

Impactos econômicos da ampliação do uso de energia solar residencial em Minas Gerais

Economic impacts of the expansion in the use of residential solar energy in Minas Gerais

Micaele Martins de Carvalho⁽¹⁾

Aline Souza Magalhães⁽²⁾

Edson Paulo Domingues⁽³⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal de Minas Gerais

⁽²⁾ Universidade Federal de Minas Gerais

⁽³⁾ Universidade Federal de Minas Gerais

Abstract

This article analyzes the economic impacts of the broadening of solar energy use by the *mineiras* families, through the computable general equilibrium (CGE) model named *Imagem-MG*. In this research, the distributive impacts of the use of renewable energy for self-consumption were analyzed, unlike previous studies that used this methodology to analyze energy issues. The set of 10 representative families was investigated, which made it possible to compare the consumption pattern changes between different yield classes. A technical and economic feasibility analysis was carried out to ascertain the conditions of the adoption of solar energy, throughout two different scenarios: the adoption of photovoltaic panels to the distributed generation of electricity and the adoption of water heating residential system. The results show that the adoption of photovoltaic panels causes sectorial impacts distinct from the adoption of solar heaters due to the composition of the families' consumption by each technology.

Keywords

solar energy, computable general equilibrium, photovoltaic panels, solar heaters.

JEL Codes C68, Q42, Q48.

Resumo

Este artigo analisa os impactos econômicos de uma ampliação do uso de energia solar pelas famílias mineiras através do modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC) denominado Imagem-MG. Em contraste com outros trabalhos que utilizam essa metodologia para analisar questões energéticas, o presente trabalho se propôs a analisar os impactos distributivos da utilização de energia renovável para autoconsumo. Foi utilizado um conjunto de 10 famílias representativas, o que tornou possível comparar as mudanças no padrão de consumo entre diferentes classes de rendimentos. Realizaram-se análises de viabilidade técnica e econômica a fim de determinar as condições para adoção de energia solar, através de dois cenários distintos: adoção de painéis fotovoltaicos para geração distribuída de eletricidade e adoção de sistemas de aquecimento de água residencial. Os resultados mostram que a adoção de painéis fotovoltaicos gera impactos setoriais distintos da adoção de aquecedores solares devido à composição do consumo das famílias que utilizam cada tecnologia.

Palavras-chave

energia solar, equilíbrio geral computável, painéis fotovoltaicos, aquecedores solares.

Códigos JEL C68, Q42, Q48.

1 Introdução

Apesar de a matriz elétrica brasileira ser composta principalmente por usinas hidrelétricas (64,5%) e termelétricas (27,4%) (EPE, 2017), a utilização e expansão da hidroeletricidade encontram limitações em relação às questões ambientais envolvidas com a construção das usinas e à crise hídrica vivenciada pelo país desde 2014. Além disso, nas últimas décadas foram notórios os conflitos de interesses sobre usos das águas e sobre os grandes reservatórios (Araújo, 2001).

A solução imediata para suprir a demanda energética tem sido a utilização das termoelétricas que, no entanto, é desvantajosa do ponto de vista ambiental, em virtude do aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) associadas à queima de combustíveis fósseis, e do ponto de vista financeiro, devido às condições de geração relativamente mais custosas, revertidas em aumentos de tarifas.¹ Dessa forma, a energia solar tem se tornado uma opção viável, estimulando o surgimento de estudos sobre a viabilidade econômica do seu aproveitamento através de painéis fotovoltaicos (Salamoni *et al.*, 2004; Ordenes *et al.*, 2007; Mitscher; Ruther, 2012; Holdermann; Kissel; Beigel, 2014) e aquecedores solares (Rispoli, 2008; Altoé; Oliveira Filho; Carlo, 2012; Pereira; Santos, 2016).

Outro grupo de estudos tem procurado estimar os impactos econômicos sistêmicos da utilização de fontes de energia renovável, tais como Kancs (2007), Boeters e Koornneef (2011), Lee (2012), Böhringer *et al.* (2012), Cansino *et al.* (2013), Rivers (2013), Cansino *et al.* (2014), Acar e Yeldan (2016) e Dai *et al.* (2016). Contudo, esses estudos se concentram na análise macroeconômica dos impactos do maior uso de energia solar via estímulos à produção. Logo, a literatura não aborda o impacto advindo das modificações do consumo das famílias sobre o sistema produtivo, considerando os ganhos indiretos de renda que as famílias podem auferir.

Como ainda são incipientes estudos sistêmicos (em equilíbrio geral) que captem os efeitos da maior adoção de energia solar por parte das famílias

1 No Brasil, o repasse aos consumidores se dá através de um Sistema de Bandeiras Tarifárias, de acordo com a Resolução Normativa nº 547/13 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), vigente desde janeiro de 2015. O sistema é constituído de três bandeiras (verde, amarela e vermelha), que indicam acréscimo ao custo do quilowatt-hora (kWh), dadas as condições de geração da concessionária de energia. A bandeira verde representa a condição de geração favorável, não há acréscimo na tarifa (Brasil, 2012). Na bandeira vermelha as condições são mais custosas, em que é necessário recorrer às termoelétricas para suprir a demanda de eletricidade, e a tarifa pode chegar a sofrer um acréscimo de R\$0,045 para cada kWh consumido.

sobre a economia, notadamente seus impactos distributivos, setoriais e regionais, o presente artigo buscou contribuir com essa literatura, e com a literatura brasileira, ainda uma lacuna, ao estimar os impactos econômicos sobre a economia de Minas Gerais do maior autoconsumo de painéis fotovoltaicos e aquecedores solares por parte das famílias. Assim, torna-se possível avaliar os impactos de políticas energéticas, fornecendo informações importantes para o planejamento público e para as políticas de redistribuição de renda.

A motivação para um estudo regional encontra respaldo no fato de que o sistema de distribuição de eletricidade no Brasil é regionalizado, assim como é heterogênea a estrutura produtiva e de consumo das regiões. Além disso, como o mercado das distribuidoras de eletricidade se limita, no geral, a um único estado, as análises regionalizadas se tornam relevantes (Mattos; Lima, 2005). Minas Gerais foi escolhida para o estudo em razão da disponibilidade de dados, de ser um estado relativamente grande, responsável por cerca de 9% do produto interno bruto (PIB) nacional, e com uma estrutura produtiva (FJP, 2015) e de desenvolvimento regional (Baccalar, 2000) bem próxima da brasileira.

Em relação à capacidade instalada fotovoltaica, o Brasil adicionou 0,9GW em 2017, alcançando a décima posição no *ranking* mundial de instalações fotovoltaicas adicionadas, sendo o primeiro lugar ocupado pela China com 53GW, seguida pelos Estados Unidos com 10,6GW e Índia com 9,1GW (IEA, 2018). Mais especificamente, em relação à geração distribuída no Brasil, Minas Gerais destaca-se como estado com maior número de unidades consumidoras de geração distribuída, em que a fonte solar fotovoltaica representa 70% da potência instalada, sendo principalmente consumida nas classes residencial (79,5%) e comercial (15%) (ANEEL, 2017). Ademais, Minas Gerais é um dos estados de maior nível de irradiação solar, cuja radiação média é de 6kWh/m²/dia (kilowatts/hora por metro quadrado por dia), e com grande potencial de expansão de energia fotovoltaica (CEMIG, 2012).

Em resumo, o objetivo principal deste artigo consiste em simular os impactos, sobre a economia de Minas Gerais, decorrentes da utilização de energia solar fotovoltaica residencial ligada à rede elétrica (*on gride*) e da utilização de aquecedores solares como alternativas ao consumo de eletricidade proveniente da concessionária de energia elétrica. São consideradas ainda as condições para aquisição dos painéis fotovoltaicos e aquecedores

solares, tais como os custos do projeto e suas formas de financiamento pelas famílias. Os impactos dessa aquisição sobre indicadores socioeconômicos e setoriais (produção, consumo, renda, nível de emprego), além de resultados por grupos de famílias, são obtidos a partir de simulações com um modelo de equilíbrio geral computável.

