

MODELAGEM SOCIAL E INCLUSÃO ENERGÉTICA: EXPLORANDO O MODELO WONDERLAND NAS CONDIÇÕES REAIS DE MUNICÍPIOS BRASILEIROS

Paulo S. dos Santos Jr¹ (IC), Pedro Henrique Naves Vasconcelos (PG)¹, Antonio Carlos Zambroni De Souza (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Desenvolvimento regional. MatLab. Modelagem. Setor elétrico.

Introdução

Para que uma região saia da ameaça da pobreza extrema, ações devem ser tomadas para que o desenvolvimento naquele local leve a comunidade para uma possível condição ideal. O desenvolvimento regional sustentável pode ser pensado em um conjunto de parâmetros que elevem esse local a condições sadias. Segundo Casado et al. (2012), os principais parâmetros para a melhora ou o entendimento de uma comunidade arbitrária seriam os dados da economia, meio ambiente e social. Esses parâmetros podem ser analisados para uma melhor compreensão do desenvolvimento da região, mostrando, por exemplo, o que realmente essa comunidade necessita.

Uma forma de fazer a análise do desenvolvimento regional é por meio de modelos matemáticos. Um modelo matemático desempenha um papel fundamental no planejamento regional sustentável, fornecendo ferramentas poderosas para analisar, simular e tomar decisões. Isso é possível mediante, por exemplo, análise de dados históricos e previsão de tendências futuras na população, crescimento econômico, uso da terra, consumo de recursos e setor elétrico. Essas previsões são cruciais para o planejamento de infraestrutura, serviços públicos e políticas de longo prazo. Neste trabalho, utilizou-se um modelo matemático de um sistema dinâmico integrado.

O modelo de um sistema dinâmico integrado consiste em uma representação matemática que combina várias partes interconectadas de um sistema complexo em um único modelo coeso. Com isso, é possível estudar e compreender como diferentes componentes de um sistema interagem ao longo do tempo e como as mudanças em uma parte do sistema podem afetar outras partes. Com isso, eles permitem simular o comportamento do sistema ao longo do tempo, testar diferentes cenários e fazer previsões sobre como o sistema responderá a diferentes condições ou intervenções.

O modelo de simulação Wonderland é um

modelo de sistema dinâmico, explicado no parágrafo acima. Assim, o modelo Wonderland de Sanderson et al. (1992), utiliza-se dessa abordagem para modelar um fenômeno real. O modelo utiliza parâmetros econômicos, sociais e ambientais para mostrar o desenvolvimento atual e uma possível previsibilidade de uma região fictícia, mostrando situações extremas, ou seja, parâmetros de extrema pobreza e riqueza. O modelo pode ser dito proeminente devido ao seu pequeno número de parâmetros, equações, implementação relativamente fácil e adaptabilidade (HERBERT, Ric D. et al., 2005).

Entretanto, o estudo feito pelo Vasconcelos et al. (2021), quis combinar a abordagem dinâmica de sistemas do Wonderland a introdução de conceitos-chave de pobreza energética e sustentabilidade energética, constituindo uma ferramenta didática para a avaliação qualitativa do desenvolvimento regional sustentável. Essa adição, mostra-se ser ideal para o desenvolvimento de uma sociedade, já que segundo Mohammed e Akuoko (2022), através de uma análise quantitativa, o aumento da taxa de eletrificação de uma região leva a uma queda na taxa de mortalidade infantil. Segundo Kanagawa e Nakata (2008), o aumento da área conectada ao sistema elétrico melhora fatores socioeconômicos, como saúde e educação de zonas rurais, e poderá contribuir para a erradicação da pobreza e levar países em desenvolvimento rumo ao desenvolvimento sustentável.

Por conta de tais informações descritas acima, o objetivo desta iniciação científica foi utilizar o modelo Wonderland acrescido de parâmetros energéticos em uma região real do Brasil. Portanto, levando a analisar os impactos de cada parâmetro (Economia, meio ambiente, população e setor elétrico) no local escolhido, com tais informações, haverá uma possibilidade de mostrar a previsibilidade do desenvolvimento da região, por fim, mostrando a importância do investimento em cada setor.

