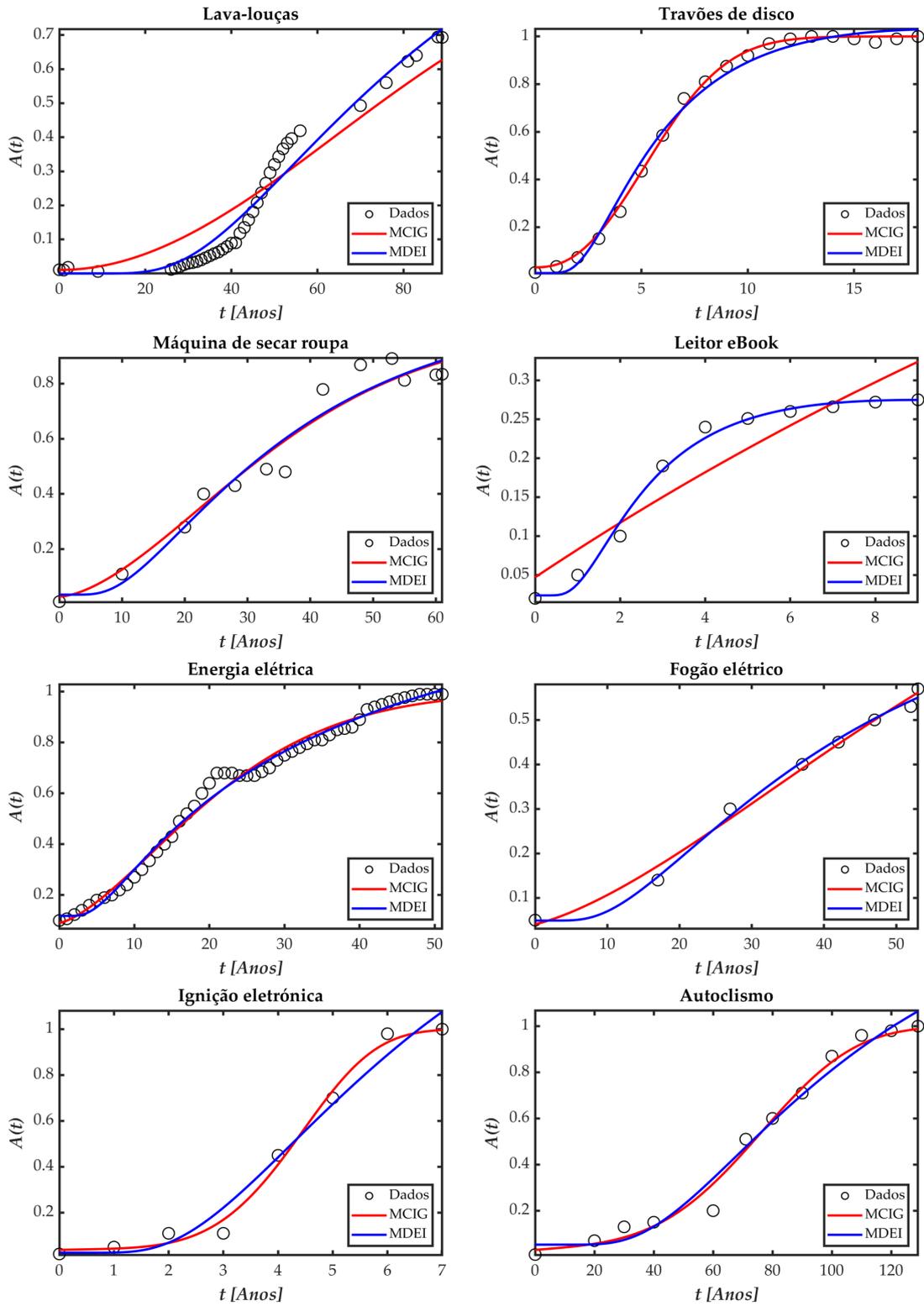
- Aven, T. (2012). The risk concept—historical and recent development trends. *Reliability Engineering & System Safety*, 99:33–44.
- Baptista, R. (2000). Do innovations diffuse faster within geographical clusters? *International Journal of industrial organization*, 18(3):515–535.
- Bass, F. M. (1969). A new product growth for model consumer durables. *Management science*, 15(5):215–227.
- Bass, F. M. (2004). Comments on “a new product growth for model consumer durables the bass model”. *Management science*, 50(12_supplement):1833–1840.
- Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. (1959). Conduction of heat in solids.
- Diakonova, S., Artyshchenko, S., Panfilov, D., and Gusev, M. (2021). Factors influenced on the connection density in the innovation diffusion process. In *XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021” Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Volume 1*, pages 878–886. Springer.
- Diakonova, S., Artyshchenko, S., Sysoeva, D., Surovtsev, I., and Karpovich, M. (2020). On the application of the thermal conductivity equation to describe the diffusion process. In *E3S web of conferences*, volume 175, page 05050. EDP Sciences.
- Geroski, P. A. (2000). Models of technology diffusion. *Research policy*, 29(4-5):603–625.
- Granovetter, M. (1978). Threshold models of collective behavior. *American journal of sociology*, 83(6):1420–1443.
- Heidenreich, M. (2012). *Innovation and institutional embeddedness of multinational companies*. Edward Elgar Publishing.
- Hirooka, M. (2005). Nonlinear dynamism of innovation and business cycles. In *Entrepreneurships, the New Economy and Public Policy: Schumpeterian Perspectives*, pages 289–316. Springer.
- Kotler, P. (1971). *Marketing decision making: A model building approach*, volume 41. Holt, Rinehart and Winston New York.
- Lechman, E. et al. (2016). *ICT diffusion in developing countries*. Springer.
- Lovering, T. (1935). Theory of heat conduction applied to geological problems. *Bulletin of the Geological Society of America*, 46(1):69–94.

