

Estimating the Long-term Financial Impact of Solar Microgeneration and Energy Efficiency for a Brazilian Medium-sized Enterprise

J. Martins, M. Morandi, and D. Lacerda

Abstract—The industrial sector is the largest energy consumer in the world. In this sector, companies classified as non-energy intensive have untapped energy efficiency potential, such as small and medium-sized enterprises (SMEs). Previous research aimed at studying this untapped potential present a technological solution and do not address conjunctural risks and uncertainties that may influence the adoption of a technological solution. This study aimed to estimate the Long-term Financial Impact of Solar Microgeneration and Energy Efficiency on a Medium-Sized Brazilian Company. System Dynamics Modeling was used to simulate the impact to the company of investing in new technologies of 6 in different scenarios. Those scenarios considering the insertion of distributed solar power generation and energy efficiency practices, as well as the possible variations of energy supply and demand. The estimated financial results of each scenario are presented considering the assumptions of the computational model. The developed model can be used to visualize alternatives and make decisions in similar situations.

Index Terms—Distributed solar power generation, Power generation economics, Energy storage, Systems modeling.

I. INTRODUÇÃO

A CRISE do petróleo, na década de 1970, desafiou o mundo industrializado e estimulou busca por fontes alternativas de energia e pela redução no consumo [1], preponderantemente em setores de uso intensivo de energia. Nas empresas classificadas como de uso não intensivo, o consumo de energia não representa a maior parcela dos custos de produção [2], implicando na escassez de estudos e de agendas de pesquisas relacionados à Eficiência Energética (EE) nesses ambientes industriais [3]. Porém, pequenas e médias empresas (PME), classificadas como de uso não intensivo de energia, representam mais de 13% da demanda total de energia global [4]. As medidas de EE nessas empresas têm potencial para economizar até 524×10^{15} Toneladas Equivalente de Petróleo (TEP), representando mais energia comparativamente do que a soma do consumo anual de Japão e Coréia do Sul [4].

As possibilidades tecnológicas de conversão de energia, diversificação de fontes de energia e flexibilização de legislação, impulsionadas pelo crescente interesse na utilização de energias renováveis, permitem vislumbrar oportunidades para o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias em um novo contexto energético [5]–[7], em especial a Microgeração Distribuída (MGD) de energia solar fotovoltaica [8]–[10].

Esse contexto deu novo impulso às pesquisas sobre eficiência energética em ambientes industriais [11], incluindo aquelas com vistas a aprimorar métodos de avaliação da implantação de MGD e iniciativas de EE. Entre os métodos amplamente utilizados, *Payback (PB)*, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) representam a maioria das aplicações [2], [12]–[20]. Entretanto, conforme destacado na literatura, as abordagens que utilizam PB, VPL e TIR apresentam limitações importantes, fazendo com que as iniciativas não sejam adotadas mesmo quando esses métodos apresentam resultados atrativos.

A partir disso, outras técnicas relacionadas a métodos de decisão de multicritérios [1], [2], [21]–[25], tais como *Analytic Hierarchy Process* e *Lógica Fuzzy* [26], e abordagens como Monte Carlo [14], [27], Simulação de eventos discretos [25], [27], [28], Otimização [16], [28] e Modelagem de Dinâmica de Sistemas (MDS) [25], [29], [30], passaram a ser utilizadas como artefatos para auxiliar a tomada de decisão. Entretanto, fatores macroeconômicos, alterações no ambiente regulatório e os efeitos das políticas de incentivos geralmente não são considerados em análises de investimentos em MGD e EE [10].

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de dinâmica de sistemas que possa estimar o impacto a longo prazo da utilização de MGD Solar e medidas de EE em PME em diferentes cenários macroeconômicos e ambientes do contexto energético. Esse modelo permite projetar o custo médio de energia elétrica para cada Unidade de Esforço de Produção (UEP) [31] considerando o efeito das diferentes decisões de investimentos disponíveis para a empresa.

Para atingir os objetivos propostos este artigo está estruturado da seguinte forma: nas seções II e III são apresentadas as principais características de energia solar e microgeração distribuída no Brasil e da eficiência energética em ambientes industriais; na seção IV são descritas as etapas para o desenvolvimento do modelo, com ênfase para a modelagem conceitual e para os elementos do modelo computacional. Por fim, nas seções V e VI são apresentados a aplicação do modelo desenvolvido e as análises dos resultados das simulações realizadas.

J. C. Martins is with the Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS, *Campus Bento Gonçalves*, Brasil (email: jonatas.martins@bento.ifrs.edu.br).

M. I. W. M. Morandi, and D.P. Lacerda are with the GMAP, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo/RS, Brasil (email: mmorandi@unisinos.br; dlacerda@unisinos.br).

II. ENERGIA SOLAR E MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O aumento da participação de novas fontes de energia na matriz energética do Brasil tem se consolidado na última década [10], com destaque para o aumento exponencial da geração solar fotovoltaica com grande parte de sua capacidade instalada sendo adicionada através de Geração Distribuída (GD) [32]. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define MGD como central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW que utilize fontes renováveis de energia elétrica [33]. A Resolução Normativa 482 de 2012 da ANEEL ainda estabelece que a energia ativa excedente da MGD pode ser injetada gratuitamente na rede da distribuidora, e posteriormente ser compensada com o consumo de energia elétrica, denominando esse procedimento de Sistema de Compensação de Energia (SCE) [33]. Entretanto, essa prática vem sendo questionada pelas distribuidoras de energia, visto que atualmente a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) é cobrada somente da energia comprada. Outro aspecto relevante no contexto brasileiro foi a aprovação do Convênio ICMS nº 16/2015, no âmbito do Conselho Nacional de Política Fazendária (Confaz), autorizando os Estados signatários a concederem isenção do ICMS incidente sobre a energia elétrica fornecida pela distribuidora à unidade consumidora na quantidade correspondente à soma da energia elétrica injetada na rede de distribuição pela mesma unidade consumidora ou por outra unidade do mesmo titular [34]. O incentivo fez com que o Brasil avançasse de 4 unidades de GD em 2012 para 10.897 em 2017, resultando em 109 GW de capacidade instalada [34]. Apesar de ser o maior consumidor de energia, o setor industrial representa pouco mais de 20% dessa capacidade, com 210 instalações.

