

A Multiobjective Optimization Model for the Design of Hybrid Renewable Energy Systems

M. Pereira, *Member, IEEE*, E. Rego, and M. Nagano

Abstract—Fossil fuels are the main energy sources nowadays. Nevertheless, they issue huge amount of carbon dioxide and other byproducts to atmosphere boosting air pollution and greenhouse effect. Beside those issues fossil fuels are vehicles of geopolitical and market instability and bad wealth distribution among countries. The consequent environment impact and increasing energy costs impose the need for other cleaner and equitable sources. Hybrid renewable energy systems (HRES) poses as viable alternative sources for conventional fossil fuels. In this paper, we present a multiobjective optimization model in MILP for the selection and sizing of components of HRES, which considers sustainability criteria in objective function. The model is dynamic in the sense of what technologies should be selected (activated) and what should be withdraw (deactivated) within the planning horizon to satisfy optimization criteria and demand dynamics. The model was conceived for evaluating energy generation and charge technologies and it is general enough to cover all kinds of energy technologies. The suitability of the model is tested for different hypothetical scenarios. Results demonstrated the model is suitable to assist decision makers in planning strategically the energy resource needs in different contexts.

Index Terms—Hybrid Renewable Energy Systems, Optimization, Mixed Integer Programming, Multiobjective, Strategic Planning.

I. INTRODUÇÃO

NOS ÚLTIMOS cinquenta anos, o crescimento populacional e o desenvolvimento tecnológico resultaram no aumento exponencial do consumo de energia em nível mundial, principalmente no setor de energia elétrica [1].

Hoje, grande parte da energia elétrica consumida no mundo provém de fontes não renováveis baseadas em combustíveis fósseis. Entretanto, tais fontes não podem atender às necessidades futuras de energia por serem altamente poluentes, esgotáveis em médio prazo e criarem desequilíbrios geopolíticos e econômicos [2], [3]. A diminuição global dos estoques de combustíveis fósseis, a dificuldade de localização de novas reservas, o encarecimento da exploração e refino, a consequente tendência de aumento do preço destas *commodities*

no mercado internacional a médio prazo, o aumento da instabilidade dos mercados, a degradação do meio ambiente pelo uso indiscriminado deles e o efeito estufa gerado pela descarga de enormes quantidades de carbono para atmosfera são alguns dos fatores de estímulo ao uso de fontes renováveis energia em substituição às fontes fósseis [4], [5], [6].

Entretanto, o emprego de fontes renováveis isoladamente pode levar a altos custos de instalação e operação, além de baixa segurança energética devido a geração intermitente causada pelo comportamento estocástico de algumas fontes, tais como a solar e a eólica. Para solucionar estes problemas, foram concebidos os sistemas híbridos de energias renováveis (SHER). Estes sistemas combinam fontes tradicionais de energia com as renováveis conjuntamente com sistemas de armazenagem de energia para o atendimento da demanda em momentos de pico de consumo ou oscilação na geração [7], [8], [9], [10].

Em situações onde a energia gerada pelos subsistemas renováveis não é suficiente para atender a demanda, outras fontes não renováveis e de armazenagem são acionadas para cobrirem o déficit de energia. Por outro lado, em momentos de baixo consumo, os subsistemas em operação alimentam o subsistema de armazenagem com energia que futuramente será utilizada para atender ao pico de demanda [11], [12].

Os SHER podem ser construídos para serem conectados diretamente a rede elétrica principal ou para funcionarem desconectados dela, alimentando micro redes locais. Quando operam conectados, podem ser configurados para obterem ganhos de escala, sendo desativados nos horários de tarifa baixa de energia (fora de ponta) e acionados nos horários de altos preços (ponta), atendendo a demanda local e vendendo o excedente para a rede principal [13].

Operando desta maneira, os SHER provêm vantagens sobre os sistemas renováveis não híbridos: aumentam a penetração das fontes renováveis; reduzem o custo de energia, o risco de não atendimento da demanda e as emissões de gases de efeito estufa (GEE); fornecem energia para regiões (por vezes remotas) não atendidas pela rede elétrica principal e promovem o desenvolvimento econômico local. Tais vantagens, indubitavelmente, estabelecem os SHER como sistemas sustentáveis por atenderem simultaneamente a aspectos sociais, ambientais e econômicos.

O planejamento e modelagem otimizados dos componentes, tecnologias, subsistemas e integrações de SHER são de extrema importância para que tais sistemas operem de forma eficiente e atendam eficazmente aos critérios de sustentabilidade.

O modelo matemático proposto neste artigo tem o propósito de apoiar o tomador de decisão no planejamento estratégico e na avaliação de diferentes alternativas tecnológicas para a

M. T. Pereira e M. S. Nagano são do Departamento de Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil (e-mail: mtonizza@usp.br; drnagano@usp.br).

E. E. Rego é do Departamento de Engenharia de Produção, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil (e-mail: erikreg@usp.br).

instalação e operação de SHER de forma a atender aos critérios técnico-econômicos, ambientais e sociais. Para isto, o modelo foi concebido para ser multiobjetivo e abrangente, permitindo ao planejador ponderar quais critérios e tecnologias de geração e armazenagem melhor atendem as necessidades de planejamento energético impostas a ele.

Este artigo está dividido da seguinte forma: na seção II são apresentados estudos relevantes para esta pesquisa. Na seção III, o sistema SHER é definido e o modelo matemático é descrito. Na seção IV, o modelo é avaliado para alguns cenários e os resultados são comentados. Na seção V, propostas de futuras pesquisas são apresentadas conjuntamente com a conclusão desta pesquisa.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diferentes métodos de otimização têm sido tradicionalmente aplicados ao dimensionamento, planejamento e operação de SHER [14], [15], [16]. Especificamente, a programação matemática tem suprido a comunidade de pesquisadores, analistas e planejadores do setor energético com métodos para a resolução de problemas de decisão de diferentes portes e complexidades, nos âmbitos econômico, ambiental e social, nos quais um ou mais objetivos ou critérios de desempenho devem ser avaliados até a otimalidade e sujeitos a restrições de diferentes tipos, tais como operacionais e tecnológicas [17], [18], [19].

Uma das formas de modelagem ou abordagem de otimização é a programação linear inteira mista (PLIM). Neste tipo de modelagem, algumas variáveis de decisão tomam obrigatoriamente valores reais positivos (ex.: potência instalada), enquanto que outras tomam obrigatoriamente valores inteiros positivos, sendo que as variáveis inteiras podem assumir valores binários (ex.: tecnologia a ser utilizada), ou seja, assumem valores iguais a 1 (um), significando, por exemplo, que uma determinada tecnologia foi selecionada, ou 0 (zero) caso contrário [20].