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta a metodologia. A

Seção 3 mostra os resultados obtidos e análise. Por fim, a Seção 4 compreende a conclusão deste artigo.

Metodologia

Nesta seção, são apresentadas a dinâmica do sistema, as equações e as principais premissas do modelo. Como o acesso à energia elétrica é um motor para o desenvolvimento regional, este trabalho está interessado em explorar esse relacionamento. Portanto, está subdividido em duas partes, que são: (1) Coleta de dados, (2) Equacionamento e Parametrização.

1) Coleta de dados:

Depois de todo o estudo sobre o modelo Wonderland original e o modelo desenvolvido por Vasconcelos et al. (2021), deu-se início a coleta de dados para a modelagem de uma região real. Foi escolhida uma região aleatória no Brasil, no caso, Arapiraca - AL.

Para começar a pesquisa, pensou-se em iniciar o encontro dos parâmetros através dos efeitos populacionais do local. Para isso, nas equações do modelo (mostradas na seção a seguir) foi necessário obter os dados de mortalidade e natalidade (Tabnet.datasus), e isso foi feito na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados Populacionais de Arapiraca-AL.

Anos de amostragem	População	Nascidos Vivos	Mortalidade
1940	26.514	Sem dados	Sem Dados
1950	37.073	Sem dados	Sem Dados
1960	56.657	Sem dados	Sem Dados
1970	94.287	Sem dados	Sem Dados
1980	136.178	Sem dados	Sem Dados
1991	164.921	Sem dados	Sem Dados
1992	168.086	Sem dados	Sem Dados
1993	171.792	Sem dados	Sem Dados
1994	174.913	5427	Sem Dados
1995	177.957	5354	Sem Dados
1996	173.339	5370	982
1997	175.438	5089	1280
1998	177.215	4862	1258
1999	178.988	5118	1118
2000	186.466	4885	1083
2001	180.766	4667	1018
2002	188.968	4169	1138
2003	190.989	4180	1094
2004	193.103	3908	1079
2005	197.520	4169	1175
2006	199.964	3980	1191
2007	202.398	3970	1249
2008	208.447	3735	1171
2009	210.521	4080	1285
2010	214.006	3800	1388
2011	216.108	3836	1359
2012	218.140	3810	1280
2013	227.640	3784	1435
2014	229.329	4065	1493
2015	231.053	4204	1512
2016	232.671	3779	1670
2017	234.185	3950	1599
2018	230.417	4156	1485
2019	231.747	3494	1602
2020	233.047	3964	1862
2021	234.309	3771	1893

Fonte: os autores.

Com os dados dispostos acima e utilizando a linguagem de programação Python no software PyCharm, foi feita a tentativa de utilizar a biblioteca Python “*scipy.optimize*” para fazer um *fitting* segundo as equações tanto de mortalidade, quanto de natalidade. E assim, possibilitar o encontro dos parâmetros dessas equações para adicioná-los no modelo Wonderland e encontrar uma curva populacional coerente aos dados.

2) Equacionamento e Parametrização:

Depois de algumas tentativas e erros para o

encontro dos parâmetros, foi necessário fazer uma reformulação das equações do modelo. Entretanto, mesmo com tais reformulações, as partes da Economia, Demografia e Meio Ambiente são constituídas por equações semelhantes às originais do *Wonderland* de referência Milik et al. (1996) e as partes do setor elétrico semelhantes às da referência Vasconcelos et al. (2021).

Antes da apresentação das equações, coloca-se a seguir todas as variáveis e parâmetros na Tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis e Parâmetros do Modelo.