Outra característica ainda incipiente para a GD é o uso combinado com Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) [35]. No caso de um sistema fotovoltaico, o armazenamento de energia em bancos de baterias pode auxiliar na suavização de curvas de carga, bem como na redução do consumo em horários de ponta. A integração do sistema à rede elétrica é um aspecto considerado, podendo armazenar a energia em bancos de baterias nos instantes em que a geração é abundante. No período de escassez ou nos instantes em que as tarifas sejam desvantajosas, esses descarregam na rede elétrica a energia armazenada [36]

III. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

O conceito de EE em ambientes industriais pode ser definido como o uso de menos energia para produzir a mesma quantidade de serviços ou produtos [21], [37], relacionando os outputs e a entrada de energia do processo [3]. Embora existam variações sobre a forma de apuração da intensidade energética [12], de maneira geral esse indicador é calculado em (1).

$$\text{Intensidade Energética} = \frac{\text{Entrada de energia}}{\text{Saída útil}} \quad (1)$$

As avaliações das iniciativas de EE industrial tipicamente exibem a economia de custos de energia desses esforços. Essas economias de custos de energia são rotineiramente avaliadas a partir de modelos convencionais de cálculos de retorno para

demonstrar a conveniência de EE [15]. Iniciativas para promover EE podem compreender modificações ou aprimoramentos tecnológicos no processo produtivo, aproximando o conceito de EE ao campo de gestão de energia [12]. Assim, investimentos em tecnologias de energia e práticas de gestão de energia são meios de promover EE [38].

As práticas mais encontradas nos estudos analisados estão relacionadas ao que é definido como Sistema de Gestão de Energia (SGE). A gestão de energia é definida como o uso sistemático de gerenciamento e tecnologia para melhorar o desempenho energético de uma organização [39]. Alguns estudos teóricos abordam os elementos e as características, em ambientes industriais, dos SGE, que constituem a maioria entre as práticas de eficiência energética [2], [12], [24], [39]–[41]. A partir de [42], outros estudos teóricos passaram a considerar o caráter estratégico dos investimentos em eficiência energética [2], [24], [41], [43]–[46]. A forma como uma organização trabalha estrategicamente a questão da energia, bem como os procedimentos escolhidos para isso são os elementos centrais do conceito de Gestão de Energia [45].

IV. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Desenvolveu-se a estrutura sistêmica a partir da revisão da literatura, bem como de entrevistas com os gestores e técnicos da empresa estudada. Esses também auxiliaram no processo de validação. Na modelagem conceitual analisou-se os dados a serem coletados e as informações necessárias para o desenvolvimento do modelo de dinâmica de sistemas.

A partir do modelo conceitual, desenvolveu-se o modelo de dinâmica de sistemas utilizado para análise de diferentes cenários, que será detalhado a seguir. Os cenários foram utilizados para estimar os custos do consumo de energia em um horizonte de 20 anos.

A. Modelo Conceitual

O modelo conceitual deve ser capaz de comunicar o que será implementado de uma maneira clara e funciona como uma ponte entre o analista e o desenvolvedor [47]–[49], sendo necessário para auxiliar na modelagem de dinâmica de sistemas. As variáveis mais relevantes para compreensão do sistema estudado estão apresentadas na Fig. 1. O relacionamento entre as variáveis é representado pelas setas pretas e a fronteira dos módulos é representada pelas linhas pontilhadas em vermelho.

O modelo conceitual parte da premissa que os ajustes no valor final da Tarifa de Energia (TE) são consequência da variação de fatores exógenos como o Produto Interno Bruto (PIB), o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), o Índice de Reajuste Tarifário (IRT), a Bandeira Tarifária e, por fim, a incidência de impostos. A relação entre este conjunto de variáveis constitui o Módulo Tarifário.

O Módulo SCE considera como as políticas de incentivo à MGD e as alterações no ambiente regulatório podem influenciar na atratividade da MGD, fomentando o mercado neste segmento. A dinâmica deste mercado interfere na TE. As variações dos elementos destes dois módulos são representadas no modelo por diferentes de cenários.

influenciadas pelo uso do CRG e pelo SAE, visto que o primeiro recupera a energia e o segundo elimina a variabilidade, usando a energia armazenada quando necessário. A descrição das variáveis do Módulo Firma é apresentada na Tabela I.

TABELA I
VARIÁVEIS DO MÓDULO FIRMA

Variável	Descrição	Unidade
ConsumoIdeal	Consumo anual líquido de energia	MWh
ConsumoPonta	Consumo anual de energia em horário de ponta	MWh
DemC	Demanda contratada de energia	MW
DemU	Demanda ultrapassada	MW
EnComprada	Energia comprada da distribuidora	MWh
EnConsumida	Energia Consumida	MWh
EnDisponível	Energia disponível para consumo	MWh
EnInjetada	Energia injetada no sistema	MWh
IncConsumo	Incremento de consumo de energia	MWh
ProducaoAnual	Volume inicial de produção anual	UEP
txAumentoP	Taxa de aumento de volume de produção	%
txCP	Taxa de consumo em horário de ponta	%
txDemU	Taxa de demanda ultrapassada	%
TxEfEne	Taxa de eficiência energética	%
txProdAno	Volume de produção anual	%

O segundo módulo (Fig 3.) representa a dinâmica tarifária e contempla a influência, na tarifa de energia, de fatores como PIB, IPCA, Reajustes Tarifários Anuais e Periódicos. A TE e TUSD são representadas separadamente, pois terão diferentes comportamentos de acordo com o SCE considerado. Esse módulo também representa as variações da tarifa considerando diferentes políticas de incentivo por meio de redução de impostos para energia injetada na rede da distribuidora.