Diversos casos de uso de PLIM foram reportados pela literatura para o planejamento estratégico e operacional de SHER.

Roberts *et al.* [21] implementam um modelo multiobjetivo em PLIM para o dimensionamento de tecnologias eólica, solar e térmica a óleo diesel de um SHER, objetivando minimizar os custos de instalação, operação e manutenção e a probabilidade de falta de suprimento de energia. O modelo considera variáveis estocásticas que buscam capturar incertezas relacionadas à disponibilidade dos recursos e flutuações de demanda. A robustez do modelo é avaliada através da resolução de cenários gerados por métodos de simulação. O modelo é implementado em um estudo de caso no Brasil em uma comunidade do interior do estado do Amazonas.

Ferrer-Martí *et al.* [22] desenvolvem um modelo em PLIM para o dimensionamento e localização de componentes de sistemas híbridos eólico-fotovoltaico que operam conectados a micro redes. Os sistemas devem atender a demanda de regiões rurais distantes do sistema elétrico principal. O modelo tem por objetivo minimizar os custos de instalação, operação e armazenagem de energia.

Mahleri e Sarimveis [23] apresentam um modelo em PLIM para o dimensionamento de sistemas de geração de energia para

atender a demandas de consumo elétrico e de aquecimento. O modelo considera concomitantemente as tecnologias de geração solar e de centrais de cogeração a combustível fóssil, objetivando a minimização de custos de instalação, operação, compra e venda de energia elétrica e emissão de GEE.

Bracco *et al.* [24] desenvolvem um modelo em PLIM para o dimensionamento e operação de um sistema distribuído de geração de calor e eletricidade. Seu modelo apresenta uma função objetivo que relaciona investimentos de capital, custos operacionais e custos de emissão de GEE.

Em Bracco *et al.* [25] é descrito o *software* DESOD, desenvolvido pelos autores para o dimensionamento de sistemas distribuídos que provêm eletricidade, aquecimento e refrigeração ao menor custo de instalação, operação e manutenção. O *software* implementa um modelo em PLIM que realiza o dimensionamento da instalação e operação de tecnologias limpas e de cogeração a combustível fóssil.

Ren e Gao [26] propõem um modelo em PLIM para o planejamento, avaliação e programação de sistemas distribuídos de energia que incluem tecnologias limpas, não renováveis e a cogeração. Além de aspectos econômicos, o modelo proposto considera o impacto de tecnologias sujas no meio ambiente.

Outros autores têm proposto modelos de otimização em programação matemática para avaliação de portfólios de investimento em geração renovável de energia utilizando a Teoria Moderna de Carteiras que avalia alternativas de investimento sujeitas a condições de risco [27], [28].

Inúmeros estudos acadêmicos foram conduzidos com a finalidade de simular e avaliar diferentes configurações de SHER predefinidas pelo planejador, com objetivos técnico-econômicos e ambientais, dando ênfase na análise de determinadas tecnologias. Esta abordagem difere da abordagem da PLIM por considerar previamente quais combinações de tecnologias deverão ser avaliadas.

Khan *et al.* [29] analisam a viabilidade técnico-econômica de diferentes combinações das tecnologias de geração eólica, solar e térmica a diesel e de armazenagem por baterias. As configurações são avaliadas para diferentes cidades da Índia.

Luna-Rubio *et al.* [30] avaliam sete diferentes combinações das tecnologias de geração eólica, solar, térmica a diesel e armazenagem a baterias para três comunidades rurais da Colômbia. A análise considera aspectos econômicos e ambientais (emissões de GEE) na seleção da melhor configuração.

Estudos similares são descritos em [31] para uma comunidade insular da China, em [32] na Jordânia, em [33] na Malásia, em [34] no Irã, em [35], [36], [37] para regiões da Argélia e em [38], [39] e [40] para diferentes regiões do Brasil.

Além de aspectos econômicos e ambientais, existem estudos que avaliam o impacto social da implementação de SHER.

Cameron e Van der Zwaan [41] revisam a literatura acadêmica onde oportunidades de emprego são geradas na utilização de tecnologias renováveis e apresentam diferentes abordagens de estimação de fatores de emprego.

Upadhyay e Sharma [42] destacam como fator social o impacto positivo da criação de empregos diretos ou indiretos e novas classes de profissionais.

Dufo-López *et al.* [43] e Sawle *et al.* [44] destacam o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e a criação de novos

empregos como variáveis de decisão para inclusão nos modelos de avaliação de SHER, propondo formulações para cada variável que serão maximizadas durante o processo de otimização. Os autores simulam o impacto de diferentes configurações das tecnologias eólica, solar, térmica (diesel e biomassa) e armazenagem por baterias sobre estes dois fatores.

O que ficou evidenciado após a revisão destas publicações é que relativamente poucos estudos incorporam conjuntamente fatores sociais e técnico-econômicos em modelos de otimização e simulação de SHER, mas nenhum dos artigos analisados considerou simultaneamente os três fatores na modelagem (social, ambiental e técnico-econômico).

III. MODELAGEM DO SISTEMA

Nesta seção, são descritos aspectos de configuração do SHER assim como o modelo matemático desenvolvido para solucionar o problema de decisão.

A. Configuração do Sistema

Um exemplo do esquema de configuração das componentes do SHER estudado neste artigo é apresentado em Fig. 1. Na figura, pode-se identificar as componentes renováveis do sistema, representadas pelos subsistemas solar e eólico, assim com a componente não-renovável representada pelo subsistema de geração a óleo diesel. O esquema também apresenta o banco de baterias para armazenagem de excedente de energia. Cabe observar que o modelo proposto nesta pesquisa não se limita a estas fontes de energia, sendo suficientemente abrangente para contemplar simultaneamente fontes renováveis e não renováveis de geração e armazenagem de energia.

A seleção de quais fontes de energia ou tecnologias de geração e armazenagem utilizar é influenciada por diferentes objetivos, por vezes conflitantes, tais como critérios econômicos, técnicos, ambientais e sociais. Por exemplo, sistemas híbridos solar-eólico têm a vantagem de gerarem menor impacto ambiental quando em operação, mas em geral não conseguem operar ininterruptamente devido a intermitência da geração. Sistemas que combinam fontes renováveis e não renováveis têm a vantagem de atenderem melhor a aspectos de segurança energética em detrimento do maior risco ambiental e de terem os custos de operação diretamente impactados por oscilações nos preços dos combustíveis fósseis. É de fundamental importância que o tomador de decisão ou formulador de políticas energéticas tenha em mãos o ferramental adequado para realizar tais escolhas, por vezes conflitantes. O modelo proposto busca atender a este anseio.