2 Metodologia

2.1 Modelo

Um aumento da utilização de energia solar pode alterar a estrutura geral de preços da economia e gerar redistribuição de renda, modificando a estrutura de produção e consumo nos setores produtivos. Segundo Haddad, Perobelli e Santos (2005), como a produção de um setor gera vazamentos que estimulam o crescimento dos demais setores, elevando a produção total em um múltiplo do aumento inicial do setor, pode-se concluir que a importância do setor na economia torna-se maior que sua própria participação no seu produto. Para compreender esses efeitos, o presente trabalho utiliza um modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC), que busca analisar os impactos socioeconômicos provenientes da adoção de aquecedores solares e painéis fotovoltaicos pelas famílias.

Este trabalho utiliza o Imagem-MG, *Integrated Multiregional Applied General Equilibrium Model for Minas Gerais*, um modelo regional para Minas Gerais, desenvolvido a partir do IMAGEM-B, *Integrated Multiregional Applied General Equilibrium Model for Brazil*. Esse modelo segue a linha de outros modelos igualmente construídos no Núcleo de Estudos em Modelagem Econômica e Ambiental Aplicada (Nemea) do Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional da Universidade Federal de Minas Gerais (Cedeplar-UFMG), tais como Carvalho e Domingues (2016), Magalhães *et al.* (2017) e Magalhães *et al.* (2018), que também tratam questões ambientais em escala regional.²

As equações estruturais detalhadas do Imagem-MG podem ser encontradas em Magalhães (2009) e Faria (2009). Além disso, esse modelo possui um amplo conjunto de parâmetros, que são detalhados em Domingues *et al.*

2 Esses modelos seguem a estrutura teórica do modelo *The Enormous Regional Model* (TERM), de tradição australiana (Horridge; Madden; Wittwer, 2005).

(2007). Neste artigo, o modelo foi construído para o estado de Minas Gerais, para o ano base de 2013, partindo das informações das Tabelas de Recursos e Usos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e de dados das Contas Regionais. Ademais, especificou-se um conjunto de 10 famílias representativas para adequar as simulações de adoção de tecnologias de energia solar entre as famílias de diferentes faixas de rendimentos, com base em dados da Pesquisa de Orçamentos Familiares (IBGE, 2010).

Ressalta-se que o Imagem-MG opera com equações de equilíbrio de mercado para todos os bens consumidos localmente (domésticos e importados) e de equilíbrio no mercado de fatores (capital e trabalho) em cada região. Assume-se a hipótese de concorrência perfeita para os setores no modelo. A razoabilidade dessa hipótese, no presente trabalho, não é problemática uma vez que as simulações geram um ganho líquido de renda pelas famílias diante do maior uso de energia solar, via viabilidade econômica e financeira, exógena ao modelo.

Os preços de compra para cada um dos grupos de uso (produtores, investidores, famílias, exportadores e governo) são compostos pela soma dos valores básicos, acrescidos de impostos (diretos e indiretos) sobre vendas, e das margens. Os impostos sobre vendas são tratados como taxas *ad-valorem* sobre os fluxos básicos. As demandas por margens (transporte e de comércio) são proporcionais aos fluxos de bens aos quais as margens estão conectadas.

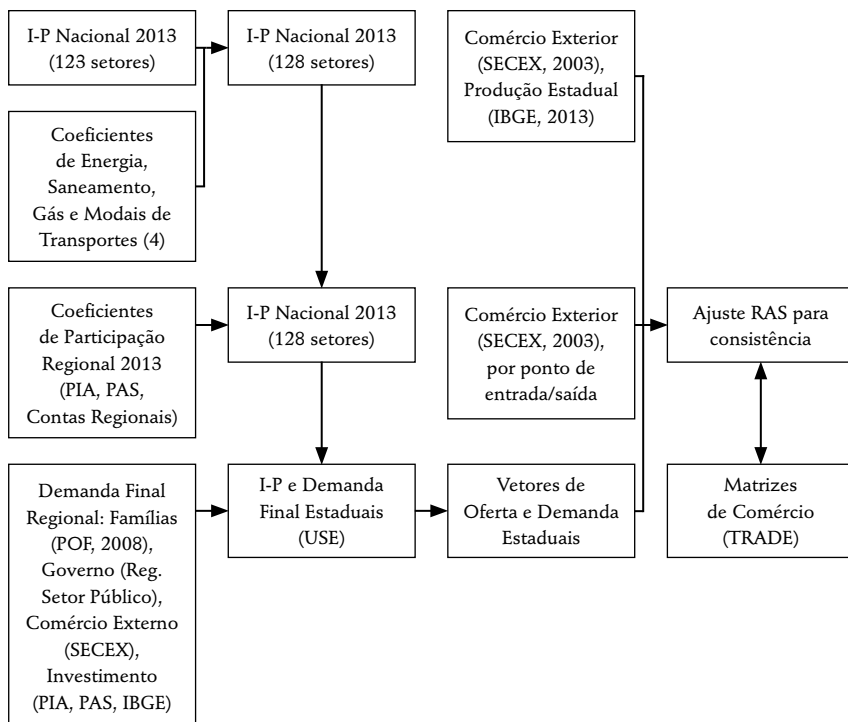
2.2 Base de dados e parâmetros

O banco de dados central do modelo³ é composto por dois conjuntos de matrizes representativas: uso dos produtos em cada estado e fluxos de comércio. O primeiro conjunto, relativo ao uso dos produtos, em valores de entrega (inclui valores de margem de comércio e transporte), é representado pela matriz USE. Essa matriz apresenta as relações de uso de cada produto, c , de origem doméstica ou importada, para 40 usuários nas duas regiões (Minas Gerais e o restante do Brasil), e 4 demandantes finais (famílias, investimento, exportações e governo). O segundo conjunto, relativo aos fluxos de comércio, é representado por TRADE e mostra o valor do co-

³ Os aspectos metodológicos para construção da base de dados foram embasados em Horridge (2006).

mércio inter-regional para os 36 bens de origem doméstica ou importada. As informações primárias utilizadas na construção desse banco de dados do modelo estão esquematicamente representadas na Figura 1.

Figura 1 **Construção da base de dados do modelo**



Fonte: *Elaboração própria.*

A geração do banco de dados do modelo e o teste de consistência foram implementados no GEMPACK, seguindo os procedimentos propostos por Horridge, Madden e Wittwer (2005). O vetor nacional do consumo das famílias foi regionalizado a partir dos dados da Pesquisa de Orçamento Familiar (POF) de 2008-2009 (IBGE, 2010) e da renda *per capita*, medida em salários-mínimos e obtida da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) de 2013 (Brasil, 2013). Para tanto, o primeiro passo consistiu na classificação das despesas da POF de acordo com a matriz do IBGE e, em seguida, calcularam-se grupos de despesas a partir dos seus componentes através de uma agregação das despesas presentes na POF. Para garantir que

a amostra obtida nesse procedimento fosse representativa da população brasileira, utilizou-se o fator de expansão, ou seja, os valores foram expandidos pelo peso amostral. No modelo, há um conjunto de 10 famílias representativas em cada região, agrupadas por classe de renda.

Ademais, foram introduzidas atualizações na base de dados relativas a três parâmetros: a elasticidade-renda (EPS) obtida por Hoffmann (2010), a Elasticidade de Substituição do Comércio Regional (SIGMADOMDOM) estimada por Faria e Haddad (2011) e a Elasticidade de Substituição das Importações (ARMSIGMA), calculada por Kume e Piani (2011), compatíveis com as estimativas mais recentes disponíveis na literatura brasileira.⁴

3 Simulações

Os procedimentos utilizados nas simulações de adoção de energia solar residencial são apresentados nesta seção. O mecanismo de dinâmica recursiva do modelo toma explicitamente o horizonte temporal nas simulações, em que o ajuste das variáveis endógenas, após o choque inicial e ao longo do período de análise, ocorre tanto no cenário-base quanto nos cenários de política, aqui representados pela adoção de painéis fotovoltaicos ou aquecedores solares por grupos de famílias de Minas Gerais. O cenário-base é construído a partir de um conjunto de simulações anuais encadeadas, que reproduzem uma trajetória preestabelecida para a economia brasileira. Neste artigo foram adotadas estimativas e dados nacionais observados, em termos de variação percentual, para o PIB real, exportações, consumo das famílias, investimento e consumo do governo (Tabela 1).