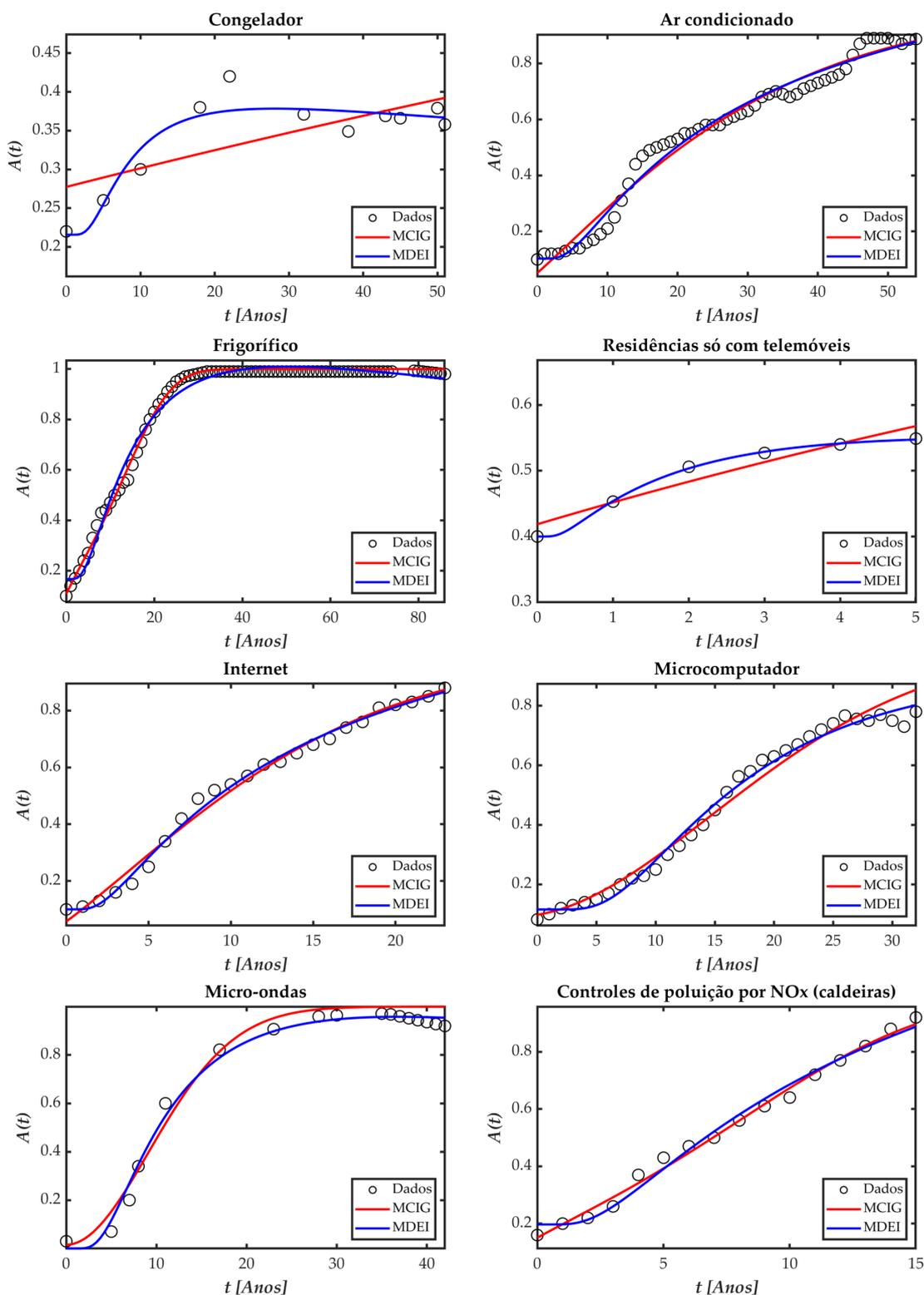
- Mansfield, E. (1961). Technical change and the rate of imitation. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pages 741–766.
- Ortiz-Ospina, E. (2019). The rise of social media. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/rise-of-social-media>.
- Panão, M. and Moreira, A. (2008). A real-time assessment of measurement uncertainty in the experimental characterization of sprays. *Measurement Science and Technology*, 19(9):095402.
- Panão, M. J. and Panão, Miguel, R. (2021). *Transmissão de Calor - uma abordagem teórico-prática*. Quântica Editora.
- Panão, M. R. (2023). Lumped capacitance method with thermal delay. *Preprint*, page 4pp.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations*. Free Press.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3):379–423.
- Stoneman, P. (2002). *The economics of technological diffusion*. Wiley-Blackwell.
- Terrell, G. R. and Scott, D. W. (1985). Oversmoothed nonparametric density estimates. *Journal of the American Statistical Association*, 80(389):209–214.