B. Modelo Matemático

O modelo proposto atende a objetivos estratégicos de seleção e alocação simultâneos de recursos tecnológicos (projetos) de geração e armazenagem de energia ao longo do tempo para um SHER que deve satisfazer a uma demanda dinâmica. Os recursos podem corresponder a novas tecnologias (ainda não selecionadas) ou a tecnologias previamente existentes (já em operação) que podem sofrer ampliação. Como exemplos de tecnologias de geração susceptíveis à modelagem pode-se citar a eólica, a solar, a térmica (a diesel ou a gás natural) e a hídrica.

A principal tecnologia de armazenagem hoje empregada é a química por baterias. Mas outras são susceptíveis a modelagens tais como a armazenagem térmica a sal (energia solar concentrada) utilizada conjuntamente com a geração fotovoltaica [45], [46].

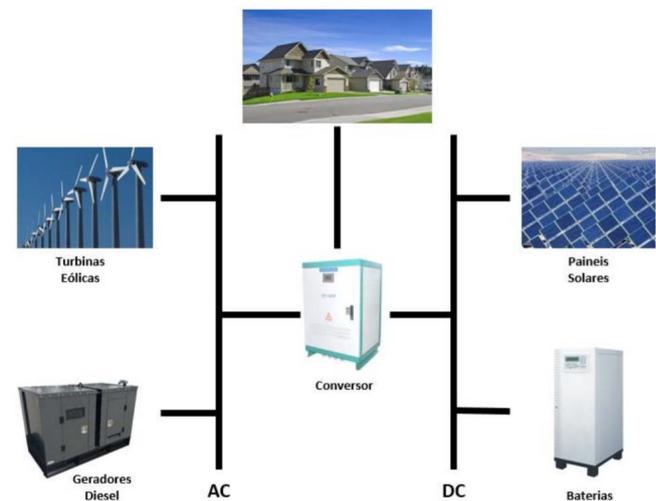


Fig. 1. Diagrama esquemático de um SHER.

O modelo pode ainda propor a desativação ou desmantelamento de tecnologias já empregadas ao longo do horizonte de planejamento. O modelo é multiobjetivo, composto por três critérios de otimização: (1) um técnico-econômico, considerando custos relevantes de instalação e operação; (2) um ambiental, considerando custos de emissão de GEE, e (3) um social, considerando ganhos econômicos com a operação da tecnologia. A formulação e descrição de cada componente do modelo é realizada a seguir.

C. Índices e Conjuntos

Os índices e respectivos conjuntos de dados utilizados no modelo são definidos a seguir.

- $t \in T$: período de planejamento
- $i \in I$: tecnologia de geração ou armazenagem de energia
- $a \in A \subset I$: tecnologia de armazenagem
- $j \in J$: projeto de ampliação do sistema

D. Dados de Entrada

A nomenclatura dos parâmetros e dados de entrada (*inputs*) do modelo é apresentada a seguir. Suas utilizações são descritas mais à frente nesta seção.

- T : horizonte de planejamento
- $P_{i,j}$: prazo de retorno do investimento (*payback*)
- D_t : demanda por potência
- $CAP_{i,0}$: capacidade inicial da tecnologia
- E_0 : carga inicial do subsistema de armazenagem
- $PRJ_{i,j}$: capacidade do projeto de ampliação
- $CI_{i,j,t}$: custo de instalação do projeto de ampliação
- $CO_{i,t}$: custo de operação por tecnologia
- $CD_{i,j,t}$: custo de desinstalação do subsistema

$CC_{i,t}$: custo de combustível por tecnologia
 $CE_{i,t}$: custo de emissão de GEE por tecnologia
 $GR_{i,t}$: ganho de riqueza na operação da tecnologia
 GEE_i : taxa de emissão de gás de efeito estufa (GEE)
 $\alpha_{i,t}$: ponderador do critério de desempenho téc.-econ.
 $\beta_{i,t}$: ponderador do critério de desempenho ambiental
 $\gamma_{i,t}$: ponderador do critério de desempenho social

E. Variáveis de Decisão Contínuas

As definições das variáveis de decisão contínuas a serem otimizadas são apresentadas a seguir e descritas mais à frente nesta seção.

$x_{i,t}$: potência gerada por tecnologia
 $CAP_{i,t}$: capacidade instalada por tecnologia
 E_t : energia armazenada no período

F. Variáveis de Decisão Binárias (0/1)

As variáveis de decisão inteiras binárias a serem otimizadas na resolução do modelo são definidas a seguir. Seus propósitos são descritos mais à frente nesta seção.

$y_{i,j,t}$: seleção de projeto para instalação
 $z_{i,j,t}$: seleção de subsistema para desinstalação

G. Função Objetivo

A função multiobjetivo a ser minimizada é composta por três critérios de decisão a saber: um técnico-econômico (C_1), um ambiental (C_2) e um social (C_3). Sua formulação é apresentada a seguir. O detalhamento de seu propósito é feito mais à frente nesta seção.

$$MIN CT = C_1 + C_2 - C_3 \quad (1)$$

$$C_1 = \sum_{i,j,t} \alpha_{i,t} \cdot (CI_{i,j,t} \cdot y_{i,j,t} + CO_{i,t} \cdot x_{i,t} + CC_{i,t} \cdot x_{i,t} + CD_{i,j,t} \cdot z_{i,j,t}) \quad (2)$$

$$C_2 = \sum_{i,t} \beta_{i,t} \cdot CE_{i,t} \cdot GEE_i \cdot x_{i,t} \quad (3)$$

$$C_3 = \sum_{i,t} \gamma_{i,t} \cdot GR_{i,t} \cdot x_{i,t} \quad (4)$$

H. Restrições

As formulações das restrições do modelo são apresentadas a seguir e descritas nesta seção.