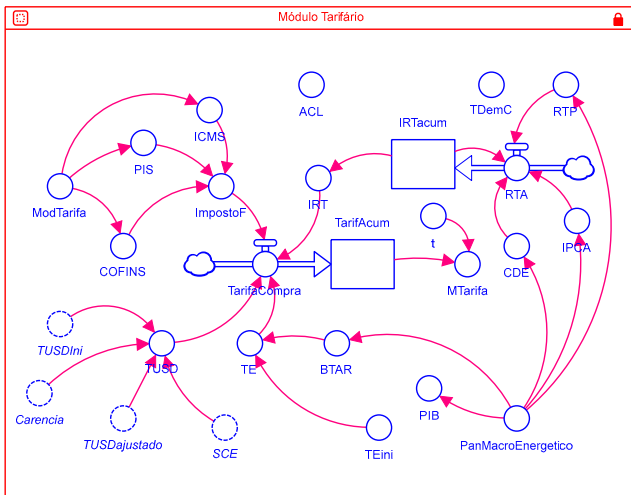


Fig. 3. Módulo Tarifário.

O valor final da tarifa de energia elétrica é obtido pela soma da TE e TUSD, considerando o IRT e a incidência de todos os impostos, conforme representado em (5):

$$TarifaCompra = (TE + TUSD) * (1 + ImpostoF) * IRT \quad (5)$$

A descrição das principais variáveis do Módulo Tarifário é apresentada na Tabela II.

O terceiro módulo (Fig. 4) representa os possíveis impactos das diferentes alternativas de compensação de energia

atualmente discutidas no Brasil, destacando as alterações na cobrança da TUSD para sistemas de MGD.

TABELA II
VARIÁVEIS DO MÓDULO TARIFÁRIO

Variável	Descrição	Unidade
TarifaCompra	Valor da Tarifa de Compra de Energia	R\$/MWh
TDemC	Tarifa da Demanda Contratada	R\$/MW
TE	Tarifa de Energia	R\$/MWh
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição	R\$/MWh
BTar	Bandeira Tarifária	R\$/MWh
ImpostoF	Alíquota final de Impostos	%
IRT	Índice de Reajuste Tarifário	%
RTA	Reajuste Tarifário Anual	%
RTP	Revisão Tarifária Periódica	%
CDE	Conta de Desenvolvimento Energético	%

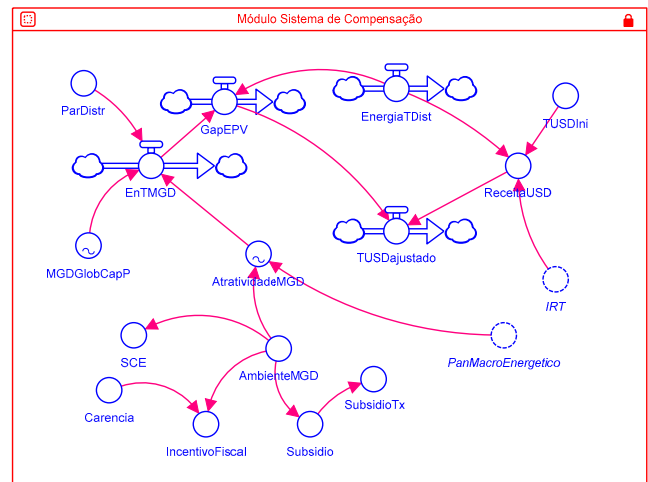


Fig. 4. Módulo SCE.

No modelo atual, essa parcela da tarifa somente é cobrada em função da energia comprada, aumentando a atratividade da MGD. Entretanto, a ANEEL estuda atender o pleito das distribuidoras de energia, passando a cobrar TUSD de toda a energia consumida, independentemente da fonte geradora. Uma projeção de MGD é utilizada para calcular o ajuste da TUSD. Parte-se da premissa que os consumidores remanescentes, aqueles que não adotam MGD, terão que remunerar os custos de operação da distribuidora de acordo com a legislação atual. O valor ajustado da TUSD, é apurada conforme (6).

$$TUSDajustado = ReceitaUSD / (EnergiaTDist - EnTMGD) \quad (6)$$

A descrição das principais variáveis do Módulo SCE é apresentada na Tabela III.

O quarto módulo (Fig. 5) representa a dinâmica da MGD a partir da instalação de sistemas fotovoltaicos e considera elementos como a eficiência e a degradação dos painéis ao longo do tempo. A taxa de simultaneidade, característica de sistemas desta natureza, também é representada, pois terá influência na quantidade de energia que será injetada na rede por não ser gerada no mesmo momento de demanda de carga. Por exemplo, mesmo que a empresa não trabalhe em finais de semana, o sistema solar continuará gerando e injetando energia na rede.

TABELA III
VARIÁVEIS DO MÓDULO SISTEMA DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA

Variável	Descrição	Unidade
TUSDajustado	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição ajustado	R\$/MWh
SubsidioTx	Taxa de subsídio	%
Carencia	Carência para manutenção de incentivos	anos
EnIncDist	Incremento anual de Energia vendida pela Distribuidora	GWh
EnergiaTDist	Energia Total vendida pela Distribuidora	GWh
EnTMGD	Energia Total de MGD	GWh
GapMDG	Parcela de energia excluindo a MGD	GWh
IncentivoFiscal	Incentivos Fiscais	-
MGDGlobCapP	Projeção de Capacidade Instalada de MGD	GWp
ParDistr	Parcela da Distribuidora na Projeção de Capacidade Instalada de MGD	%

e Armazenamento de Energia é apresentada na Tabela IV.