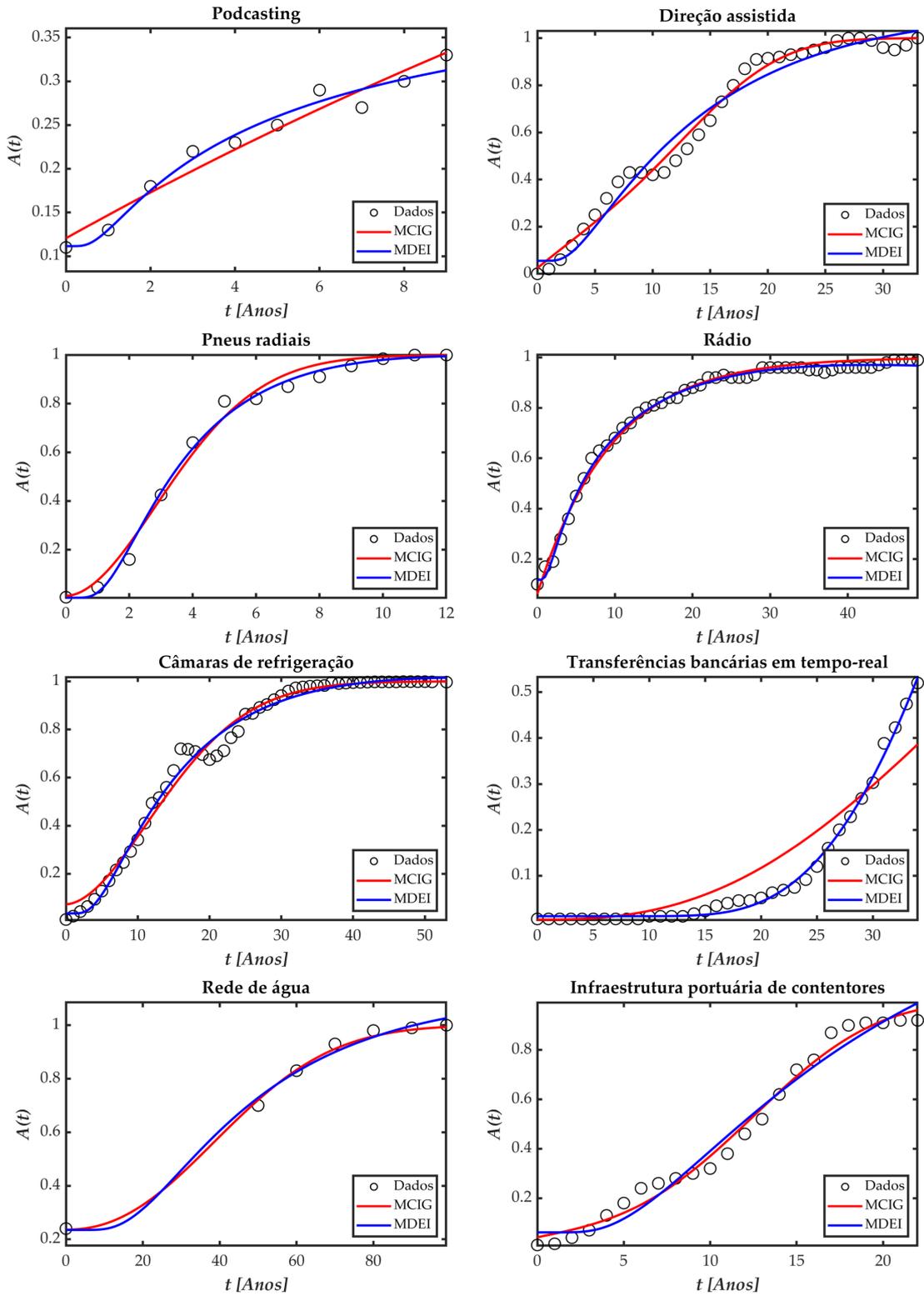
Apêndice A. Resultados dos Ajustes das Curvas da Inovação