$$\sum_i x_{i,t} \geq D_t \quad \forall t \quad (5)$$

$$x_{i,t} \leq CAP_{i,t} \quad \forall i, t \quad (6)$$

$$E_{t+1} = E_t + \sum_{i \in I \setminus A} x_{i,t} - D_t - \sum_a x_{a,t} \quad \forall t \quad (7)$$

$$\sum_a x_{a,t} \leq E_t \quad \forall t \quad (8)$$

$$E_t \leq \sum_a CAP_{a,t} \quad \forall t \quad (9)$$

$$CAP_{i,t+1} = CAP_{i,t} + \sum_j PRJ_{i,j} \cdot (y_{i,j,t} - z_{i,j,t}) \quad \forall i, t \quad (10)$$

$$\sum_t y_{i,j,t} \leq 1 \quad \forall i, j \quad (11)$$

$$\sum_t z_{i,j,t} \leq 1 \quad \forall i, j \quad (12)$$

$$z_{i,j,t} \leq \sum_{\tau}^{t-P_{i,j}} y_{i,j,\tau} \quad \forall i, j, t \quad (13)$$

$$z_{i,j,t} \in \{0; 1\}; y_{i,j,t} \in \{0; 1\} \quad \forall i, j, t \quad (14)$$

$$x_{i,t} \in \mathbb{R}^+; CAP_{i,t} \in \mathbb{R}^+; E_t \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i, t \quad (15)$$

I. Descrição das Componentes do Modelo Matemático

No modelo, a variável $x_{i,t}$ representa a potência gerada por cada fonte de energia ou tecnologia i no período t , assim como a potência gerada por tecnologias de armazenagem carregadas com os excedentes de energia E_t armazenados em períodos anteriores para uso no período atual.

Cada tecnologia tem uma capacidade instalada dada pela variável $CAP_{i,t}$ que evolui com o tempo pela inclusão ou exclusão de recursos tecnológicos (projetos).

Cada tecnologia i pode ter um ou mais projetos j associados a ela. As variáveis binárias $y_{i,j,t}$ e $z_{i,j,t}$ assumem valor 1 (um) quando o projeto j da tecnologia i é, respectivamente, selecionado para instalação ou desativado no período t , assumindo valor igual a 0 (zero) caso contrário.

A função objetivo (1) a ser minimizada possui três componentes. A componente C_1 dada em (2) corresponde ao critério técnico-econômico e considera os custos de instalação, de operação e manutenção, de combustível (caso fóssil) e de desinstalação das tecnologias avaliadas ao longo do horizonte de planejamento T . Vale notar que os custos atuais dos subsistemas preexistentes ($t=0$) não são considerados por serem irrelevantes neste contexto de decisão.

A componente C_2 dada em (3) corresponde ao critério ambiental e considera os custos com as emissões equivalentes de gases de efeito estufa (GEE) por tecnologia. O custo de emissão total de cada tecnologia é calculado com base na respectiva taxa de emissão GEE_i e potência gerada. Vale notar que cada tipo de custo (instalação, operação, emissão, etc.) é representado por uma série temporal de valores calculados através da fórmula $PV_{\pi,t} = \sum_t^{P_{\pi}} FV_{\pi,t} \cdot (1 + r_{\pi,t})^{-t}$, onde $\pi = (i, j)$ ou $\pi = (i)$, dependendo do tipo de custo, $PV_{\pi,t}$ representa o valor presente (descontado) do custo calculado com base no

período t , $FV_{\pi,t}$ corresponde ao seu valor futuro calculado com base em t e $r_{\pi,t}$ é a taxa mínima de atratividade associada a cada tecnologia ou projeto e para o período.

A componente C_3 dada em (4) corresponde ao critério social e considera os ganhos de riqueza $GR_{i,t}$ auferidos pela economia local (emprego, renda, etc.) com a operação de diferentes tecnologias instaladas.

Os ponderadores $\alpha_{i,t}$, $\beta_{i,t}$ e $\gamma_{i,t}$ são escolhidos de acordo com a importância dada pelo tomador de decisão sobre cada uma das componentes da função-objetivo e tecnologias avaliadas, podendo assumir valores diferentes para cada período. Estes parâmetros podem assumir quaisquer valores, incluindo o valor 0 (zero), o que anula o efeito de um objetivo específico ou tecnologia para um dado objetivo.

As fórmulas (5) a (13) definem as restrições do modelo.

As inequações (5) estabelecem que a demanda total por período deve ser atendida integralmente, com a possibilidade de geração excedente de energia a ser armazenada e consumida nos períodos subsequentes pelos subsistemas (tecnologias) de armazenagem, caso já existam ou sejam também avaliados.

A geração de energia é limitada pelas inequações (6) que definem a potência máxima gerada por período para uma dada tecnologia, limitada por $CAP_{i,t}$.

As inequações (7) definem a energia total armazenada E_{t+1} no final do período t para uso em $t+1$, independente da tecnologia de geração. Representam equações de balanço de armazenagem de carga. Para cada período, o excedente produzido por todas as tecnologias de geração é somado a capacidade armazenada atual e deste total é subtraída a potência gerada pelas tecnologias de armazenagem para atender a demanda.

As inequações (8) limitam o uso da energia armazenada ao total disponível no período t .

Em (9), é definido o limite de armazenagem por período com base na capacidade total de armazenagem dada por todas as tecnologias de armazenagem empregadas no período t .

As inequações (10) definem a capacidade agregada de cada tecnologia em $t+1$ com base na capacidade adquirida até o período t e nos projetos selecionados ou em operação neste período.

As inequações (11) e (12) estabelecem respectivamente que a seleção (ativação) e desativação (desmobilização) de cada projeto pode ocorrer apenas uma vez dentro do horizonte de planejamento.

As inequações (13) definem que um projeto somente poderá ser desativado se tiver sido selecionado em algum momento $\tau < t$, respeitando-se o prazo de retorno do investimento (ou fim da concessão, o que for menor).

As inequações (14) e (15) definem o domínio de valores das variáveis de decisão.

Algumas observações merecem ser feitas sobre o modelo proposto:

- 1) Por vezes, a depender do contexto, os termos ‘recurso’, ‘projeto’, ‘tecnologia’ e ‘subsistema’ são utilizados indistintamente.
- 2) O período no qual o projeto de ampliação é selecionado

representa o momento onde o projeto entra em operação. O período no qual o subsistema é selecionado para desativação representa o momento onde o(s) recurso(s) deixa(m) de operar.