TABELA IV
VARIÁVEIS DO MÓDULO MICROGERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Variável	Descrição	Unidade
DegPainel	Taxa de Degradação dos Painéis Fotovoltaicos	%
EfPainel	Eficiência dos Painéis Fotovoltaicos	%
MGDcap	Capacidade Instalada de MGD	KWp
EnMGDSim	Energia Gerada simultânea ao consumo	MWh
EnMGDnSim	Energia Gerada não simultânea ao consumo	MWh
MGDger	Total de energia gerada	MWh
DegBateria	Degradação das Baterias	%
EfBaterias	Eficiência das Baterias	%
RenBateria	Incremento de Rendimento após manutenção	%
SAEano	Energia disponibilizado pelo SAE por ano	MWh
SAEcap	Capacidade do SAE	KW

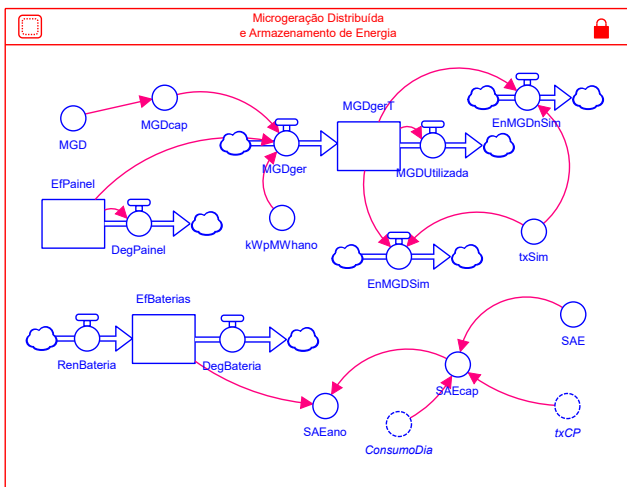


Fig. 5. Módulo Microgeração e Armazenamento de Energia.

A principal variável de saída referente à MGD é a quantidade anual de energia gerada, representada em (7).

$$MGDger = MGDcap * EfPainel * kWpMWhano \quad (7)$$

O SAE estima a capacidade necessária para suprir o consumo diário em horário de pico. A autonomia do fornecimento de energia está relacionada com capacidade do SAE em armazenar energia, neste modelo expressa em kWh. A vida útil considerada foi 5 anos, conforme especificação dos fornecedores. Assim, o SAE tem uma eficiência inicial de 100% que sofre uma degradação absoluta de 5% ao ano. Ao final de 5 anos é realizada uma manutenção no banco de baterias, restaurando a eficiência para 100%. A profundidade de descarga representa o percentual máximo de descarga permitido das baterias sem que haja danificação irreversível do equipamento. Para manter uma eficiência mínima de 80% ao longo de 5 anos, a profundidade de descarga considerada foi 50%. A variável de saída referente ao SAE é a quantidade de energia disponibilizada ao longo do ano, representada em (8).

$$SAEano = SAEcap * EfBaterias * 365 / 1000 \quad (8)$$

A descrição das principais variáveis do Módulo Microgeração

A partir de todas as interligações e variações apresentadas nos módulos anteriores, os resultados financeiros são estimados, e representam um resumo das despesas com energia elétrica. Por exemplo, caso a empresa opte por instalar painéis solares, será computado o CAPEX dos equipamentos. O impacto financeiro desta ação será percebido no OPEX. A partir dos resultados financeiros é possível estimar os custos de energia elétrica para cada UEP, bem como o ganho estimado em cada cenário.

C. Coleta de Dados

Para levantamento de dados de consumo de energia, características produtivas e estruturação do modelo foi realizado um estudo de caso em uma empresa de médio porte, denominada Firma AT, contemplando análise de relatórios de consumo de energia e produção, bem como entrevistas de validação da estrutura geral do modelo com decisões de nível gerencial. A Firma AT é enquadrada na modalidade tarifária do Grupo A, Subgrupo A4, onde os consumidores são atendidos com tensão entre de 2,3 kV e 25 kV. Além do grupo e subgrupo, a Firma AT adota a estrutura tarifária horo-sazonal verde. Nesta modalidade o consumidor contrata um valor de demanda, independente da hora do dia e possui três parcelas distintas: uma referente ao consumo, uma referente à demanda contratada e outra referente à ultrapassagem de demanda. A Tabela V apresenta os principais dados utilizados:

TABELA V
DADOS DA EMPRESA

ITEM	DADO
Tipo de Tarifa	Horária Verde
Tensão Conectada	13800v
Subgrupo de Tensão	A4
Demanda Contratada	215 MW
% de Demanda Ultrapassada	5%
Consumo Médio Anual Fora de Ponta	55,6 MWh
Consumo Médio Anual Ponta	3,1 MWh
TE - Tarifa de Energia (sem impostos)	R\$ 200/MWh
TUSD	R\$ 202/MWh
Impostos (ICMS, PIS, COFINS)	24,49%
Localização (Latitude, Longitude)	-29°56'17", -50°57'19"
Altitude	20 m
Geração média diária de energia (kWh) por potência instalada (kWp) para o ciclo anual, considerando azimute 0° e inclinação dos painéis em 20°.	1344 kWh/dia
Potencial de EE	30%
Produção anual (UEP)	438 unidades

As informações macroeconômicas e o panorama energético foram obtidos em consulta à base de dados de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), ANEEL, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE), Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia (ABESCO). Os custos de aquisição de equipamento e instalação de MGD são os preços médios praticados no mercado. Os valores de geração média diária de energia foram obtidos do Atlas Solar Global [52] a partir das coordenadas de localização da empresa.