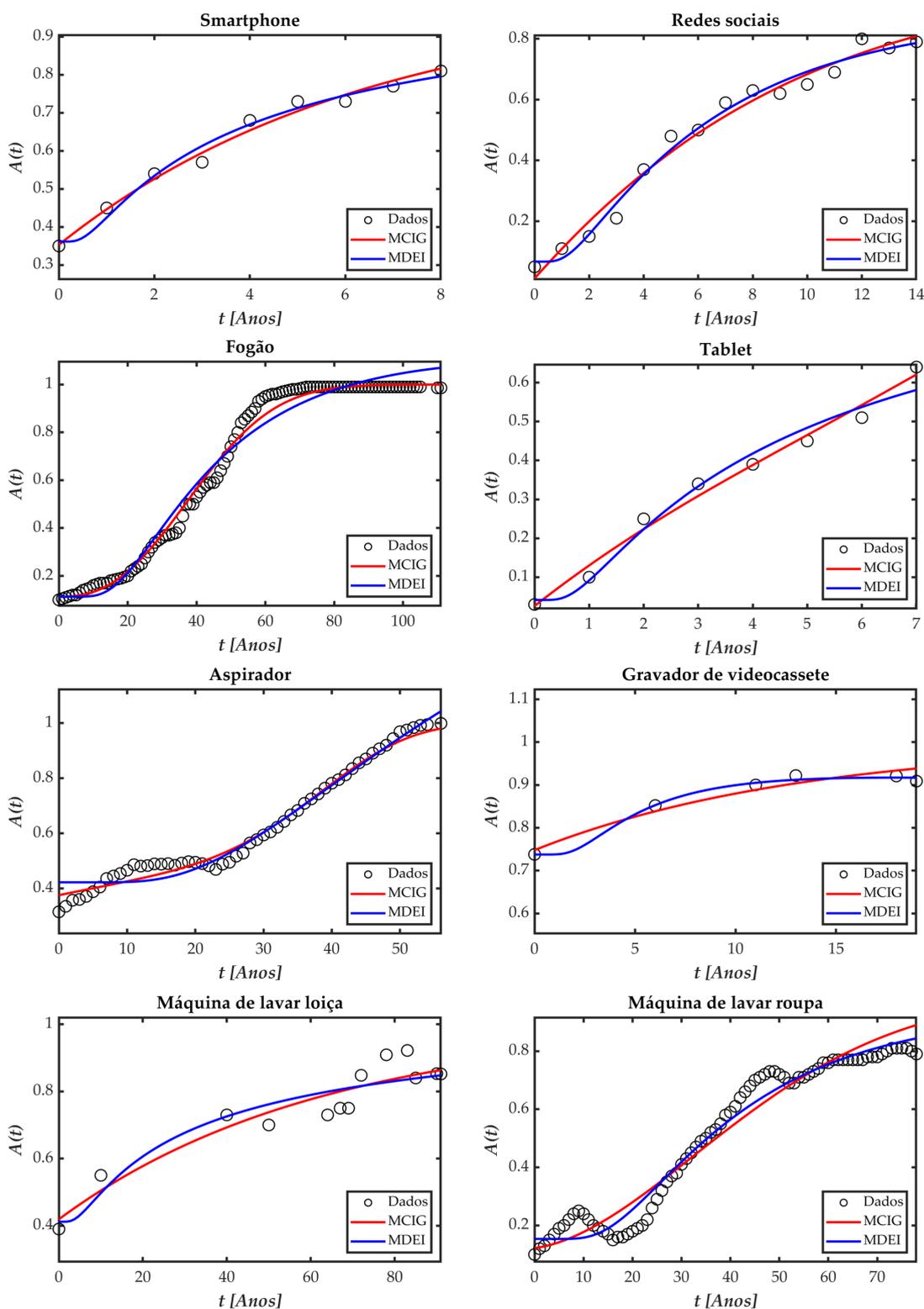
Resultados obtidos da aproximação das curvas de diversas inovações, por analogia, aos métodos de condução de calor transiente.