- 3) Os ‘vínculos temporais’ necessários à evolução do sistema ao longo do tempo do instante $t=0$ até $t=H$ são feitos através das inequações de transferência de carga (7) e de capacidade instalada (10). A carga líquida acumulada até o período t é transferida para o período seguinte ficando disponível para uso naquele período e assim por diante até $t=H$. O mesmo mecanismo opera para a capacidade instalada do sistema. Na medida que projetos são ativados, a capacidade instalada aumenta ficando disponível para uso nos períodos subsequentes até $t=H$.
- 4) Restrições complementares podem ser facilmente inseridas no modelo para considerar, por exemplo, a inclusão conjunta de tecnologias quando elas forem mutuamente inclusivas, tais como a inclusão simultânea de tecnologias renováveis intermitentes e de armazenagem; ou ainda projetos de geração e transmissão conjuntos.
- 5) Restrições exclusivas também podem ser inseridas para que o modelo não selecione simultaneamente determinadas tecnologias consideradas mutuamente excludentes.
- 6) Com relação à desinstalação, pode-se modelar para que alguns projetos sejam simultaneamente desativados por formarem subsistemas que, devido a aspectos técnicos, devam ser desativados conjuntamente.
- 7) As variáveis de decisão contínuas podem assumir valores mínimos, tais como, por exemplo, a determinação de geração mínima de potência uma vez acionado o(s) subsistema(s) ou tecnologia(s) para atendimento da demanda.
- 8) O modelo pode ser facilmente alterado para considerar além de geração de energia elétrica também tecnologias de geração de calor.
- 9) Em princípio, as unidades de medida de energia consideradas podem ser o Watt ou Watt-hora por período para todas as tecnologias, incluindo-se aí as de armazenagem.
- 10) Os custos e os ganhos de riqueza são definidos em unidades monetárias por unidade de energia (ex. $\$/kW$) e podem ser representados em diferentes moedas desde que se incluam as conversões entre elas.
- 11) Assume-se que as eficiências de carga e descarga das diferentes tecnologias de armazenagem, assim como os rendimentos dos recursos de geração estão considerados nas respectivas capacidades de projeto $PRJ_{i,j}$.
- 12) Assume-se $P_{i,j} \leq T$.
- 13) Para determinadas simulações, o parâmetro $P_{i,j}$ pode ser convenientemente substituído por $VU_{i,j}$ correspondendo ao tempo de vida útil do subsistema, com $VU_{i,j} \leq T$.
- 14) O custo total real CTR para comparação de diferentes cenários é obtido pelo expurgo dos ponderadores de cada

uma das componentes da função CT após o processo de otimização.

J. Considerações Quanto a Escolha dos Valores dos Ponderadores dos Critérios de Desempenho

Os valores dos ponderadores dos critérios de desempenho ($\alpha_{i,t}$, $\beta_{i,t}$ e $\gamma_{i,t}$) são determinados pela influência de diferentes fatores, tais como crescimento da força de trabalho, nível de desenvolvimento econômico regional e nacional, políticas de estímulo a tecnologias limpas, facilidade de implementação da tecnologia, impacto no meio ambiente, custo social, dentre muitos outros. Portanto, seus valores são estabelecidos dentro de um processo mais amplo e complexo de decisão multicritério dentro do qual o modelo proposto se insere.

Wang *et al.* [47] apresentam um fluxograma geral para o processo iterativo de decisão multicritério dentro do qual os valores dos ponderadores de diferentes critérios de sustentabilidade são determinados. Os autores apresentam também diferentes métodos de ponderação.

Um exemplo da aplicação de métodos multicritério para seleção de tecnologias renováveis e eficientes na construção civil Brasileira é apresentado por Melo *et al.* [48].

A determinação ou proposição de valores para os ponderadores $\alpha_{i,t}$, $\beta_{i,t}$ e $\gamma_{i,t}$ vai muito além dos objetivos deste artigo.

K. Contribuição do Modelo à Pesquisa de SHER

Como já mencionado anteriormente, o modelo de otimização proposto tem o objetivo de apoiar o tomador de decisão na avaliação de diferentes alternativas tecnológicas (projetos) de investimento para o dimensionamento, localização, instalação, operação e desmobilização de SHER de forma a atender simultaneamente (e explicitamente na função objetivo) critérios técnico-econômicos, ambientais e sociais. Tais critérios estão diretamente relacionados à proposição de SHER como sistemas sustentáveis. Esta vem a ser a principal contribuição desta pesquisa. A maior parte dos artigos analisados que usam métodos analíticos para modelagem de SHER priorizam um ou outro aspecto. Em alguns casos, dois aspectos são considerados. Mas nunca os três simultaneamente.

Além desta contribuição, outras podem ser citadas:

- 1) Apesar de simples, a estrutura matemática geral do modelo em PLIM é suficientemente abrangente para contemplar diferentes tipos de tecnologias tanto renováveis quanto não renováveis, que são escolhidas ou descartadas pelo processo de otimização através das variáveis binárias. Na maior parte dos estudos analisados, os modelos de SHER usam tecnologias pré-determinadas (fixas) e o que se avalia são configurações específicas de tais tecnologias escolhidas pelo tomador de decisão.
- 2) O modelo proposto é multiperíodo e considera explicitamente todo o ciclo de vida do SHER, permitindo ao planejador avaliar não somente a instalação e operação de (sub)sistemas ao longo do tempo, mas também o melhor momento para a desmobilização do(s) componente(s). Não foi

encontrado nenhum artigo onde esta abordagem fosse utilizada na modelagem de SHER.

- 3) Os ponderadores dos critérios de desempenho tornam o modelo mais versátil por permitir que o tomador de decisão determine a importância relativa das tecnologias avaliadas ao longo do tempo e com isto quais critérios de sustentabilidade são mais importantes para um determinado contexto de decisão. Esta abordagem permite a articulação progressiva das preferências do decisor ao longo do processo de análise. Não foi encontrado nenhum artigo relacionado a modelagem de otimização de SHER que utiliza esta abordagem.

IV. SIMULAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com o objetivo de avaliar a adequação do modelo, foram criados três cenários hipotéticos de simulação. Cada cenário priorizou um critério de desempenho específico em detrimento dos demais. A priorização se fez através da escolha do valor dos ponderadores $\alpha_{i,t}$, $\beta_{i,t}$ e $\gamma_{i,t}$. Nesta simulação, os ponderadores assumiram valores constantes independente da tecnologia ou período. O primeiro cenário priorizou o critério técnico-econômico, sendo o critério social o menos importante. No segundo, o critério ambiental recebeu maior prioridade e o técnico-econômico a menor. No terceiro, o critério social recebeu o maior peso. Os dados dos três ponderadores para cada um dos três cenários são apresentados na Tabela I. Os demais dados foram mantidos constantes para os três cenários.