D. Definição dos Cenários

Os cenários elaborados consideram variações no panorama macro energético, alterando parâmetros como o PIB, Bandeira Tarifária, CDE, IPCA, Revisão Tarifária Periódica (RTP) que resultam na Revisão Tarifária Anual (RTA). Para a elaboração dos cenários 2.1, 2.2 e 2.3 assume-se o pressuposto de que o custo da energia terá um aumento moderado, projetando uma elevação do PIB de 1,5% a.a., CDE de 1,0% a.a., IPCA de 4,0% a.a., próximo a meta atual do governo, RTP de 7,5% a cada quatro anos, e bandeira tarifária amarela.

Os cenários 3.1, 3.2 e 3.3 consideram um alto custo de energia, influenciado principalmente pelo IPCA e RTP. Assim, partem da premissa que o custo da energia vendida pelas distribuidoras terá um aumento elevado, com PIB aumentado 3,0% a.a., CDE de 2,0% a.a., IPCA de 6,0% a.a., próximo a meta atual do governo, RTP de 15% a cada quatro anos e bandeira tarifária vermelha.

Variáveis relacionadas especificamente ao ambiente para inserção de MGD complementam as variações de cenários, representando as diferentes combinações do SCE, Incentivos Fiscais e Subsídios. No ambiente para MGD são representados os fatores que atualmente estão em discussão através da Análise de Impacto Regulatório proposta em audiência pública pela ANEEL. Assim, as alterações no ambiente para MGD variam entre cobrança de tarifas e ausência de incentivos governamentais, configurando um ambiente menos propício para utilização de MGD, até a isenção de tarifas e existência de incentivos governamentais durante 20 anos. Entre estes dois extremos, um ambiente intermediário com 10 anos de incentivos. É importante destacar que um ambiente favorável para quem implanta MGD pode resultar em custos mais elevado para quem não adota este tipo de iniciativa. A Tabela VI apresenta o resumo dos cenários.

TABELA VI
CENÁRIOS ELABORADOS

CENÁRIO	AMBIENTE MGD	PANORAMA MACRO ENERGÉTICO
2.1	Durante 20 anos: Cobra TSDU; Sem Incentivo Fiscal; Sem Subsídios.	PIB = 1,5%
2.2	Nos primeiros 10 anos: Isenta TSDU; Com Incentivo Fiscal; Com Subsídios.	CDE = 1,0% IPCA = 4,0%
2.3	Durante 20 anos: Isenta TSDU; Com Incentivo Fiscal; Com Subsídios.	RTP = 7,5%
3.1	Durante 20 anos: Cobra TSDU; Sem Incentivo Fiscal; Sem Subsídios.	PIB = 3,0%
3.2	Nos primeiros 10 anos: Isenta TSDU; Com Incentivo Fiscal; Com Subsídios.	CDE = 2,0% IPCA = 6,0%
3.3	Durante 20 anos: Isenta TSDU; Com Incentivo Fiscal; Com Subsídios	RTP = 15%

Os cenários 2.1, 2.2 e 2.3 partem da premissa que o custo da energia vendida pelas distribuidoras terá um aumento moderado, variando a atratividade da MGD e AEE em função das políticas de incentivo. Os cenários 3.1, 3.2 e 3.3 pressupõem um custo alto de energia, influenciado principalmente pelo IPCA e RTP.

E. Definição das Ações

Cada cenário foi simulado considerando as possíveis decisões de uso MGD, variando a capacidade instalada entre 0 e 75 kWp, juntamente com a possibilidade de utilização de SAE. As práticas de eficiência energética (PEE) representam quatro possibilidades, mesclando a implantação de SGE e CRG. Desta forma, uma AEE é a combinação dos itens apresentados. Por exemplo, uma ação denominada 15.0.3 representa a decisão de instalar 15kWp de potência na MGD, não utilizar sistema de armazenamento (SAE=0) e adotar o nível 3 de PEE, que contempla a utilização de SGE e do CRG. A Tabela VII apresenta uma síntese das AEE utilizadas.

TABELA VII
SÍNTESE DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DISPONÍVEIS

AEE	VARIAÇÕES
MGD	Varia entre 0 e 75kWp
SAE	0 - Não utiliza; 1 - Utiliza
PEE	0 - Não utiliza; 1 - Utiliza SGE; 2 - Utiliza CRG; 3 - Utiliza todos

Assim, além da possibilidade de não adotar MGD e MEE, foram testadas 40 combinações de decisão. Ao total foram realizadas 246 simulações.

V. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

O modelo permite estimar o comportamento do Custo Médio de Energia Utilizada (CME) para cada UEP. Esta escolha se deu em virtude desse indicador estimar simultaneamente o impacto de todas as decisões, incorporando o tanto o CAPEX quanto o OPEX em uma única variável de resposta.

As análises descritivas do CME para cada um dos cenários simulados podem ser realizadas a partir dos resultados apresentados na Tabela VIII. A linha inicial representa a não instalação de MGD e PEE, mantendo a situação atual da empresa. Para esta decisão, o CME varia entre R\$ 232 e R\$ 1246. Os resultados da AEE 0.0.0 foram utilizados como linha de base de modo a permitir a mensuração do impacto nas variáveis de resposta a partir de diferentes AEE. Caso opte por uma capacidade de 45 kW, com utilização de SAE e todas as medidas de EE, a linha analisada será a **45.1.3**. Neste caso o CME estimado varia entre R\$ 165 e R\$ 418, reduzindo de maneira significativa o CME nos cenários de custo elevado de energia comprada.