Como a base de dados do Imagem-MG é de 2013, foram coletados valores dos principais indicadores macroeconômicos apresentados para os anos de 2014 e 2015, a partir dos dados do IBGE (2016), e das projeções de crescimento econômico para os anos subsequentes, de 2016 a 2036, baseadas nas projeções do Banco Central do Brasil (BCB, 2016). O período analisado, 20 anos, corresponde a uma expectativa da vida útil dos sistemas fotovoltaicos e de aquecimento de água encontrada na literatura (Nakabayashi, 2015; Torres, 2012; Vianna, 2010).

.....
 4 Não há estimativas regionais dos principais parâmetros do modelo. A hipótese assumida é que as elasticidades para o caso brasileiro não se difeririam significativamente das elasticidades regionais, notadamente para Minas Gerais.

Tabela 1 Principais variáveis do cenário macroeconômico (var % real)

Indicadores	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020-2036
PIB	-0,75	-3,72	-3,87	0,53	1,64	2,06	2,18
Consumo das Famílias	1,3	-4	-3,87	0,53	1,64	2,06	2,18
Investimento	-4,5	-14,1	-3,87	0,53	1,64	2,06	2,18
Consumo do Governo	1,2	-1,05	-3,87	0,53	1,64	2,06	2,18
Exportações	-1,1	-6,09	-3,87	0,53	1,64	2,06	2,18

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do IBGE (2016) e BCB (2016).

No ano de 2017, são aplicadas as políticas de adoção de painéis fotovoltaicos ou aquecedores solares, compondo duas simulações distintas, conforme detalhado nas duas seções a seguir. A partir desses choques iniciais, são encadeadas novas simulações, ano a ano. Dessa forma, é possível analisar os resultados a partir de desvios acumulados em relação ao cenário-base até o último ano do período estudado, 2036.

3.1 Dimensionamento dos sistemas

3.1.1 Dimensionamento do painel fotovoltaico

O primeiro passo para a simulação envolvendo a adoção de sistemas fotovoltaicos para geração de eletricidade nas residências consistiu em dimensionar uma planta padrão para todas as residências. Os procedimentos para o cálculo da potência necessária e do custo do sistema Fotovoltaico (FV) adotados seguem a metodologia proposta por Pinho e Galdino (2014). O passo inicial para dimensionar o sistema FV a ser adotado é determinar sua potência nominal em Corrente Contínua (CC), a fim de conhecer a capacidade de autonomia da edificação (utilizando apenas energia solar como fonte de geração de energia elétrica).

Considerando um consumo mensal de aproximadamente 300kWh/mês, um sistema com rendimento de 80%, compatível com os valores encontrados na literatura (Marinoski, Salamoni e Ruther, 2004; Vianna, 2010; Torres, 2012; Nakabayashi, 2015), e o nível de radiação solar diária de 6,0kWh/m²/dia (CEMIG, 2012) para o estado de Minas Gerais, obtém-se a potência necessária para o sistema FV de aproximadamente 2kWp. A tecnologia fo-

tovoltaica mais utilizada é de silício cristalino (PINHO; GALDINO, 2014) e, para essas especificações, definiu-se o preço de R\$10Wp, com base em estudos⁵ para a economia brasileira. Assim, o preço final do sistema seria aproximadamente R\$20.000,00. Para verificar a proximidade do valor encontrado com os preços de mercado efetivamente adotados, foram realizados orçamentos em empresas especializadas em sistemas solares fotovoltaicos,⁶ em que se observaram valores condizentes com os encontrados.

3.1.2 Dimensionamento do aquecedor solar

Para as simulações envolvendo adoção de aquecedores solares pelas famílias mineiras, utilizou-se o preço médio de mercado⁷ de um sistema de aquecimento, R\$3000,00 em valores de 2016. Considerando-se o mesmo perfil de consumo do chuveiro elétrico para todas as famílias, 20 minutos por dia,⁸ e a potência média do chuveiro de 4400W (mais comum em residências), tem-se que o consumo mensal do chuveiro elétrico seria de 44kWh/mês. Com uma tarifa média de R\$0,82, a economia com a instalação do aquecedor solar seria aproximadamente R\$36,00 por mês.

Embora, observar-se que, em termos absolutos, o consumo das famílias de maior renda com chuveiro elétrico é maior do que das famílias de menor renda, optou-se por considerar o mesmo perfil de consumo para todas as famílias. Essa hipótese não é inadequada, dadas as dificuldades

.....
5 Estudos que calculam o valor do Wp fotovoltaico procuram estipular um preço nacionalizado dos sistemas fotovoltaicos considerando os tributos. Ou seja, definidos os preços internacionais dos sistemas FV, a taxa de câmbio e os impostos, obtém-se o preço nacional do Wp FV. Os sistemas fotovoltaicos, por exemplo, estão na faixa de US\$5 - 7/Wp, conforme a tecnologia e o tamanho (CEMIG, 2012). O EPE (2012) considera câmbio de US\$1/R\$1,75 e impostos nacionais de 25%, chegando a um custo de investimento de R\$8,36/Wp para sistemas de até 100kWp. Já para um sistema com potência maior ou igual a 1,0MW, o custo estaria na faixa de 4 - 6 R\$/Wp instalado. Já segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (2012), o custo do sistema solar fotovoltaico é da ordem de 5,73 R\$/Wp instalado. Atualizando esses valores para uma taxa de câmbio de US\$1/R\$3,25, obtém-se o valor aproximado de 10 R\$/Wp.

6 Neosolar Energia (<http://www.neosolar.com.br/>) e Portal Solar (<http://www.portalsolar.com.br/painel-solar-fotovoltaico.html>).

7 Solar e Sol (<http://www.solaresol.com.br/loja/>) e Soletrol (<http://www.soletrol.com.br/>).

8 Os valores encontrados na literatura para o tempo médio de banho variam significativamente. Souza (2000) estima que a duração do banho seja de 6 minutos, ao passo que Carneiro e Chaves (2008) consideram 12 minutos de duração. No presente trabalho, optou-se por um perfil conservador, que representa o consumo mínimo do chuveiro, de banhos de duração de 5 minutos, sendo 4 banhos por dia por residência.

em se distinguir e imputar diferentes perfis de consumo e pelo fato de que, nas famílias de maior renda, o percentual do consumo de eletricidade que se deve à utilização do chuveiro elétrico, em relação ao consumo total, é relativamente menor. Ao se considerar o mesmo valor de consumo para todas as classes de rendimentos, permite-se que o percentual do consumo de eletricidade varie para cada grupo de renda.

3.2 Análise de viabilidade econômica por classe de rendimentos

O primeiro passo consistiu em determinar o número de Unidades de Consumo (UC), utilizando o fator de expansão do domicílio, e agrupá-las em 10 classes de rendimento. Em seguida, a partir dos dados da POE, obteve-se o consumo anual, por faixa de renda, relativo ao setor de eletricidade, gás e outras utilidades presentes nas Contas Nacionais, para o ano de 2013. Dividindo o valor gasto com eletricidade em cada classe de rendimentos pelo valor total gasto com eletricidade, encontrou-se o peso relativo de cada classe no consumo total de eletricidade.