Var	Description	Section
x	Tamanho da População	Demografia
b	Taxa Bruta de Natalidade	Demografia
d	Taxa Bruta de Mortalidade	Demografia
y	Economia Per Capita	Economia
i	Renda Líquida Per Capita	Economia
c	Custo de Vida Per Capita	Economia
eb	Conta de Energia	Economia
z	Estoque de Capital Natural	Meio Ambiente
p	Poliuição por Unidade de Produção	Meio Ambiente
f	Fluxo de Poluentes	Meio Ambiente
ed	Demanda Energética	Setor Elétrico
ec	Energia Efetivamente sendo Consumida	Setor Elétrico
ndg	Geração não Despachável (não poluente)	Setor Elétrico
dgc	Capacidade Instalada para Geração Despachável	Setor Elétrico
dg	Geração Despachável (Poluente)	Setor Elétrico
tg	Energia Total sendo Gerada	Setor Elétrico
et	Comércio de Energia entre Regiões	Setor Elétrico
es	Segurança Energética	Setor Elétrico

a) População:

$$\frac{dx}{dt} = x(b - d) \quad (1)$$

$$b = \beta_1 \left[\beta_2 - \frac{1}{2} \left(\frac{\beta_i}{1 + \beta_i} \right) \right] [1 - \beta_3(es - 1)^{v_1}] \quad (2)$$

$$d = \alpha_1 \left[\alpha_2 - \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_i}{1 + \alpha_i} \right) \right] [(1 + \alpha_3(1 - z)^{v_2})(1 + \alpha_4(1 - es)^{v_3})] \quad (3)$$

A equação (1) manteve sua estrutura do modelo original, onde o nascimento bruto e as taxas de mortalidade ditam o crescimento populacional. As equações (2) e (3), apresentam um termo de segurança energética adicionado, representando a redução da natalidade e na taxa de mortalidade, mostrando a disponibilidade da eletricidade na população. Na demografia, as modificações foram feitas apenas retirando uma das equações do modelo, sendo vista como não necessária.

Os parâmetros que não representam dados objetivos ($\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta, v_1, v_2, v_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha$) são encontrados por meio de dados históricos que possibilitam estimar os valores. Assim como descrito na seção anterior, a busca pelos dados deu a possibilidade de fazer essa inferência. Mas, caso não seja possível, uma calibração de tentativa e erro de parâmetros é necessária para produzir um comportamento coerente.

b) Economia:

$$\frac{dy}{dt} = y \left[\gamma - (\gamma + \eta) [(1 - z)^{\lambda_1} + (1 - es)^{\lambda_2}] - \frac{\gamma_0 \tau}{1 - \tau} \right] \quad (4)$$

$$i = y - c \quad (5)$$

$$c = \phi(1 - z)^{\mu} y + \phi_c ec \quad (6)$$

As equações (4) e (6) mantiveram a mesma estrutura do modelo original com impostos ambientais. Na equação (4), o termo “es”, mostra os efeitos negativos da falta de energia elétrica na economia. E o termo “ec” mostra os gastos da energia consumida, tanto que em (5), a equação 6 é subtraída da economia per capita.

Assim como na demografia, a modificação foi apenas a exclusão de uma das equações do modelo relacionada especificamente a conta de energia já disposta em “ec”.

c) Meio Ambiente:

$$\frac{dz}{dt} = \nu z(1-z) \left[-\frac{\omega f - \delta z^p}{1 + \omega f - \delta z^p} \right] \quad (7)$$

$$\frac{dp}{dt} = -\chi p(1-\tau)es^{\nu p} \quad (8)$$

$$f = pxy - es \cdot \frac{\kappa}{2} \frac{\sigma cx}{1 + \sigma cx} \quad (9)$$

A equação (7), o estoque de capital natural, não foi alterado. A equação (8) apresenta o mesmo decaimento exponencial do modelo original e o modelo do setor elétrico adicionou a segurança energética (es).

Por fim, a equação (9) do modelo do setor elétrico, que trata do fluxo de poluentes, foi reformulada, retirando a parte em que se tratava da energia despachável, porque a forma com que estava colocada na equação demonstrava algo diferente dos dados, além disso, a parte energética já está colocada em “c”.