Ao visualizar as variações do CME dentro de cada cenário, é possível perceber que a dispersão diminui à medida em que se projeta o aumento da MGD. No cenário 3.3 o custo mais elevado é estimado em R\$ 1246 caso a empresa opte por não adotar MDG e EE. Por outro lado, ao instalar 75 kW de MGD e adotar as demais AEE este valor reduz para R\$ 222, mitigando o impacto das variações do IPCA e revisões tarifárias.

O comportamento do CME em relação aos cenários em cada faixa de potência de MGD instalada revela que o CME é mais

elevado no cenário 3.3. Por outro lado, neste mesmo cenário pode-se obter a maior redução de CME ao aumentar a capacidade instalada de MGD. Nos cenários em que a energia fornecida é cara, o uso de MGD surge como alternativa para reduzir o CME.

TABELA VIII
CUSTO MÉDIO DE ENERGIA UTILIZADA POR UEP - R\$/UEP

CENÁRIOS						
AEE	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
0.0.0	232	297	408	407	629	1246
15.0.0	218	272	340	377	583	1061
15.0.1	209	260	323	361	556	1003
15.0.2	198	246	303	340	524	939
15.0.3	192	237	289	327	503	893
15.1.0	204	247	298	340	518	920
15.1.1	195	235	281	324	491	862
15.1.2	187	224	265	308	465	812
15.1.3	180	215	252	295	444	766
30.0.0	209	253	278	356	548	885
30.0.1	200	241	260	339	520	827
30.0.2	190	227	240	319	488	764
30.0.3	183	217	226	306	466	717
30.1.0	195	228	236	319	482	744
30.1.1	186	216	218	303	454	686
30.1.2	178	205	203	287	429	636
30.1.3	171	195	189	274	407	589
45.0.0	201	234	216	335	512	710
45.0.1	192	222	199	319	484	652
45.0.2	183	210	181	299	454	590
45.0.3	176	202	168	286	433	544
45.1.0	187	210	175	299	447	569
45.1.1	178	199	158	282	420	512
45.1.2	172	190	145	268	397	464
45.1.3	165	183	133	255	376	418
60.0.0	199	229	171	320	488	546
60.0.1	192	221	161	304	464	491
60.0.2	185	212	152	287	438	436
60.0.3	180	205	149	275	419	395
60.1.0	187	208	137	285	426	410
60.1.1	180	200	129	270	403	357
60.1.2	176	194	125	257	383	315
60.1.3	171	188	122	246	365	277
75.0.0	207	236	170	313	480	414
75.0.1	200	228	165	299	457	372
75.0.2	194	220	160	284	434	335
75.0.3	189	213	156	275	418	315
75.1.0	195	216	142	280	421	291
75.1.1	189	208	137	267	399	256
75.1.2	185	202	133	257	382	234
75.1.3	180	196	129	248	366	222

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em se tratando de ambientes industriais, estudos de eficiência termodinâmica e mecânica em empresas eletrointensivas têm recebido maior atenção. Entretanto, o contexto dessas empresas é distinto do contexto das empresas de uso não intensivo de energia, o que dificulta a generalização ou a adoção das práticas para as PME.

Dado o conjunto de fatores considerados nos cenários e a complexidade deste tipo de decisão, o modelo proposto permite ao decisor estimar o impacto financeiro em diferentes cenários, além dos que foram analisados neste estudo, ampliando a compreensão do processo de decisão relativo à adoção de tecnologias para incremento de eficiência energética em PME,

especialmente no contexto brasileiro. Com a MDS foi possível avançar além das limitações de abordagens tradicionais, como VPL, TIR e *payback*. Para os gestores de PME a utilização deste modelo permite aprofundar a compreensão dos efeitos de alterações do ambiente externo, e mensurar o impacto destas incertezas na parcela de custo de energia dos produtos fabricados na firma. Convém ressaltar que os custos totais projetados variam nos diferentes cenários, pois os incentivos e subsídios influenciam nos custos de aquisição e compra de energia. Mesmo que o valor do CME seja menor que o cenário base, não representa necessariamente o custo total será menor dentro do mesmo cenário. Ao realizar a análise em diferentes cenários, é possível estimar o potencial impacto financeiro.

O modelo para a estimar o potencial impacto financeiro de longo prazo da microgeração solar e eficiência energética limita-se à fatores relacionados aos ambientes macroeconômico e macro energético. Assim, variáveis relacionadas a fatores microeconômicos, com exceção das características de consumo de energia da empresa, não estão contempladas neste modelo.

Embora o impacto da MGD em redes elétricas de baixa tensão possa influenciar na variabilidade de variáveis como o consumo e disponibilidade de energia, estes fatores não estão no escopo deste trabalho. Reconhecendo as limitações e os pressupostos assumidos neste estudo, os parâmetros do modelo podem ser ajustados para outras empresas, em diferentes localizações, atendidas por outras distribuidoras de energia, permitindo a utilização em outras situações de interesse.

AGRADECIMENTOS

Jonatas Campos Martins agradece ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS, *Campus Bento Gonçalves*, pelo apoio recebido para realização do Curso de Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos.