O valor do consumo de eletricidade por faixa de renda foi dividido pelo número de famílias para encontrar o consumo de eletricidade, por família, em cada faixa de renda. Dividindo esse resultado pela tarifa de eletricidade vigente em 2013 (R\$0,55 por kWh), encontrou-se o consumo (kWh), por família, em cada classe de rendimento. É necessário ressaltar que esses cálculos se aplicam a partir da segunda classe de renda, tendo em vista que a primeira classe (famílias com renda mensal de até meio salário-mínimo *per capita*) tem direito à Tarifa Social⁹. Portanto, optou-se por não considerar essa classe de rendimentos, pois não seria economicamente viável para esse grupo adotar energia solar nas condições de mercado.

O fluxo de caixa (Tabela 2) corresponde ao valor da redução na conta de luz proveniente da adoção de energia solar, para cada grupo de renda, subtraído do valor do financiamento. Assim, após determinar o consumo de eletricidade em 2016, o passo seguinte consistiu na realização da análise de viabilidade por meio do cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), por faixa de renda, que, segundo Rebelatto (2004), corresponde ao valor das

.....
 9 Concede descontos na tarifa de energia a famílias com renda mensal de até 0,5 salário-mínimo *per capita*. É regulamentada pela Lei nº 12.212 de 2010 (Brasil, 2010) e pelo Decreto nº 7.583 de 2011 (Brasil, 2011).

entradas de caixa (retornos de capital esperados), incluindo, se houver, o valor residual, menos o valor das saídas de caixa, permitindo considerar o valor do dinheiro ao longo do tempo.

Para as simulações, considerou-se: a) que o aumento do preço da tarifa segue uma taxa de inflação projetada de 4,5% a.a.; b) a tarifa de R\$0,82, relativa a 2016. Desconsiderou-se o aumento de preços decorrente das bandeiras amarela e vermelha. Utilizou-se uma taxa de retorno de 6% a.a. Estipulou-se prazo de 20 anos para o financiamento dos painéis e dos aquecedores e uma taxa de juros de 1,5% a.m., que é um valor compatível com as linhas de crédito para sistemas fotovoltaicos disponíveis no mercado.¹⁰

Tabela 2 Fluxo de caixa por grupo de renda (R\$)

	Famílias (salários-mínimos per capita)	Período			
		2017-2021	2022-2026	2027-2031	2032-2036
Aquecedor Solar	A partir de 0,5	180,18	789,53	1548,89	2495,15
	Entre 5 e 10	-2791,01	1046,7	5859,82	11861,59
Painel Fotovoltaico	A partir de 10	-2317,93	1670,63	6641,1	12853,22

Fonte: Elaboração própria.

Além disso, considerou-se que a redução no consumo de eletricidade adquirida da distribuidora representa uma queda da demanda para o setor de distribuição. Em outras palavras, a redução na conta de luz das famílias é tida como redução de receita para o setor de energia. Portanto, aplicou-se um choque negativo no setor de energia de magnitude equivalente à soma da redução na conta de luz de todas as famílias que passam a utilizar energia solar.

4 Resultados

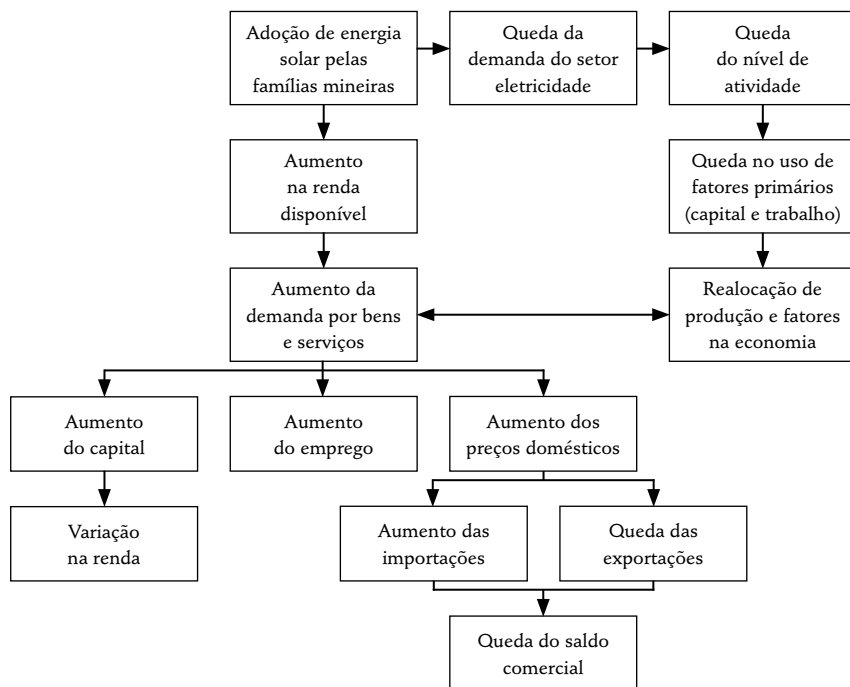
4.1 Resultados da adoção de painéis fotovoltaicos nas residências mineiras

Nesta seção são analisados os impactos da adoção de energia solar para

10 Alguns bancos apresentam linhas de crédito específicas para a compra de sistemas fotovoltaicos. Este é o caso da Caixa Econômica Federal, com juros que variam de 1,96% a 2,35% a.m., e o Banco do Brasil, cujos juros estão entre 1,53% a 2,02% a.m.

a geração de eletricidade pelas famílias de Minas Gerais.¹¹ Os resultados aqui apresentados devem ser interpretados como desvios em relação ao cenário-base, no qual não ocorre a adoção de energia fotovoltaica. As relações de causalidade que explicam esses resultados encontram-se esquematizadas na Figura 2. A Tabela 3 sumariza os principais efeitos agregados da adoção de painéis fotovoltaicos sobre a economia mineira. Cabe ressaltar que apenas as famílias dos grupos de renda a partir de 5 salários-mínimos *per capita* adotam essa fonte de energia, dada sua viabilidade financeira, calculada conforme apresentado nas simulações.

Figura 2 Fluxograma de relações de causalidade do modelo Imagem-MG



Fonte: Elaboração própria.

11 Na análise dos impactos sobre as famílias de uma ampliação do consumo de energia solar, os parâmetros de elasticidade de substituição têm papel relevante, sendo necessário, portanto, realizar a análise de sensibilidade desses parâmetros. Para tanto, utilizou-se a metodologia de quadratura gaussiana proposta por DeVuyst e Preckel (1997). Foi estabelecido um intervalo de intervalo de 50% para os parâmetros, com distribuição uniforme. De maneira geral, os resultados macroeconômicos e setoriais são robustos para o conjunto das estimativas das elasticidades de substituição das famílias, não havendo mudanças de sinal. Resultados específicos são disponibilizados pelos autores mediante solicitação.

Tabela 3 Impactos em Minas Gerais da adoção de painéis fotovoltaicos nas residências (var % em 2036 – desvio acumulado em relação ao cenário base)

Indicadores em Minas Gerais	Desvio % acumulado (2017-2036)
PIB real	0,23
Consumo das Famílias	1,12
Investimento	0,64
Exportações	-0,11
Importações	0,88
Emprego	0,24
Rentabilidade do Capital	0,12

Fonte: *Elaboração própria, baseada nos resultados do modelo Imagem-MG.*

Segundo os mecanismos do modelo, quando as famílias realizam o investimento em painéis fotovoltaicos, verifica-se redução dos gastos com eletricidade superior ao custo do financiamento. Assim, ocorre uma geração de renda líquida para essas famílias. Conforme observado na Tabela 3, ocorre pequeno aumento do PIB no estado de Minas Gerais, cujo valor acumulado em relação ao cenário-base será de 0,23% em 2036. O aumento do PIB está associado ao efeito sobre o consumo das famílias e o investimento. O consumo das famílias que adotam os painéis solares aumenta devido à renda extra recebida. A variação agregada do consumo das famílias é de 1,12%, conforme as projeções.