Foram avaliadas conjuntamente cinco tecnologias (quatro de geração e uma de armazenagem), sendo que para cada uma delas foram definidos dois projetos de ampliação, totalizando 10 projetos. O horizonte de planejamento foi definido para 5 (cinco) anos. Para todas as tecnologias foram definidas capacidades iniciais. Para a tecnologia de armazenagem foi definida uma carga inicial.

TABELA I
PONDERADORES

Ponderador	Cenário1	Cenário2	Cenário3
α	0,80	0,05	0,05
β	0,15	0,80	0,15
γ	0,05	0,15	0,80

O modelo matemático em PLIM foi codificado no *software* GAMS (*General Algebraic Modeling Language*) v.24.2.3 e resolvido utilizando-se o *solver* GUROBI v.6.0.2 em uma máquina *Intel Core* i5 de 2,4 GHz. GAMS [49] é um sistema de modelagem de alto nível concebido primariamente para desenvolver e solucionar modelos em programação matemática através da integração com *solvers*, tais como o GUROBI que implementa algoritmos *Branch-and-Cut* e *Simplex* para a resolução de PLIM [50].

A solução ótima do modelo para cada cenário foi obtida em 0,01 segundos com 30 iterações *Simplex*.

O modelo completo codificado em GAMS assim como os dados desta simulação estão disponíveis para download no

endereço [51].

As potências geradas (e correspondentes demandas por período) e os projetos selecionados para o Cenário 1 são apresentados, respectivamente, nas Tabelas II e III. A Tabela IV apresenta as estimativas dos custos reais para os três cenários.

A evolução da capacidade instalada em cada um dos cenários no horizonte de cinco anos é apresentada em Fig. 2.

Os demais resultados estão disponíveis no mesmo endereço dos dados de simulação.

TABELA II
POTÊNCIAS GERADAS (kW) – CENÁRIO1

Tecnologia	Ano1	Ano2	Ano3	Ano4	Ano5
1					220,55
2	0	0	0	0	0
3	1226	2200	1356	2200	2200
4		986		742,66	1900
5		40		13,34	4,45
Demandas	1226	3226	1356	2956	4325

O que ficou evidenciado nesta simulação é que os valores escolhidos para os ponderadores tiveram influência direta na seleção dos projetos, na determinação das potências geradas, no valor de cada critério de otimização e no valor final da função objetivo. Assim, a depender da priorização ou importância relativa de cada objetivo almejado pelo tomador de decisão, diferentes configurações SHER podem ser obtidas pela alteração dos ponderadores, mantendo-se os demais dados constantes.

TABELA III
PROJETOS SELECIONADOS – CENÁRIO1

Tecnologia/Projeto	Ano1	Ano2	Ano5
3/1	Selecionado		
3/2		Selecionado	
4/1		Selecionado	
4/2			Selecionado

Nesta simulação, a tecnologia 2 (dois) de geração não foi selecionada para ser utilizada devido a soma de seus custos de operação e combustível serem mais altos que as demais tecnologias.

A tecnologia 5 (cinco) de armazenagem foi selecionada em três períodos para suprir déficits de potência das demais tecnologias em uso. Para atender a demanda com perfil crescente, foram selecionados os dois projetos de duas tecnologias com a menor relação entre o custo de instalação e a capacidade disponível de projeto. Não houve desinstalação de nenhum subsistema ao longo do horizonte simulado. Isto devido principalmente à tendência de crescimento da demanda.

Resultados distintos foram obtidos para os demais cenários no que se refere a seleção de tecnologias, projetos, potências geradas e uso da tecnologia de armazenagem.

Em Fig. 2, a seleção antecipada e o uso pleno da tecnologia

menos poluidora no Cenário 2 elevou a capacidade total do sistema além da demanda de cada período. As capacidades instaladas preexistentes das demais tecnologias mais poluidoras foram usadas apenas para cobrir o déficit de capacidade da tecnologia menos poluidora. Nos demais cenários, devido ao valor dos ponderadores, a seleção não se concentrou na tecnologia menos poluidora e a capacidade preexistente foi mais utilizada.

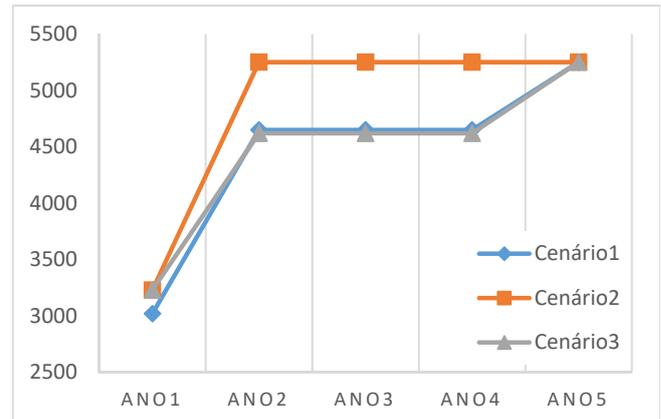


Fig. 2. Capacidade instalada (kW) ao longo do tempo para os três cenários avaliados.

A comparação dos custos da Tabela IV demonstrou que uma maior ponderação (importância) de aspectos ambientais (C2) e sociais (C3) nos Cenários 2 e 3, relativamente ao aspecto econômico (Cenário 1), resultou em custos totais maiores pelo aumento da componente C1 em uma proporção maior que a redução da componente C2 e aumento da componente C3.

Os resultados obtidos comprovaram ser o modelo adequado para assistir o tomador de decisão no planejamento estratégico de recursos energéticos em diferentes contextos.

TABELA IV
CUSTOS REAIS (MIL R\$)

Custos	Cenário1	Cenário2	Cenário3
Téc. Econômico (C1)	85.167,26	96.187,57	95.282,20
Ambiental (C2)	56.557,52	47.578,21	47.688,21
Social (C3)	2.791,84	3.320,08	3.294,82
Total (CTR)	138.932,95	140.445,70	139.675,59

V. CONCLUSÃO

Neste artigo apresentamos uma proposta de modelo matemático multiobjetivo desenvolvido em programação inteira mista (PLIM) para o planejamento estratégico de sistemas híbridos de energia renovável (SHER), objetivando atender a critérios de desempenho sustentáveis durante o processo de seleção e dimensionamento das componentes do sistema.