REFERÊNCIAS

- [1] O. A. Olanrewaju and A. A. Jimoh, "Review of energy models to the development of an efficient industrial energy model," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 661–671, 2014.
- [2] N. Finnerty, R. Sterling, D. Coakley, S. Contreras, R. Coffey, and M. M. Keane, "Development of a Global Energy Management System for non-energy intensive multi-site industrial organisations: A methodology," *Energy*, vol. 136, pp. 16–31, 2017.
- [3] F. C. Fenerich, S. E. G. Da Costa, and E. P. De Lima, "Energy Efficiency in Industrial Environments: Overview and Research Agenda," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 3, pp. 415–422, 2017.
- [4] I. E. A. IEA, "Energy Efficiency Market Report," 2016.
- [5] C. Beaton and T. Moernhout, "A Literature Review on Subsidies to Electricity from Renewable Energy Sources," NCCR Working Paper 2011/63, 2011: 8, 2011.
- [6] D. Manz, R. Walling, N. Miller, B. LaRose, R. D'Aquila, and B. Daryanian, "The grid of the future: Ten trends that will shape the grid over the next decade," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 12, no. 3, pp. 26–36, 2014.
- [7] J. Twidell and T. Weir, *Renewable energy resources*. Routledge, 2015.
- [8] D. Vieira, R. A. Shayani, and M. A. G. De Oliveira, "Net metering in Brazil: Regulation, opportunities and challenges," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 8, pp. 3687–3694, 2016.
- [9] M. Samper, D. Flores, and A. Vargas, "Investment Valuation of Energy Storage Systems in Distribution Networks considering Distributed Solar Generation," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 4, pp. 1774–1779, 2016.

- [10] I. S. Machado, B. S. M. C. Borba, and R. S. Maciel, "Modeling Distributed PV Market and its Impacts on Distribution System: A Brazilian Case Study," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 11, pp. 4520–4526, 2016.
- [11] J. Liu, Y. Long, and X. Song, "A study on the conduction mechanism and evaluation of the comprehensive efficiency of photovoltaic power generation in China," *Energies*, vol. 10, no. 5, p. 723, 2017.
- [12] K. Bunse, M. Vodicka, P. Schönsleben, M. Brühlhart, and F. O. Ernst, "Integrating energy efficiency performance in production management - Gap analysis between industrial needs and scientific literature," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 6–7, pp. 667–679, 2011.
- [13] T. Nehler and J. Rasmussen, "How do firms consider non-energy benefits? Empirical findings on energy-efficiency investments in Swedish industry," *J. Clean. Prod.*, vol. 113, pp. 472–482, 2016.
- [14] F. Knobloch and J. F. Mercure, "The behavioural aspect of green technology investments: A general positive model in the context of heterogeneous agents," *Environ. Innov. Soc. Transitions*, vol. 21, pp. 39–55, 2016.
- [15] R. B. Lung, A. Mckane, R. Leach, and D. Marsh, "Ancillary Savings and Production Benefits in the Evaluation of Industrial Energy Efficiency Measures," in *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*, 2005, pp. 103–114.
- [16] M. Karlsson, "The MIND method: A decision support for optimization of industrial energy systems - Principles and case studies," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 3, pp. 577–589, Mar. 2011.
- [17] C. L. Landini and P. H. de Mello Sant'Ana, "Technical, economic, and regulatory analysis of the implementation of micro-cogeneration technology in the Brazilian manufacturing sector," *Energy Effic.*, vol. 10, no. 4, pp. 957–971, 2017.
- [18] L. Alcorta, M. Bazilian, G. De Simone, and A. Pedersen, "Return on investment from industrial energy efficiency: Evidence from developing countries," *Energy Effic.*, vol. 7, no. 1, pp. 43–53, 2014.
- [19] J. Rasmussen, "The additional benefits of energy efficiency investments—a systematic literature review and a framework for categorisation," *Energy Effic.*, vol. 10, no. 6, pp. 1401–1418, 2017.
- [20] A. Trianni, E. Cagno, and A. De Donatis, "A framework to characterize energy efficiency measures," *Appl. Energy*, vol. 118, pp. 207–220, 2014.
- [21] H. S. Aplak and M. Z. Sogut, "Game theory approach in decisional process of energy management for industrial sector," *Energy Convers. Manag.*, vol. 74, pp. 70–80, 2013.
- [22] J. Boehner, "Multi Criteria Decision Making Enhancing Sustainable Energy Management," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 805, no. Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production, pp. 32–37, 2015.
- [23] J. Dong and H. Huo, "Identification of financing barriers to energy efficiency in small and medium-sized enterprises by integrating the fuzzy delphi and fuzzy DEMATEL Approaches," *Energies*, vol. 10, no. 8, p. 1172, 2017.
- [24] N. Bhanot, P. V. Rao, and S. G. Deshmukh, "An integrated approach for analysing the enablers and barriers of sustainable manufacturing," *J. Clean. Prod.*, vol. 142, no. 4, pp. 4412–4439, Jan. 2017.
- [25] T. Horschig and D. Thrän, "Are decisions well supported for the energy transition? A review on modeling approaches for renewable energy policy evaluation," *Energy. Sustain. Soc.*, vol. 7, no. 1, p. 5, 2017.
- [26] W. Ho and X. Ma, "The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process," *Eur. J. Oper. Res.*, 2017.
- [27] L. Cassetari, I. Bendato, M. Mosca, and R. Mosca, "Energy Resources Intelligent Management using on line real-time simulation: A decision support tool for sustainable manufacturing," *Appl. Energy*, vol. 190, pp. 841–851, Mar. 2017.
- [28] J. P. Sáenz, N. Celik, S. Asfour, and Y. J. Son, "Electric utility resource planning using Continuous-Discrete Modular Simulation and Optimization (CoDiMoSO)," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 63, no. 3, pp. 671–694, 2012.
- [29] T. F. Adane and M. Nicolescu, "System dynamics analysis of energy usage: case studies in automotive manufacturing," *Int. J. Manuf. Res.*, vol. 9, no. 2, p. 131, 2015.
- [30] M. Zeng *et al.*, "Industrial System Energy Efficiency Assessment Using System Dynamics," *Proc. 2015 3rd Int. Conf. Mach. Mater. Inf. Technol. Appl.*, vol. 35, pp. 1299–1302, 2015.
- [31] J. D. Rodrigues, L. da Silva, and T. Mareth, "Análise bibliométrica e de redes de cooperação das publicações sobre o método das unidades de esforço de produção," in *Anais do Congresso Brasileiro de Custos-ABC*, 2018.
- [32] F. Gianelloni, G. D. A. Dantas, J. F. Alves, N. De Castro, and P. Pereira, "The distributed electricity generation diffusion impact on the Brazilian distribution utilities," *3rd Int. Conf. Energy Environ. bringing together Eng. Econ.*, 2017.
- [33] A. N. de E. E. ANEEL, "Resolução Normativa 482, de 17 de abril de 2012." ANEEL, Brasília/DF, 2012.
- [34] J. L. de S. S. Silva, M. M. Cavalcante, M. R. da S. Silva, and D. B. de M. Delgado, "ANÁLISE DO AVANÇO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL," *VII Congr. Bras. Energ. Sol.*, 2018.
- [35] M. A. Knabben, L. Adamek, S. F. Nunes, and F. L. Abelino, "Photovoltaic Solar Energy Storage and Management System Applied to a Funcional Prototype/Sistema de Armazenamento e Gerenciamento de Energia Solar Fotovoltaica Aplicado em um Protótipo Funcional," *Brazilian J. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 334–343, 2019.
- [36] H. Akiyoshi, E. Hiraki, T. Tanaka, M. Okamoto, T. Matsuo, and K. Ochi, "Peak power shaving of an electric injection molding machine with supercapacitors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 2, pp. 1114–1120, 2013.
- [37] M. G. Patterson, "What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues," *Energy Policy*, vol. 24, no. 5, pp. 377–390, May 1996.
- [38] M. G. Perroni, S. E. Gouvea da Costa, E. Pinheiro de Lima, and W. Vieira da Silva, "The relationship between enterprise efficiency in resource use and energy efficiency practices adoption," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 190, pp. 108–119, Aug. 2017.
- [39] P. Antunes, P. Carreira, and M. Mira da Silva, "Towards an energy management maturity model," *Energy Policy*, vol. 73, pp. 803–814, 2014.
- [40] M. Schulze, H. Nehler, M. Ottosson, and P. Thollander, "Energy management in industry - A systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 3692–3708, 2016.
- [41] G. May, B. Stahl, M. Taisch, and D. Kiritsis, "Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework," *J. Clean. Prod.*, vol. 167, pp. 1464–1489, 2018.
- [42] C. Cooremans, "Make it strategic! Financial investment logic is not enough," *Energy Effic.*, vol. 4, no. 4, pp. 473–492, Nov. 2011.
- [43] C. Cooremans, "Investment in energy efficiency: Do the characteristics of investments matter?," *Energy Effic.*, vol. 5, no. 4, pp. 497–518, Nov. 2012.
- [44] B. Sudhakara Reddy, "Barriers and drivers to energy efficiency - A new taxonomical approach," *Energy Convers. Manag.*, vol. 74, pp. 403–416, 2013.
- [45] P. Thollander and J. Palm, "Industrial energy management decision making for improved energy efficiency-strategic system perspectives and situated action in combination," *Energies*, vol. 8, no. 6, pp. 5694–5703, 2015.
- [46] J. Henriques and J. Catarino, "Motivating towards energy efficiency in small and medium enterprises," *J. Clean. Prod.*, vol. 139, pp. 42–50, 2016.
- [47] J. Liu, Y. Yu, L. Zhang, and C. Nie, "An overview of conceptual model for simulation and its validation," *Procedia Eng.*, vol. 24, pp. 152–158, 2011.
- [48] D. K. Pace, "Ideas about simulation conceptual model development," *Johns Hopkins APL Tech. Dig.*, vol. 21, no. 3, pp. 327–336, 2000.
- [49] S. Robinson, "Conceptual modeling for simulation: issues and research requirements," in *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation*, 2006, pp. 792–800.
- [50] A. L. Andrade, A. Seleme, L. H. Rodrigues, and R. Souto, "Pensamento sistêmico: caderno de campo," *Porto Alegre*, 2006.
- [51] M. I. W. M. Morandi, L. H. Rodrigues, D. P. Lacerda, and I. Pergher, "Foreseeing iron ore prices using system thinking and scenario planning," *Syst. Pract. Action Res.*, vol. 27, no. 3, pp. 287–306, 2014.
- [52] ESMAP, SOLARGIS, WB, and IFC, "Global Solar Atlas," *Glob. Sol. Atlas*, p. 1, 2019.