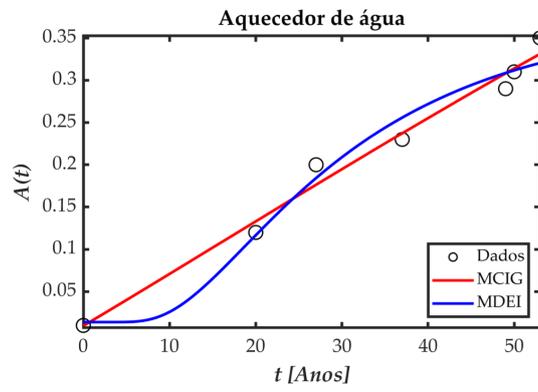






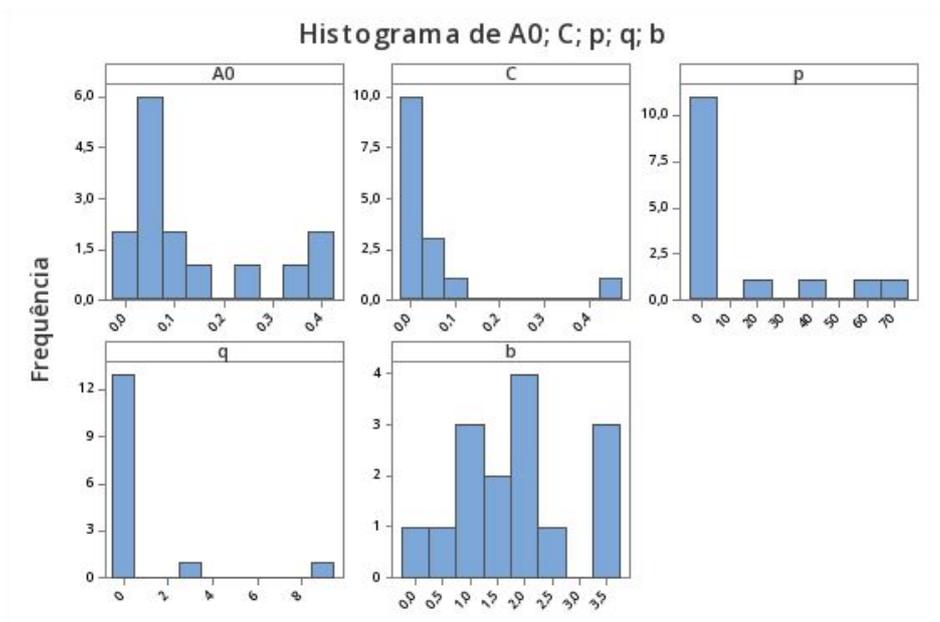




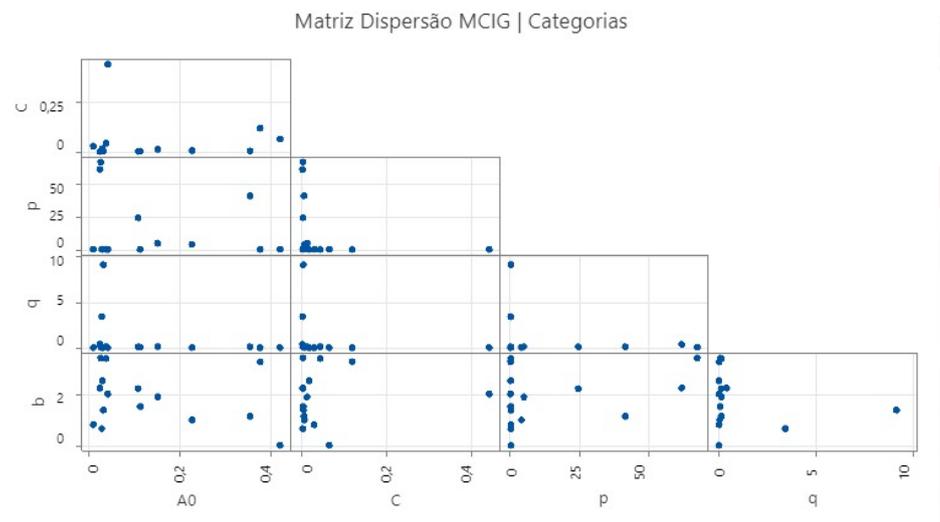


Apêndice B. Resultados para a Análise Paramétrica

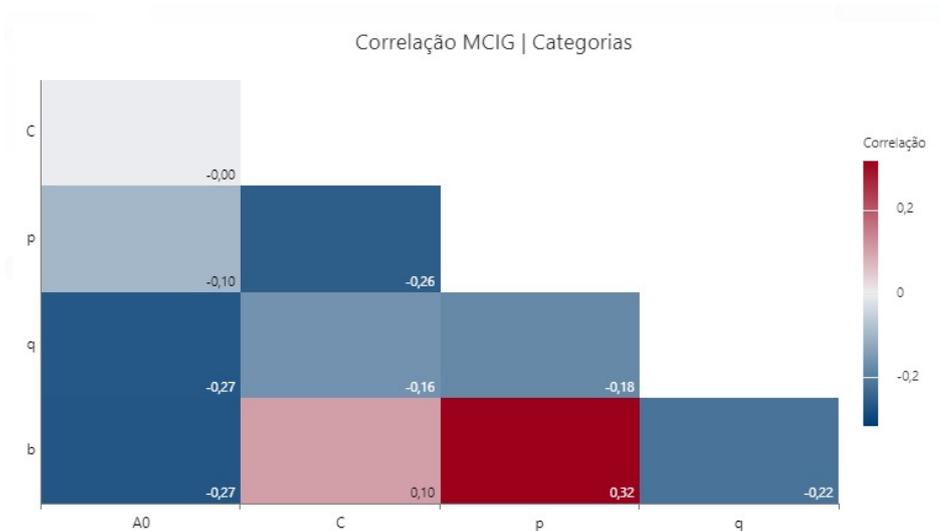
Resultados da análise dos parâmetros estimados separando as inovações entre as que o MCIG e MDEI descreviam melhor, usando o critério de maior R^2 .