O modelo foi concebido para avaliar conjuntamente tecnologias de geração e armazenagem de energia. Apesar de simples, sua estrutura matemática geral é suficientemente abrangente para contemplar diferentes tipos de tecnologias

tanto renováveis quanto não renováveis.

Crerios tcnico-econmicos, ambientais e sociais so explicitamente modelados para serem otimizados simultaneamente.

O modelo e multiperodo, permitindo avaliar completamente a evoluo das componentes do SHER ao longo de suas vidas uteis ou horizonte de planejamento.

Nenhum modelo de otimizao de SHER foi encontrado na literatura acadmica apresentando estas caractersticas.

A importncia relativa de cada critrio e definida atravs de ponderadores relacionados a tecnologia disponvel em cada perodo. So feitas consideraes quanto aos mtodos de determinao dos valores dos ponderadores.

A adequao do modelo foi testada atravs de trs cenrios hipotticos considerando diferentes valores dos ponderadores. Os resultados demonstram ser o modelo adequado para apoiar o analista e o tomador de deciso no processo de planejamento e dimensionamento de SHER em diferentes contextos de deciso.

Os autores acreditam que modelos matemticos de otimizao representam uma alternativa bastante competitiva aos modelos econmicos de avaliao de SHER que no buscam por solues otimizadas.

Aplicaes do modelo a problemas reais de planejamento estratgico de SHER esto sendo avaliadas.

Como proposies para pesquisas futuras pode-se citar: (1) a adequao do modelo a Teoria Moderna de Carteiras para apoiar o analista de planejamento de recursos energticos na anlise de alternativas de investimento em condies de risco; (2) a modelagem do custo de carregamento da capacidade ociosa; (3) a proposio de um mtodo para a determinao dos valores dos ponderadores dos critrios de desempenho; (4) a utilizao do modelo para a seleo combinada de tecnologias de gerao em concordncia com a Poltica Energtica Nacional em vigor.

REFERNCIAS

- [1] S. K. A. Shezan, N. Das, H. Mahmudul, "Techno-economic Analysis of a Smart-grid Hybrid Renewable Energy System for Brisbane of Australia," *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 340–345, 2017.
- [2] S. Bahramara, M. P. Moghaddam, M. R. Haghifam, "Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 609–620, 2016.
- [3] Y. Sawle, S. C. Gupta, A. K. Bohre, "Socio-techno-economic design of hybrid renewable energy system using optimization techniques," *Renew. Energy*, vol. 119, pp. 459–472, 2018.
- [4] A. Haghghat Mamaghani, S. A. Avella Escandon, B. Najafi, A. Shirazi, F. Rinaldi, "Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia," *Renew. Energy*, vol. 97, pp. 293–305, 2016.
- [5] S. K. A. Shezan, N. Das, H. Mahmudul, "Techno-economic Analysis of a Smart-grid Hybrid Renewable Energy System for Brisbane of Australia," *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 340–345, 2017.
- [6] S. Upadhyay, M. P. Sharma, "A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 47–63, 2014.
- [7] A. H. Fathima, K. Palanisamy, "Optimization in microgrids with hybrid energy systems - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 431–446, 2015.
- [8] R. Luna-Rubio, M. Trejo-Perea, D. Vargas-Vázquez, G. J. Ríos Moreno, "Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 4, pp. 1077–1088, 2012.
- [9] Y. Sawle, S. C. Gupta, A. K. Bohre, "Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. May 2017, pp. 2217–2235, 2018.
- [10] S. Upadhyay, M. P. Sharma, "A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 47–63, 2014.
- [11] A. H. Fathima, K. Palanisamy, "Optimization in microgrids with hybrid energy systems - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 431–446, 2015.
- [12] V. Khare, S. Nema, P. Baredar, "Solar-wind hybrid renewable energy system: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 23–33, 2016.
- [13] Y. Sawle, S. C. Gupta, A. K. Bohre, "Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. May 2017, pp. 2217–2235, 2018.
- [14] B. Bhandari, K.-T. Lee, G.-Y. Lee, Y.-M. Cho, S.-H. Ahn, "Optimization of hybrid renewable energy power systems: a review," *Int. Journal Prec. Eng. And Manf. Green Tech.*, vol. 2, no. 1, pp. 99–112, 2015.
- [15] A. H. Fathima, K. Palanisamy, "Optimization in microgrids with hybrid energy systems - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 431–446, 2015.
- [16] S. Upadhyay, M. P. Sharma, "A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 47–63, 2014.
- [17] C. Gamarra, J. M. Guerrero, "Computational optimization techniques applied to microgrids planning: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 413–424, 2015.
- [18] A. Ahmad Khan, M. Naeem, M. Iqbal, S. Qaisar, A. Anpalagan, "A compendium of optimization objectives, constraints, tools and algorithms for energy management in microgrids," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1664–1683, 2016.
- [19] M. Sameti, F. Haghghat, "Optimization approaches in district heating and cooling thermal network," *Energy and Buildings*, vol. 140, pp. 121–130, 2017.
- [20] C. L. Lara, D. S. Mallapragada, D. J. Papageorgiou, A. Venkatesh, I. E. Grossmann, "Deterministic electric power infrastructure planning: mixed-integer programming model and nested decomposition algorithm," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 271, pp. 1037–1054, 2018.
- [21] J. J. Roberts, A. M. Cassula, J. L. Silveira, E. C. Bortoni, A. Z. Mendiburu, "Robust multi-objective optimization of a renewable based hybrid power system," *Appl. Energy*, vol. 223, pp. 52–68, 2018.
- [22] L. Ferrer-Martí, B. Domenech, A. García-Villoria, R. Pastor, "A MILP model to design hybrid wind-photovoltaic isolated rural electrification projects in developing countries," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 226, no. 2, pp. 293–300, 2013.
- [23] E. D. Mehleri, H. Sarimveis, N. C. Markatos, L. G. Papageorgiou, "A mathematical programming approach for optimal design of distributed energy systems at the neighbourhood level," *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 96–104, 2012.
- [24] S. Bracco, G. Dentici, S. Siri, "Economic and environmental optimization model for the design and the operation of a combined heat and power distributed generation system in an urban area," *Energy*, vol. 55, pp. 1014–1024, 2013.
- [25] S. Bracco, G. Dentici, S. Siri, "DESOD : a mathematical programming tool to optimally design a distributed energy system," *Energy*, vol. 100, pp. 298–309, 2016.
- [26] H. Ren, W. Gao, "A MILP model for integrated plan and evaluation of distributed energy systems," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 3, pp. 1001–1014, 2010.
- [27] L. A. Steinle Camargo, D. Soares Ramos, E. Guarnier, S. Ishida, E. Matsudo, "Alternative Generation Sources Portfolio: Optimal Resources Allocation and Risk Analysis Supported by Genetics Algorithms," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 7, pp. 3232–3241, 2016.
- [28] D. Pinheiro Neto, E. G. Domingues, A. P. Coimbra, A. T. Almeida, A. J. Alves, W. P. Calixto, "Portfolio optimization of renewable energy assets: hydro, wind, and photovoltaic energy in the regulated market in Brazil," *Energy Economics*, vol. 64, pp. 238–250, 2017.
- [29] M. J. Khan, A. K. Yadav, L. Mathew, "Techno economic feasibility analysis of different combinations of PV-Wind-Diesel-Battery hybrid system for telecommunication applications in different cities of Punjab, India," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 577–607, 2017.
- [30] R. Luna-Rubio, M. Trejo-Perea, D. Vargas-Vázquez, G. J. Ríos Moreno, "Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 4, pp. 1077–1088, 2012.