Jonatas Campos Martins é Professor no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul. Doutorando em Engenharia de Produção e Sistemas pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Possui graduação e mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

Tem experiência na área de Engenharia de Produção, com ênfase em Gerenciamento de Projetos, Modelagem Empresarial e Sistemas de Produção.



Maria Isabel Wolf Motta Morandi é Doutora em Engenharia de Produção e Sistema pela UNISINOS; Mestre em Engenharia de Produção pela UNISINOS, possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1989) e especializações em Gestão e Logística pela FGV. Tem experiência em empresas multinacionais de grande porte,

atuando em diversas áreas industriais tais como Análise de Custos, Logística, Gestão de Materiais, Gestão de Qualidade e Meio Ambiente. Atua como professora da UNISINOS e coordenadora do GMAP:UNISINOS.



Daniel Pacheco Lacerda é Doutor em Engenharia de Produção pela COPPE/UFRJ e Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq (PQ-2) na área de Engenharia de Produção, desde 2017. Atua como Coordenador do Bacharelado em Engenharia de Produção/UNISINOS. Tem experiência profissional e acadêmica nas áreas de Estratégia de Operações,

Engenharia de Processos de Negócios, Gestão e Análise de Eficiência, Design Science Research e Teoria das Restrições. Atualmente, é pesquisador permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - PPGEPS/UNISINOS e coordenador do GMAP | UNISINOS (Grupo de Pesquisa em Modelagem para Aprendizagem).