Para atender o aumento da demanda, ocorrerá aumento do investimento de 0,64% acumulado até 2036. O aumento do investimento tem como consequência o crescimento da produção. Esse resultado está relacionado à rentabilidade dos fatores primários, como o capital, que crescerá 0,12% acumulado até 2036 em relação ao cenário-base. Portanto, o aumento da rentabilidade do capital está relacionado ao crescimento da demanda por esse fator em decorrência do aumento da produção e da atividade econômica. Os efeitos da maior produção também implicam maior demanda por trabalho, que aumentará 0,24% acumulado até 2036.

Como o modelo considera a hipótese de país pequeno, em que as exportações variam inversamente com os preços domésticos, o aumento do consumo eleva a demanda e os preços domésticos, fazendo com que os bens domésticos fiquem relativamente mais caros. Mas esse efeito é muito pequeno e as exportações ficam praticamente estáveis. Com o aumento dos preços domésticos, os bens importados tornam-se relativamente mais

baratos e, dessa forma, há aumento das importações (0,87% em relação ao cenário-base).

Apesar de observar-se aumento no consumo das famílias no agregado, é necessário compreender o que de fato ocorre em cada faixa de renda.¹² A Tabela 4 representa os impactos da adoção de painéis fotovoltaicos sobre o consumo de cada família representativa.

Tabela 4 **Impactos da adoção de painéis fotovoltaicos sobre o consumo das famílias em Minas Gerais (var % – desvio acumulado em relação ao cenário-base)**

Famílias	Salários-Mínimos Per Capita	Consumo
Grupo 01 - Grupo 05	até 5	0,00
Grupo 06	Entre 5 e 10	4,58
Grupo 07	Entre 10 e 20	3,86
Grupo 08	Entre 20 e 40	2,68
Grupo 09	Entre 40 e 80	2,37
Grupo 10	Acima de 80	1,61

Fonte: Elaboração própria baseada nos resultados do modelo Imagem-MG.

As famílias com renda entre 5 e 10 salários-mínimos *per capita* (Grupo 06) são as mais beneficiadas pela adoção da energia fotovoltaica, em termos de ganhos de consumo. Isso ocorre porque o consumo de energia das famílias dessa classe de renda é integralmente fornecido pelo sistema FV, sem mais gastos com eletricidade proveniente da concessionária. Além disso, a economia de energia corresponde a um percentual maior da renda dessas famílias, portanto, o efeito positivo da adoção do sistema FV para essa classe é mais proeminente.

Observa-se, ainda, que o crescimento do consumo e do PIB gera o aumento da arrecadação de impostos verificado no período analisado. De 2017 a 2036, o governo estadual teria aumento acumulado de arrecadação de aproximadamente 1,3 bilhão de reais – variação do imposto sobre comercialização de bens, que representa o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) estadual. Observando mais detalhadamente, percebe-se nos anos iniciais redução da arrecadação, que segue o efeito ne-

12 Destaca-se que as simulações foram feitas com parâmetro de FRISCH constante para todas as famílias (-2,48). Como esse parâmetro mede a razão entre gastos de subsistência e gastos de não subsistência (luxo) por produto para as famílias, seria esperado que essa razão fosse maior para as famílias pobres do que para as famílias ricas, mas como não há estimativas desagregadas por famílias na literatura, decidiu-se utilizar o mesmo parâmetro para todas as famílias.

gativo sobre a atividade econômica, pois as famílias têm, nessa fase, gastos maiores com o financiamento do que redução da conta de energia. Após alguns anos, começa a ocorrer o ganho líquido de renda e o consequente aumento da atividade econômica, que gera arrecadação tributária para o governo. A arrecadação de impostos sobre as vendas começa a crescer no ano de 2030, no qual observa-se também que a variação percentual do PIB real passa a ser positiva.

O principal efeito da adoção de energia fotovoltaica para as famílias está relacionado ao aumento do consumo propiciado pela renda extra gerada, que, por sua vez, afeta setores produtivos. A Tabela 5 retrata os impactos setoriais da simulação.

Tabela 5 Impactos setoriais em Minas Gerais da adoção de painéis solares pelas famílias (desvio % acumulado em relação ao cenário-base 2017-2036)

Nº	Setor	Nível de Atividade
1	Agricultura	-0,03
2	Pecuária, produção florestal, pesca e aquicultura	-0,02
3	Indústrias extrativas	-0,13
4	Fabricação de produtos alimentícios	0,07
5	Bebida e fumo	0,10
6	Fabricação de produtos têxteis	0,52
7	Couros, artigos para viagem e calçados	0,49
8	Fabricação de produtos de madeira	0,16
9	Fabricação de celulose	0,03
10	Fabricação de coque, petróleo e de biocombustíveis	-0,02
11	Fabricação de produtos químicos e farmacêuticos	-0,07
12	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,11
13	Fabricação de produtos de minerais não metálicos	0,07
14	Metalurgia	-0,06
15	Fabricação de máquinas e equipamentos	0,14
16	Fabricação de veículos automotores	0,22
17	Fabricação de móveis	0,43
18	Manutenção de máquinas e equipamentos	-0,03
19	Eletricidade, gás e outras utilidades	-0,22
20	Captação, tratamento e distribuição de água	0,06
21	Construção de edifícios	0,35

(continua)

Tabela 5 (continuação)

Nº	Setor	Nível de Atividade
22	Comércio e reparação de veículos automotores	0,54
23	Comércio atacado e varejista	0,19
24	Transportes	0,14
25	Correio e outras atividades de entrega	0,29
26	Alojamento	0,68
27	Alimentação	0,46
28	Informação e comunicação	0,63
29	Atividades financeiras e seguros	0,95
30	Atividades imobiliárias	-0,01
31	Atividades profissionais, científicas e técnicas	0,14
32	Atividades administrativas	0,32
33	Administração pública	-0,04
34	Educação	-0,06
35	Saúde	-0,06
36	Artes, cultura, esporte e recreação	1,20

Fonte: *Elaboração própria, baseada nos resultados do modelo Imagem-MG.*

Conforme observado na Tabela 5, os setores que mais crescem nas projeções são os de Artes, cultura, esporte e recreação, Atividades financeiras e seguros e Alojamento. Isso significa que uma parcela da renda extra das famílias que adotam os painéis fotovoltaicos seria consumida com esses bens e serviços. Os impactos negativos estão presentes em setores pouco relacionados ao consumo das famílias e exportadores, como a indústria extrativa. Setores associados ao consumo do governo (saúde, educação e administração pública) são afetados pelo deslocamento de fatores produtivos para os demais setores, pois como no modelo não há conexão de consumo do governo com arrecadação de impostos, não é possível supor que o aumento da arrecadação aumente a oferta desses bens.

Análise o padrão de consumo de cada grupo de renda possibilita concluir que os setores que apresentam maior variação no consumo das famílias que adotam energia fotovoltaica (renda mensal a partir de 5 salários-mínimos *per capita*) correspondem às maiores participações no gasto dentro do orçamento das famílias em cada classe. Juntos, os três primeiros setores (Artes, cultura, esporte e recreação, Atividades financeiras e seguros e Alojamento) correspondem a 24,37% do orçamento do Grupo 06

(renda entre 5 e 10 salários-mínimos *per capita*) e 43,45% do orçamento do Grupo 10 (acima de 80 salários-mínimos *per capita*). Ou seja, o aumento do nível de atividade do setor está relacionado à sua participação na cesta de consumo das famílias.

4.2 Resultados da adoção de aquecedores solares nas residências mineiras

A Tabela 6 sumariza os principais efeitos agregados da adoção de painéis solares pelas famílias mineiras. Destaca-se, ainda, que as famílias dos Grupos 2 a 10 (acima de 0,5 salário-mínimo *per capita*) adotariam essa fonte de energia, conforme discutido na especificação das simulações. Os valores são consideravelmente superiores aos da simulação de painéis fotovoltaicos.