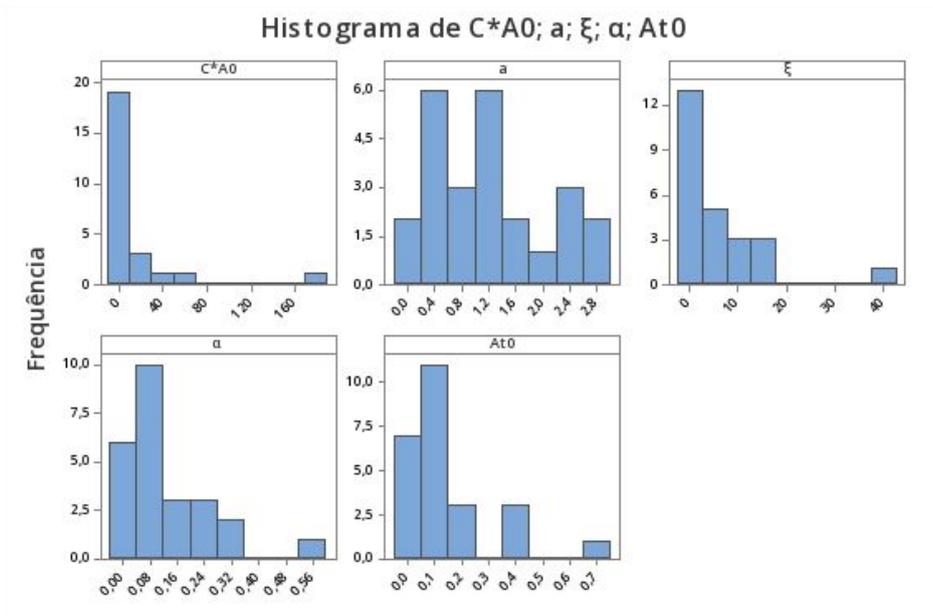
Histogramas para a abordagem MCIGmediante categorização



Matriz Dispersão para a abordagem MCIGmediante categorização



Correlação para a abordagem MCIGmediante categorização



Histogramas para a abordagem MDEImediante categorização

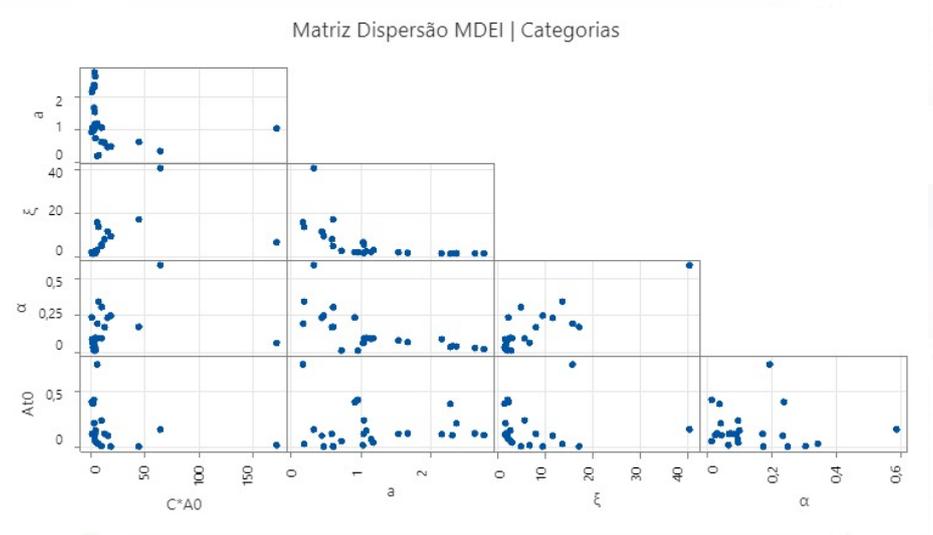
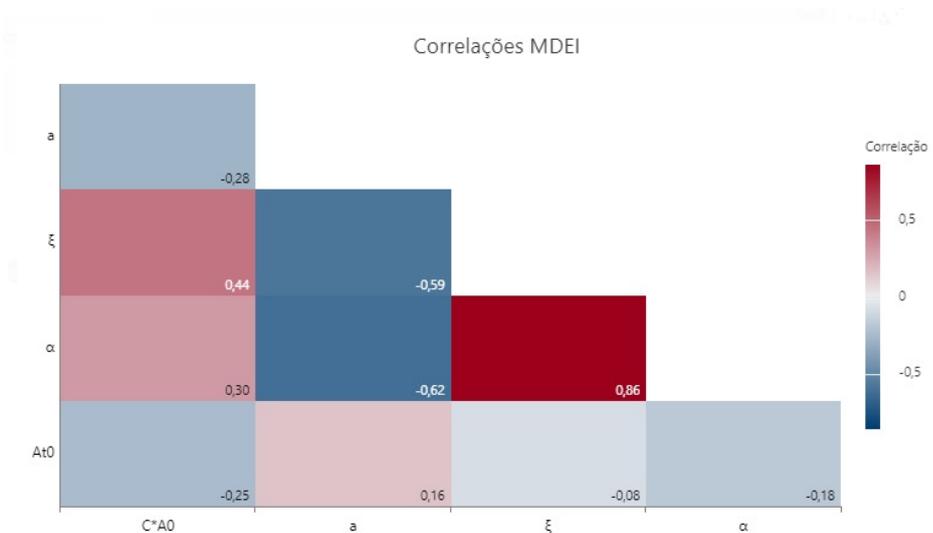