d) Setor Elétrico:

$$ec = \nu_e \cdot x \left(1 + \frac{e^{\omega_e y}}{1 + e^{\omega_e y}} \right) \quad (10)$$

$$dgc = \phi_e \cdot z \quad (11)$$

$$dg = \begin{cases} ec - ndg, & \text{if } ndg < ec \text{ and } ec - ndg < dgc \\ dgc, & \text{if } ndg < ec \text{ and } ec - ndg > dgc \\ 0, & \text{if } ndg > ec \end{cases} \quad (12)$$

$$\frac{dndg}{dt} = \chi \cdot \left[\frac{e^{\omega_y y}}{1 + e^{\omega_y y}} \right] \cdot (1 + \tau_{ndg}) \quad (13)$$

$$eg = dg + ndg \quad (14)$$

$$es = \frac{\nu_e}{1 + e^{-\rho_e \cdot (eg - ec)}} \quad (15)$$

A equação (7) sofreu algumas modificações em relação ao modelo do setor elétrico, nela foi retirado um parâmetro aparentemente desnecessário. Assim, a equação (7) descreve a demanda de energia proporcionalmente ao tamanho da população “x” e à produção econômica. Enquanto a economia evolui, ou seja, “y” assume valores maiores.

As equações (11) e (12) estabelecem a capacidade instalada e a geração real de fontes não

renováveis (despacháveis) por unidades de geração, respectivamente. O primeiro também é uma função do estoque de capital natural, que representa a disponibilidade de recursos energéticos, desde que haja um alto nível de qualidade no meio ambiente. Este último estabelece o montante gerado a partir de fontes despacháveis em função da diferença entre a potência consumida do pc e a quantidade que está sendo gerada a partir fontes não despacháveis (ndg).

A geração não despachável (ndg) é uma variável de entrada do sistema e, portanto, pode assumir qualquer forma para melhor à variabilidade dos recursos energéticos renováveis.

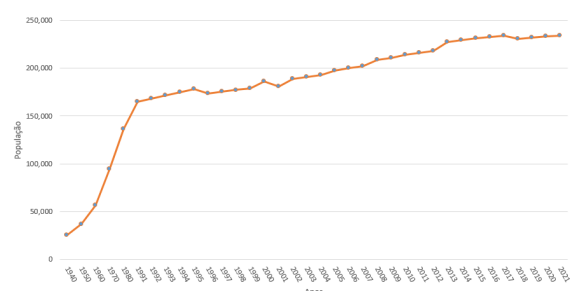
A quantidade total de energia sendo gerada na eq. (14) é dada como a soma da geração de fontes despacháveis e não despacháveis, reformulada neste trabalho retirando a ideia de energia sendo comercializada entre duas regiões vizinhas.

Por fim, o índice de segurança energética é dado na eq. (15). É uma função do excedente (ou deficiência) de energia na região. Como desde que a demanda de energia dos clientes esteja sendo satisfeita, este índice assume o valor unitário. Tende a zero caso contrário. Este índice representa o sistema de energia capaz de fornecer continuamente todos os clientes. Se for menor que a unidade, pode-se inferir que nem todas as residências, comércio ou indústrias estão sendo energizadas, e assim a economia pode ser afetada.

Resultados e discussão

Inicialmente, pensou-se em começar os testes relacionados ao desenvolvimento populacional de Arapiraca-AL. Como demonstrado pela metodologia, a Tabela 1 apresenta os dados de mortalidade, natalidade e população da região, bem como as equações (1), (2) e (3) representam a demografia. Um algoritmo em Python foi usado para criar o *fitting* da curva dos dados e, como resultado, os parâmetros de mortalidade e natalidade foram mostrados. Para obter um gráfico coerente do desenvolvimento populacional da comunidade estudada, adicionou-se esses parâmetros adquiridos ao modelo do *Wonderland* no Octave/MatLab. O gráfico a seguir mostra a população real de Arapiraca de 1940 a 2021, baseado nos dados da Tabela 1.

Gráfico 1 – Desenvolvimento Populacional de Arapiraca-AL.



Entretanto, de acordo com o cenário potencial de Arapiraca, não foi possível obter resultados coerentes adicionando os dados populacionais no Python, retirando os resultados dos parâmetros e inserindo-os no modelo. O gráfico populacional não apresentava valores iniciais comparáveis aos que foram pesquisados, e, ocasionalmente, o modelo não convergiu. Isso indicava um erro na parametrização. Algumas tentativas foram feitas para alterar as equações do Python, mas mesmo assim os resultados não foram satisfatórios.