Tabela 6 Impactos em Minas Gerais da adoção de aquecedores solares nas residências (var % em 2036 – desvio acumulado em relação ao cenário-base)

Indicadores em Minas Gerais	Desvio % acumulado (2017-2036)
PIB Real	1,11
Consumo das Famílias	4,43
Investimento	1,86
Exportações	-0,24
Importações	2,75
Emprego	0,98
Rentabilidade do Capital	0,80

Fonte: Elaboração própria, baseada nos resultados do modelo Imagem-MG.

Os resultados indicam aumento acumulado no PIB em relação ao cenário base de 1,11% em 2036. Em outras palavras, o crescimento do PIB em Minas Gerais passaria de 2,15% ao ano, em 2017, para cerca de 2,17%, em média, até 2036. Como o aumento do PIB está associado ao comportamento do consumo das famílias e do investimento, tem-se que o consumo das famílias que adotam a energia solar aumentaria em 4,43% e estimularia o aumento dos investimentos em 1,86% acumulado até 2036.

Assim, ocorre aumento do nível de produção que, por sua vez, aumenta a rentabilidade dos fatores primários. Como observado na Tabela 6, a rentabilidade acumulada do capital cresceria 0,80% em relação ao cenário-

-base. Além disso, o aumento da atividade econômica também acarretaria aumento acumulado no nível de emprego em 0,98% até 2036. A aquisição de aquecedores solares tem pouco impacto sobre as exportações no agregado (0,24%), mas no acumulado até 2036 aumentaria as importações em 2,75% devido ao aumento relativo dos preços domésticos.

Ao considerar o mesmo padrão de consumo de aquecimento de água para banho para todas as famílias, todas as classes de rendimento apresentam o mesmo ganho líquido de renda com a adoção dos aquecedores solares. A diferença está no fato de que esse ganho, em proporção à renda da família, é relativamente maior nas primeiras faixas de renda. A Tabela 7 representa os impactos da adoção de aquecedores solares sobre o consumo de cada tipo de família representativa.

Tabela 7 Impactos da adoção de aquecedores solares sobre o consumo das famílias em Minas Gerais (var % – desvio acumulado em relação ao cenário base)

Famílias	Salários-Mínimos <i>Per Capita</i>	Consumo
Grupo 01	Menor que 0,5	0,00
Grupo 02	Entre 0,5 e 1	9,15
Grupo 03	Entre 1 e 2	6,89
Grupo 04	Entre 2 e 3	4,48
Grupo 05	Entre 3 e 5	2,94
Grupo 06	Entre 5 e 10	1,81
Grupo 07	Entre 10 e 20	1,21
Grupo 08	Entre 20 e 40	0,82
Grupo 09	Entre 40 e 80	0,71
Grupo 10	Acima de 80	0,51

Fonte: Elaboração própria, baseada nos resultados do modelo Imagem-MG.

Como o primeiro grupo, das famílias que recebem até meio salário-mínimo *per capita*, não adota aquecimento solar de água para banho, esse grupo sofreria apenas o ônus do aumento de preços, sem variação real no consumo. Por outro lado, os resultados sugerem que o Grupo 02, de famílias que recebem entre 0,5 e 1 salário-mínimo *per capita*, apresentaria o maior ganho de consumo, pois possui o maior ganho relativo de renda. Nota-se, ainda, que no cenário de adoção de aquecedores solares nas residências o governo estadual teria aumento acumulado na arrecadação de impostos sobre a comercialização de bens de aproximadamente 5,1 bilhões de reais de 2017 a 2036.

A renda extra gerada pela aquisição de aquecedores solares se distribui de forma diferente entre as classes de rendimentos. Enquanto a adoção de painéis fotovoltaicos é concentrada nas famílias de maior renda, a adoção de aquecedores solares traz ganhos relativamente maiores às famílias de menor renda. Dessa forma, a variação do nível de atividade setorial apresenta comportamento distinto nos dois cenários. A Tabela 8 retrata esses impactos setoriais.

Tabela 8 Impactos setoriais em Minas Gerais da adoção de aquecedores solares pelas famílias (desvio % acumulado em relação ao cenário-base 2017-2036)

Nº	Setor	Nível de Atividade
1	Agricultura	0,82
2	Pecuária, produção florestal, pesca e aquicultura	1,11
3	Indústrias extrativas	-0,17
4	Fabricação de produtos alimentícios	1,73
5	Bebida e fumo	2,06
6	Fabricação de produtos têxteis	3,01
7	Couros, artigos para viagem e calçados	3,60
8	Fabricação de produtos de madeira	1,22
9	Fabricação de celulose	0,72
10	Fabricação de coque, petróleo e de biocombustíveis	0,25
11	Fabricação de produtos químicos e farmacêuticos	0,65
12	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,90
13	Fabricação de produtos de minerais não metálicos	0,42
14	Metalurgia	0,15
15	Fabricação de máquinas e equipamentos	1,32
16	Fabricação de veículos automotores	0,79
17	Fabricação de móveis	2,20
18	Manutenção de máquinas e equipamentos	0,33
19	Eletricidade, gás e outras utilidades	-1,20
20	Captação, tratamento e distribuição de água	1,87
21	Construção de edifícios	1,18
22	Comércio e reparação de veículos automotores	1,51
23	Comércio atacado e varejista	1,54
24	Transportes	1,32
25	Correio e outras atividades de entrega	1,14

(continua)

Tabela 8 (continuação)

Nº	Setor	Nível de Atividade
26	Alojamento	0,80
27	Alimentação	3,09
28	Informação e comunicação	2,01
29	Atividades financeiras e seguros	1,58
30	Atividades imobiliárias	0,26
31	Atividades profissionais, científicas e técnicas	0,80
32	Atividades administrativas	0,74
33	Administração pública	-0,06
34	Educação	-0,08
35	Saúde	-0,10
36	Artes, cultura, esporte e recreação	3,28

Fonte: Elaboração própria, baseada nos resultados do modelo Imagem-MG.

Os setores que mais crescem são relativos à fabricação de Couros, Artes, cultura, esporte e recreação, Alimentação e Fabricação de produtos têxteis. Nota-se que os setores de Couro e de Têxteis apresentam variação relativa no nível de atividade superior à observada na adoção de painéis fotovoltaicos. Esse resultado pode ser explicado pelo padrão de consumo de cada grupo de renda. Ou seja, famílias das classes de renda menores são as principais responsáveis pelo aumento do nível de atividade desses setores. De fato, a participação relativa desses setores no consumo total das famílias é maior para as famílias com renda de até cinco salários-mínimos *per capita*.

Inversamente, as projeções indicam que o setor de Atividades financeiras e seguros teria aumento no seu nível de atividade relativamente maior na simulação com painéis fotovoltaicos, dado que nas famílias com renda superior a cinco salários-mínimos *per capita* esses serviços representam maior parcela da cesta de consumo. Por fim, ressalta-se que nas duas simulações realizadas, o setor de Artes, cultura, esporte e recreação aparece entre aqueles com maior crescimento. Mas são as famílias com renda superior a cinco salários-mínimos *per capita* que apresentam maior gasto com esses bens e serviços. Assim, pode-se inferir que, apesar de esse setor apresentar elevação relativamente alta do nível de atividade nos dois cenários, são as famílias de maior renda as principais responsáveis pelo aumento da demanda do setor, conforme as cestas de consumo de cada família representativa.

O Brasil, e em especial Minas Gerais, apresentam elevado potencial para utilização de energia solar, inclusive no setor residencial. A vantagem dessa utilização no setor residencial, para autoconsumo, deve-se ao fato de que não há gastos com transmissão de energia. E, por ser ligada à rede, também não apresenta gastos com armazenamento de energia, que correspondem à parcela expressiva dos custos de geração de energia elétrica. Assim, foi possível observar elevação na renda e no consumo dos grupos de famílias que adotam a energia solar, divergindo dos resultados destacados na literatura.