Diagrama de Dispersão para a abordagem MDEImediante categorização



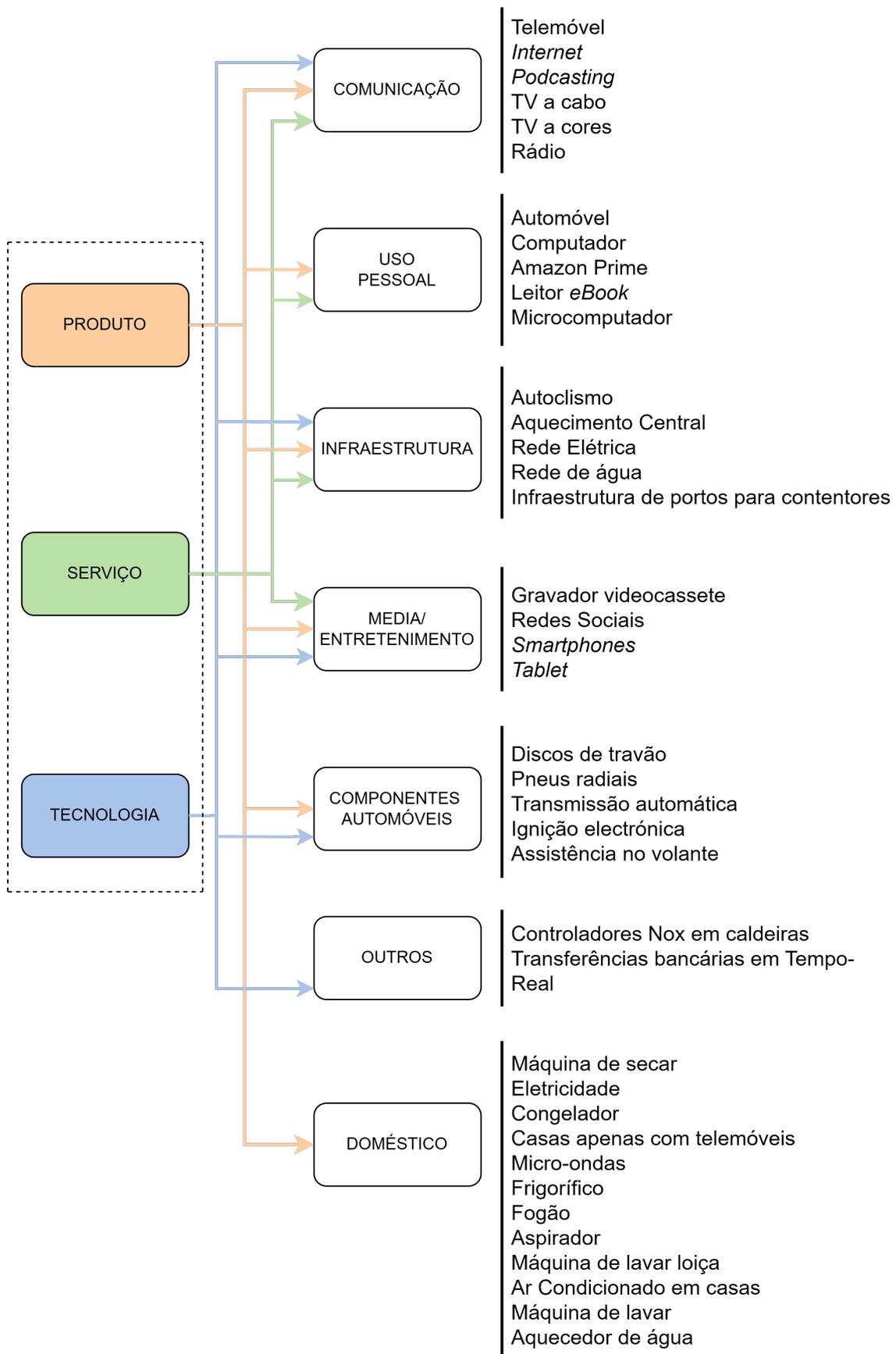
Correlação para a abordagem MDEImediante categorização