A parametrização adequada do modelo não foi alcançada mesmo com testes constantes. Como resultado, não era possível continuar os testes para obter os resultados do modelo *Wonderland* sem considerar a solução do problema.

Assim, os autores continuaram a buscar resultados precisos mesmo após a conclusão da iniciação científica. O próximo passo foi compreender que o excesso de parâmetros, principalmente devido a inclusão do setor elétrico no modelo, poderia ser a causa do erro de parametrização. Com isso, pensou-se em, primeiramente, fazer um estudo de dados da eletrificação de Arapiraca para encontrar todos os parâmetros energéticos e por fim levando a uma regressão linear desses dados que resultaria no encontro dos parâmetros energéticos.

Conclusões

Este trabalho demonstrou uma estrutura matemática que avalia qualitativamente o desenvolvimento regional, considerando aspectos econômicos, demográficos e ambientais. O objetivo principal do trabalho foi realizar testes no *Wonderland* em uma região real, particularmente Arapiraca-AL, e isso foi feito. Os resultados ajudaram a entender as maneiras pelas quais esses testes foram realizados incorretamente, bem como as maneiras pelas quais poderiam ser realizados corretamente.

A obtenção de resultados coerentes com o modelo exigirá a realização contínua de testes reais e a coleta de dados da área escolhida. Além disso, deve-se levar em consideração uma avaliação do modelo em busca de ajustes potenciais.

Finalmente, é importante afirmar que os modelos computacionais, mesmo os modelos baseados em equações diferenciais, são simplificações de fenômenos reais. No entanto, apesar dessa simplificação, o modelo pode levar a um entendimento inicial das necessidades desses fenômenos, portanto, encontrando possíveis soluções e ajudando o melhor entendimento da realidade.

Agradecimentos

Agradeço, ao PIBIC FAPEMIG pelo apoio dado a esta pesquisa de iniciação científica. Agradeço também, ao professor Antonio Carlos Zambroni De Souza e à professora Cláudia Eliane da Matta pela orientação, apoio e pela aprendizagem neste trabalho. Agradeço aos professores do grupo aPTIs SG2 pelos ensinamentos acadêmicos e pessoais durante o tempo do projeto. Por fim, agradeço ao Mestre Pedro Henrique Naves Vasconcelos pelos conselhos, ensinamentos e amizade.

Referências

CASADO, Frank Leonardo; SILUK, Julio Cezar Mairese; ZAMPIERI, Nilza Luiza Venturini. Universidade empreendedora e desenvolvimento regional sustentável: proposta de um modelo. **Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria**, v. 5, p. 633-649, 2012.

SANDERSON, W. C. **Simulation Models of Economic, Demographic, and Environmental Interactions: Are They on a Sustainable Development Path?** Monograph. Disponível em: <<https://iiasa.dev.local/>>.

HERBERT, Ric D. et al. Economic and Environmental Impacts of Pollution Control in a Multi-Country Model. In: **MODSIM05-International Congress on Modelling and Simulation: Advances and Applications for Management and Decision Making, Proceedings**. Modelling & Simulation Society of Australia & New Zealand, 2005. p. 1035-1041.

VASCONCELOS, Pedro N. et al. Modeling the Power Sector of Wonderland: an integrated system dynamics model to assess a sustainable regional development. In: **2021 IEEE Mexican Humanitarian Technology Conference (MHTC)**. IEEE, 2021. p. 38-45.

MOHAMMED, Mikidadu; AKUOKO, Mathias. Subnational variations in electricity access and infant mortality: evidence from Ghana. **Health Policy OPEN**, v. 3, p. 100057, 2022.

KANAGAWA, Makoto; NAKATA, Toshihiko. Assessment of access to electricity and the socio-economic impacts in rural areas of developing countries. **Energy policy**, v. 36, n. 6, p. 2016-2029, 2008.

TabNet Win32 3.2: Nascidos vivos - Alagoas. Disponível em: <<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/deftohtm.exe?sinasc/cn/v/nval.def>>.

MILIK, Alexandra et al. Slow-fast dynamics in wonderland. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 1, p. 3-17, 1996.