- [31] H. Yang, Z. Wei, L. Chengzhi, "Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 2, pp. 163–169, 2009.
- [32] O. Ayadi, I. Alsalhen, "Techno-Economic Assessment of Concentrating Solar Power and Wind Hybridization in Jordan," *J. Ecol. Eng.*, vol. 19, no. 2, pp. 16–23, 2018.
- [33] M. Hossain, S. Mekhilef, L. Olatomiwa, "Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea, Malaysia," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 28, pp. 358–366, 2017.
- [34] M. H. Amrollahi, S. M. T. Bathaee, "Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response," *Appl. Energy*, vol. 202, pp. 66–77, 2017.
- [35] H. Belmili, M. Haddadi, S. Bacha, M. F. Almi, B. Bendib, "Sizing stand-alone photovoltaic-wind hybrid system: Techno-economic analysis and optimization," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 821–832, 2014.
- [36] K. Abdelhamid, I. Rachid, "Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system," *Solar Energy*, vol. 103, pp. 171–82, 2014.
- [37] R. Dufo-López, I. R. Cristóbal-Monreal, J. M. Yusta, "Optimisation of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems to minimise cost and maximise human development index and job creation," *Renew. Energy*, vol. 94, pp. 280–293, 2016.
- [38] C. Marcelino, M. Baumann, P. Almeida, E. Wanner, M. Weil, "A new model for optimization of hybrid microgrids using an evolutive approach," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 3, pp. 799–805, 2018.
- [39] L. W. Oliveira, T. C. J. Maria, "Planning for renewable generation in distribution systems considering daily operating periods," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 5, pp. 901–907, 2017.
- [40] M. F. Gómez, A. Téllez, S. Silveira, "Exploring the effect of subsidies on small-scale renewable energy solutions in the Brazilian Amazon," *Renew. Energy*, vol. 83, pp. 1200–1214, 2015.
- [41] L. Cameron, B. Van Der Zwaan, "Employment factors for wind and solar energy technologies: A literature review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 160–172, 2015.
- [42] S. Upadhyay, M. P. Sharma, "A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 47–63, 2014.
- [43] R. Dufo-López, I. R. Cristóbal-Monreal, J. M. Yusta, "Optimisation of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems to minimise cost and maximise human development index and job creation," *Renew. Energy*, vol. 94, pp. 280–293, 2016.
- [44] Y. Sawle, S. C. Gupta, A. K. Bohre, "Socio-techno-economic design of hybrid renewable energy system using optimization techniques," *Renew. Energy*, vol. 119, pp. 459–472, 2018.
- [45] X. Ju, C. Xu, Y. Hu, X. Han, G. Wei, X. Du, "A review on the development of photovoltaic/concentrated solar power (PV-CSP) hybrid systems," *Solar Energy Mat. & Solar Cells*, vol. 161, pp. 305–327, 2017.
- [46] M. T. Islam, N. Huda, A. B. Abdullah, R. Saidur, "A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: current status and research trends," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, pp. 987–1018, 2018.
- [47] J.-J. Wang, Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang, J.-H. Zhao, "Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, pp. 2263–2278, 2009.
- [48] C. A. Melo, G. M. Jannuzzi, A. F. Tripodi, "Evaluating public policy mechanisms for climate change mitigation in Brazilian buildings sector," *Energy Policy*, vol. 61, pp. 1200–1211, 2013.
- [49] A. Ahmad Khan, M. Naeem, M. Iqbal, S. Qaisar, A. Anpalagan, "A compendium of optimization objectives, constraints, tools and algorithms for energy management in microgrids," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1664–1683, 2016.
- [50] GUROBI Optimizer Reference Guide version 6.0.2, GUROBI Optimization LLC., Beaverton, OR, USA, 2016.
- [51] www.researchgate.net, "IEEE Cenários GAMS", 2018 [Online] Disponível: <https://www.researchgate.net/publication/329239788> IEEE Cenários GAMS



Econômica.

M. T. Pereira (S'07–M'18) Formado em Engenharia de Produção Mecânica pela Escola de Engenharia de São Carlos da USP. Mestre em Engenharia de Sistemas Logísticos pela Escola Politécnica da USP e Doutorando em Engenharia de Produção pela Escola de Engenharia de São Carlos na área de Pesquisa Operacional aplicada a Gestão de Operações e Engenharia



Excelência Energética Consultoria e Presidente do Comitê de Energia da Amcham.

E. E. Rego é formado em Engenharia de Produção pela Escola Politécnica-USP, Bacharelado em Ciências Econômicas pela FEA-USP, Mestrado em energia e Doutorado em ciências pelo IEE-USP e Universidade de Illinois (Estados Unidos). É professor Doutor do departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica da USP, Sócio-Diretor da



M. S. Nagano é Engenheiro Mecânico-mecatrônica, Mestre e Doutor em Engenharia Mecânica pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Pós-doutor em Matemática e Computação Aplicada pelo Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atualmente é Pesquisador e Bolsista de Produtividade e Pesquisa do CNPq. Pesquisador nas diversas áreas da Pesquisa Operacional aplicada aos Sistemas de Produção, Gestão do Conhecimento, Inovação e Empreendedorismo. É professor dos programas de Graduação e Pós-graduação em Engenharia de Produção da Escola de Engenharia de São Carlos da USP.