Desempenho dos métodos com categorização das inovações

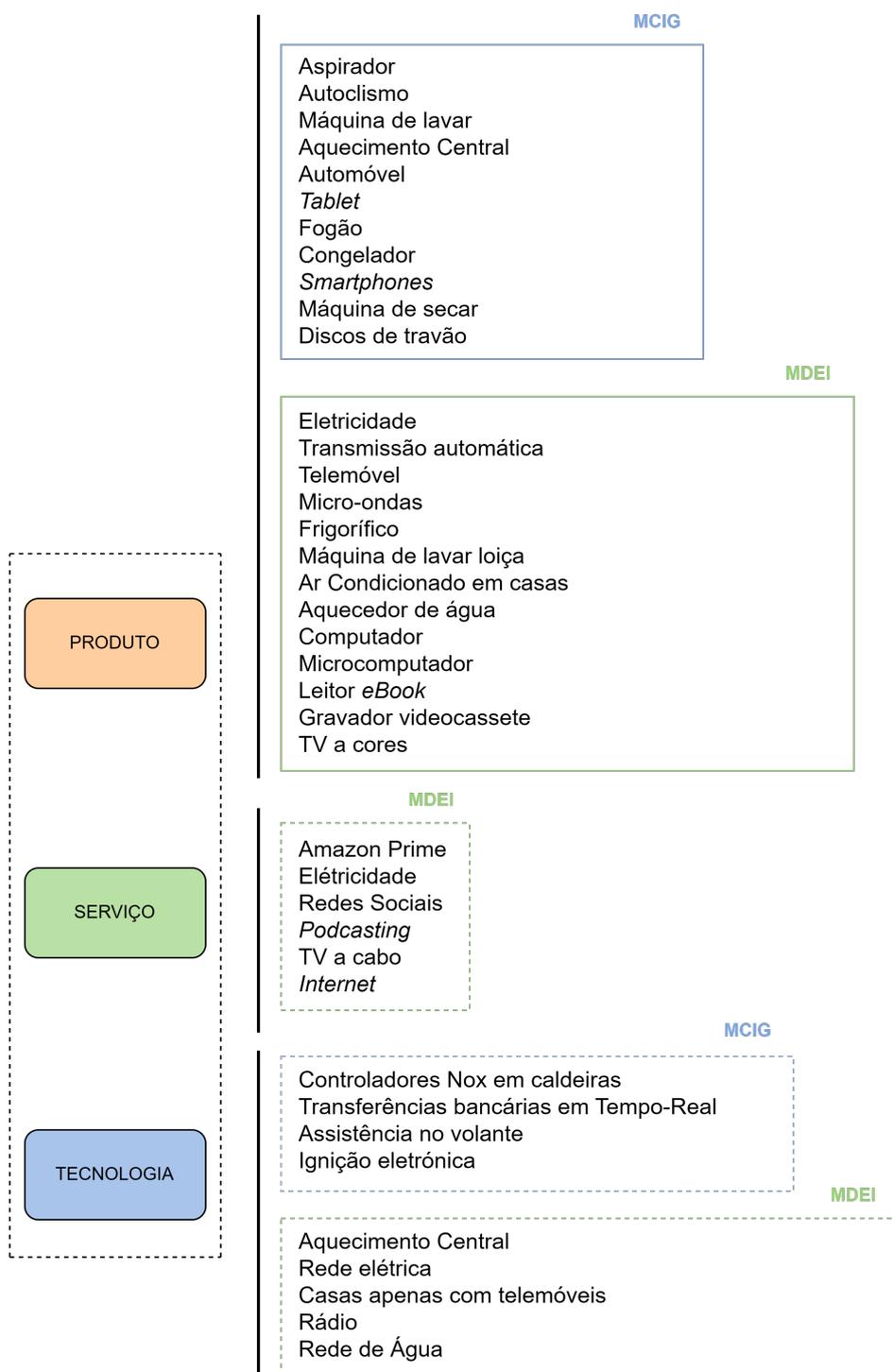
No sentido de comparar os métodos, procurou-se categorizar as diferentes inovações em estudo distinguindo-as em três grupos principais: Produtos, Serviços e Tecnologias. A categoria de Produtos inclui uma ampla gama de bens físicos, que são fabricados e disponibilizados no mercado, tratando-se de bens tangíveis. A segunda categoria, de Serviços, refere-se a atividades intangíveis colocadas à disposição para atender às necessidades dos consumidores. Por último, a categoria de Tecnologia conjuga os avanços científicos e técnicos que fornecem oportunidades e soluções inovadoras. Posteriormente, dentro de cada categoria principal, procedeu-se à subcategorização das inovações por forma a fornecer uma visão mais detalhada das diferentes inovações. A categorização e subcategorização mencionadas encontram-se esquematizadas na figura seguinte.

A categorização e subcategorização das diferentes inovações oferece uma forma qualitativa de comparar os modelos MCIGe MDEI. Dentro de cada categoria, ilustram-se quais as inovações melhor descritas por cada modelo de acordo com o critério simples de desempenho R^2 .

Observa-se que o MDEI é mais transversal na captura com alguma precisão das características associadas à difusão de inovações em todas as categorias, em especial a dos Serviços. Apesar do equilíbrio entre modelos na descrição das curvas de inovação nos Produtos e Tecnologias, os resultados corroboram a análise de dados geral realizada anteriormente, a qual apresenta o modelo MDEI como o mais robusto e capaz de abranger a descrição de uma maior variabilidade de curvas de inovação.



Categorização e subcategorização das diferentes inovações analisadas neste trabalho.



Esquemática dos modelos com melhor desempenho tiveram em relação à descrição das curvas de difusão das várias categorias das inovações.