De acordo com a literatura, os efeitos de mecanismos de incentivo à produção de energia renovável podem implicar elevadas perdas de bem-estar devido ao alto custo dessas políticas (Morris; Reilly; Paltsev, 2010; Böhringer; Löschel, 2006). Dessa forma, a geração de energia por fontes renováveis torna-se onerosa e com baixa atratividade, e sua utilização se justificaria apenas pela necessidade de suprir o aumento da demanda energética e de combater a degradação ambiental associada às fontes poluentes. Por outro lado, se for possível considerar o cenário de aumento da produção de energia renovável sem incentivos governamentais, ou seja, sem política fiscal, que é responsável pelo elevado custo de bem-estar, os resultados podem modificar significativamente. Nesse sentido, o presente estudo se diferencia ao desconsiderar quaisquer subsídios para a produção de energia renovável, eliminando os efeitos negativos de bem-estar associados a eles.

Ademais, conforme Boeters e Koornneef (2011), apesar de os subsídios para a produção de energia renovável terem elevados custos sociais, isso pode mudar em decorrência da disponibilidade de energia renovável de baixo custo. Dessa forma, o presente artigo procurou capturar os efeitos da adoção de painéis fotovoltaicos e aquecimento solar a partir da decisão por parte das famílias, baseada na viabilidade financeira da adoção destas tecnologias.

5 Conclusão

Apesar do enorme potencial para a utilização de energia solar em Minas Gerais, tanto devido aos níveis de irradiação solar, quanto ao elevado preço das tarifas de energia elétrica no estado, a adoção de tecnologias fo-

tovoltaicas ainda é incipiente. O presente artigo buscou avaliar, além do retorno esperado ao investimento em energia solar, através de painéis fotovoltaicos ou coletores solares, os impactos da adoção dessas tecnologias por parte das famílias.

Como as famílias, em geral, apresentam elevadas taxas de desconto intertemporal, a possibilidade de retorno futuro do investimento pode não ser incentivo suficiente para sua realização. Assim, há que se discutir, também, ações governamentais de incentivo, como subsídios e isenções de impostos, mesmo que estas repercutam sobre o bem-estar agregado, conforme apontado por parte da literatura.

Porém, a condução de uma política que estimule a adoção de energia solar residencial pode ter efeitos distributivos adversos. No caso dos painéis fotovoltaicos, dados os preços de mercado, sua adoção é economicamente viável apenas para famílias de elevado consumo de eletricidade, aquelas das faixas mais elevadas de renda. Assim, uma política que incentive a adoção de painéis fotovoltaicos teria como principais beneficiárias as famílias de maior renda.

Ao mesmo tempo, quando se verifica a possibilidade de política para estímulo do uso de aquecedores solares, os resultados são diferentes. Isso ocorre, em primeiro lugar, porque o aquecedor é acessível a mais faixas de renda e, em segundo, devido ao percentual de energia elétrica utilizado para aquecimento de água ser superior nas primeiras faixas de rendimentos. Ou seja, o ganho relativo de renda decorrente da adoção de aquecedores solares é maior nas famílias de baixa renda. Nesse sentido, mecanismos de incentivo à adoção de aquecedores solares têm efeitos distributivos positivos.

Os resultados mostram que a adoção de painéis fotovoltaicos gera impactos setoriais distintos da adoção de aquecedores solares devido ao padrão de consumo de cada grupo de renda, e isso também pode ter repercussões sobre a distribuição de renda, dadas as especificidades de cada setor. No caso dos painéis fotovoltaicos, como somente os grupos de renda mais elevada adotariam o sistema, ocorreria aumento relativamente maior no consumo de serviços financeiros, cuja participação no orçamento é relativamente maior nas famílias com renda superior a cinco salários-mínimos *per capita*. Inversamente, a variação no consumo dos setores de Couro e Têxteis foi superior no cenário de adoção de aquecedores solares, setores estes mais intensivos em trabalho e que empregam mão de obra relativamente menos qualificada.

Assim, grosso modo, as projeções sugerem que os setores que apresentariam maior crescimento referem-se àqueles intensivos em trabalho, que além de engendrarem maior crescimento de empregos, estão associados a baixos níveis de poluição e são pouco intensivos em energia. Dessa forma, o aumento do consumo das famílias não estaria associado a maiores emissões, que reduziriam o ganho ambiental decorrente do uso de energia solar pelas famílias.

Apesar de o nível de agregação dos setores do modelo e de a disponibilidade de dados e informações mais desagregadas impedirem a análise mais robusta dos resultados setoriais, acredita-se que os resultados encontrados no presente estudo são uma aproximação crível das possibilidades de expansão da utilização de energia solar no presente, dado que a utilização de energia solar corresponde a uma parcela ainda muito pequena da demanda de energia residencial. Além disso, os serviços atualmente disponíveis no mercado para aquisição de painéis fotovoltaicos utilizam componentes importados, notadamente. Assim, ao projetar impactos da ampliação do uso de energia solar, é razoável supor que os prováveis efeitos positivos a serem encadeados, via cadeia produtiva setorial, não estimados aqui, são reduzidos devido ao pequeno porte da indústria nacional de energia solar.

Referências

- ACAR, S.; YELDAN, A. E. Environmental impacts of coal subsidies in Turkey: A general equilibrium analysis. *Energy Policy*, v. 90, p. 1-15, 2016.
- ALTOÉ, L.; OLIVEIRA FILHO, D.; CARLO, J. C. Análise energética de sistemas solares térmicos para diferentes demandas de água em uma residência unifamiliar. *Ambiente Construído*, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 75-87, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Nota Técnica n° 0056*. 2017.
- ARAÚJO, J. L. A questão do investimento no setor elétrico brasileiro: reforma e crise. *Nova Economia*, v. 11, n. 1, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. *Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira*. São Paulo: ABINEE, 2012.
- BACELAR, T. A “questão regional” e a “questão nordestina”. In: TAVARES, M. C. (Org.). *Celso Furtado e o Brasil*. São Paulo: Fundação Perseu Abramo, 2000. Disponível em: <<http://novo.fpabramo.org.br>>. Acesso em: fev. 2019.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL (BCB). *Focus – Relatório de mercado*. Brasília – DF. Disponível

- em: <<http://www.bcb.gov.br/pec/GCI/PORT/readout/readout.asp>>. Acesso em: maio 2016.
- BÖHRINGER, C.; LÖSCHEL, A. Computable general equilibrium models for sustainability impact assessment: Status quo and prospects. *Ecological economics*, v. 60, n. 1, p. 49-64, 2006.
- BÖHRINGER, C. *et al.* Alternative designs for tariffs on embodied carbon: A global cost-effectiveness analysis. *Energy Economics*, v. 34, p. S143-S153, 2012.
- BOETERS, S.; KOORNNEEF, J. Supply of renewable energy sources and the cost of EU climate policy. *Energy Economics*, v. 33, n. 5, p. 1024-1034, 2011.
- BRASIL. Decreto nº 7.583, de 13 de outubro de 2011. Brasília, 2011.
- BRASIL. ANEEL. Resolução Normativa Aneel nº 547, de 16 de abril de 2013. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Brasília, 2013.
- BRASIL. CONGRESSO NACIONAL. Lei nº 12.212, de 20 de janeiro de 2010. Brasília, 2010.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Programa de Disseminação das Estatísticas do Trabalho. Relação Anual de Informações Sociais (RAIS). Brasília, DF, 2013.
- CANSINO, J. M. *et al.* The economic influence of fotovoltaic technology on electricity generation: A CGE (computable general equilibrium) approach for the Andalusian case. *Energy*, v. 73, p. 70-79, 2014.
- CANSINO, J. M. *et al.* Economic impacts of biofuels deployment in Andalusia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 27, p. 274-282, 2013.
- CARNEIRO, G. L.; CHAVES, J. F. C. Estudo piloto para estabelecimento da vazão de conforto para consumo residencial de água na cidade de Ponta Grossa. In: IV ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS CAMPOS GERAIS, 2008, Ponta Grossa, Paraná. *Anais...*
- CARVALHO, T. S.; DOMINGUES, E. P. Projeção de um cenário econômico e de desmatamento para a Amazônia Legal brasileira entre 2006 e 2030. *Nova Economia*, v. 26, n. 2, 2016.
- Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). *Atlas Solarimétrico de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2012.
- DAI, H. *et al.* Green growth: The economic impacts of large-scale renewable energy development in China. *Applied Energy*, v. 162, p. 435-449, 2016.
- DEVUYST, E. A.; PRECKEL, P. V. Sensitivity analysis revisited: a quadrature based approach. *Journal of Policy Modeling*, New York, v. 19, n. 2, p. 175-185, Apr. 1997.
- DOMINGUES, E. P. *et al.* Redução das desigualdades regionais no Brasil: os impactos de investimentos em transporte rodoviário. In: XXXV ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA, 2007, Recife. *Anais...*
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). *Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira*. Rio de Janeiro, 2012. (Nota Técnica da EPE)
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanço Energético Nacional*. Rio de Janeiro, 2017.
- FARIA, W. R. *Efeitos regionais de investimentos em infraestrutura de transporte rodoviário*. 2009.

- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- FARIA, W. R.; HADDAD E. A. *Estimação das elasticidades de substituição do comércio regional do Brasil*. São Paulo: NEREUS: Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo 2011.
- FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (FJP). *Tabela de recursos e uso e matriz de insumo-produto de Minas Gerais – 2008*. Belo Horizonte: Centro de Estatísticas e Informações, 2015. 120 p.
- HADDAD, E. A.; PEROBELLI, F. S.; SANTOS, R. A. C. Inserção econômica de Minas Gerais: uma análise estrutural. *Nova Economia*, v. 15, n. 2, 2005.
- HORRIDGE, M. *Preparing a TERM bottom-up regional database*. Preliminary Draft. Centre of Policy Studies, Monash University, Melbourne, 2006.
- HORRIDGE, M.; MADDEN, J.; WITTEWER, G. The impact of the 2002-2003 drought on Australia. *Journal of Policy Modeling*, v. 27, n. 3, p. 285-308, 2005.
- HOFFMANN, R. Estimativas das elasticidades-renda de várias categorias de despesa e de consumo, especialmente alimentos, no Brasil, com base na POF de 2008-2009. *Revista de Economia Agrícola*, v. 57, n. 2, p. 49-62, 2010.
- HOLDERMANN, C.; KISSEL, J.; BEIGEL, J. Distributed photovoltaic generation in Brazil: An economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors. *Energy Policy*, v. 67, p. 612-617, 2014.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Contas Nacionais Trimestrais, 2016*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/pib/defaultcnt.shtml>>. Acesso em: maio 2016.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Pesquisa de Orçamentos Familiares 2008-2009 – Despesas, Rendimentos e Condições de Vida*, 2010. Disponível em: <https://www2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pof/2008_2009/>. Acesso em: maio 2016.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Snapshot of global photovoltaic markets. *Report IEA PVPS T4-33*, 2018.
- KANCS, D. Applied general equilibrium analysis of renewable energy policies. *International Journal of Sustainable Energy*, v. 26, n. 1, p. 31-50, 2007.
- KUME, H.; PIANI, G. *Elasticidades de substituição das importações no Brasil*. –Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2011. (Texto para discussão 1678)
- LEE, D. Toward the clean production of hydrogen: Competition among renewable energy sources and nuclear power. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, n. 20, p. 15726-15735, 2012.
- MAGALHÃES, A. S. *O comércio por vias internas e seu papel sobre crescimento e desigualdade regional no Brasil*. 134 f. 2009. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- MAGALHÃES, A. S. *et al.* Quanto vale a água que usamos? Projeções dos impactos econômicos de restrições ao uso e elevação de preços da água na região metropolitana de Belo Horizonte. *Revista de Economia*, v. 42, n. 2, 2017.
- MAGALHÃES, A. S. *et al.* Custo econômico da energia em Minas Gerais: impactos das eleva-

- ções de tarifas entre 2011 e 2015. *Pesquisa e Planejamento Econômico*, v. 48, p. 103-130, 2018.
- MARINOSKI, D. L.; SALAMONI, I. T.; RÜTHER, R. Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso do edifício sede do CREA-SC. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2004, São Paulo, Brasil.
- MATTOS, L. B.; LIMA, J. E. Demanda residencial de energia elétrica em Minas Gerais: 1970-2002. *Nova Economia*, v.15, p. 31-52, 2005.
- MITSCHER, M.; RÜTHER, R. Economic performance and policies for grid-connected residential solar photovoltaic systems in Brazil. *Energy Policy*, v. 49, p. 688-694, 2012.
- MORRIS, J.; REILLY, J. M.; PALTSEV, S. *Combining a renewable portfolio standard with a cap-and-trade policy: a general equilibrium analysis*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, 2010. (Report n. 187)
- NAKABAYASHI, R. *Microgeração fotovoltaica no Brasil: viabilidade Econômica*. 2015. Dissertação de Mestrado–Instituto de Energia e Ambiente da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- ORDENES, M. *et al.* The impact of building-integrated photovoltaics on the energy demand of multi-family dwellings in Brazil. *Energy and Buildings*, v. 39, n. 6, p. 629-642, 2007.
- PEREIRA, M. A. S.; SANTOS, C. R. B. Protótipo de um sistema de aquecimento de água para população de baixa renda usando energia solar e elétrica, com reaproveitamento de calor. *ForScience*, v. 3, n. 2, p. 56-72, 2016.
- PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014.
- REBELATTO, D. *Projeto de investimento*. Barueri: Manole, 2004.
- RISPOLI, I. A. G. *O aquecedor solar brasileiro: teoria e pratica em prol de uma transferência de tecnologia sustentável*. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- RIVERS, N. Renewable energy and unemployment: A general equilibrium analysis. *Resource and Energy Economics*, v. 35, n. 4, p. 467-485, 2013.
- SALAMONI, I. *et al.* *O Potencial dos sistemas fotovoltaicos integrados à rede edificação e interligados à rede elétrica em centros urbanos do Brasil: dois estudos de caso*. Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- SECRETARIA DE COMÉRCIO EXTERIOR (SECEX). *Base de dados*. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>>. Acesso em: fev. 2019.
- SOUZA, L. G. M. Sistema Alternativo de Aquecimento Solar. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2000, Natal, Rio Grande do Norte. *Anais...*
- TORRES, R. C. *Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais*. 2012. 164 p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- VIANNA, E. O. *Integração de tecnologia fotovoltaica em edifícios públicos: estudo de caso do Fórum de Palmas-TO*. 2010. 143 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

Sobre os autores

Micaele Martins de Carvalho – micaele@cedeplar.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Doutoranda em Economia no Cedeplar-UFMG, bolsista PGPSE-Capes, integrante do Núcleo de Pesquisa em Modelagem Econômica e Ambiental (NEMEA) e do grupo de pesquisa do Cedeplar-UFMG.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3349-5180>.

Aline Souza Magalhães – alinesm@cedeplar.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Professora Adjunta do Departamento de Ciências Econômicas da FACE-UFMG. Pesquisadora do Cedeplar-UFMG, vice-coordenadora do NEMEA, integrante da sub-rede de Economia da Rede Clima.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3349-5372>.

Edson Paulo Domingues – epdomin@cedeplar.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Pesquisador do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), coordenador da sub-rede de Economia da Rede Clima.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7640-6010>.

O presente estudo foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil, Código de Financiamento 88887.123942/2016-00, por meio do Programa de Apoio à Pós-Graduação e à Pesquisa Científica e Tecnológica em Desenvolvimento Socioeconômico (PGPSE), Brasil. Este artigo é uma contribuição da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais, convênio Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP)/Rede CLIMA 01.13.0353-00.

Sobre o artigo

Recebido em 19 de março de 2018. Aprovado em 21 de janeiro de 2019.