

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA

DIERLI MAIARA DA ROSA MASCHIO

**PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE EM GERAÇÃO DE ENERGIA
FOTOVOLTAICA USANDO REDES DE PETRI ESTOCÁSTICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

PATO BRANCO

2018

DIERLI MAIARA DA ROSA MASCHIO

**PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE EM GERAÇÃO DE ENERGIA
FOTOVOLTAICA USANDO REDES DE PETRI ESTOCÁSTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso II de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso Superior de Engenharia de Computação do - DAINF - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de "Engenheiro de Computação".

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Teixeira

PATO BRANCO

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

Às 17 horas e 30 minutos do dia 10 de dezembro de 2018, na sala V008, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, reuniu-se a banca examinadora composta pelos professores Marcelo Teixeira (orientador), Bruno Cesar Ribas e Jean Patric da Costa para avaliar o trabalho de conclusão de curso com o título Planejamento de capacidade em geração de energia fotovoltaica usando Redes de Petri Estocásticas, da aluna **Dierli Maiara da Rosa Maschio**, matrícula 01271229, do curso de Engenharia de Computação. Após a apresentação a candidata foi arguida pela banca examinadora. Em seguida foi realizada a deliberação pela banca examinadora que considerou o trabalho aprovado.

Prof. Marcelo Teixeira
Orientador (UTFPR)

Prof. Bruno Cesar Ribas
(UTFPR)

Prof. Jean Patric da Costa
(UTFPR)

Profa. Beatriz Terezinha Borsoi
Coordenador de TCC

Prof. Pablo Gauterio Cavalcanti
Coordenador do Curso de
Engenharia de Computação

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho à meus pais que sempre me apoiaram e não pouparam esforços para que a conclusão desse curso fosse possível, à minha irmã que tem um carinhoso apelido de pepininho, ao meu namorado que contribuiu muito com a minha evolução acadêmica, sempre me incentivando e estando ao meu lado em todos os momentos. Às minhas amigas que sempre estiveram me apoiando, sorrindo e chorando comigo, vocês são demais! Com todo carinho dedico esse esforço a vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, à família, e as pessoas que sempre estiveram ao meu lado, e ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Teixeira que sempre foi atencioso e acreditou na minha capacidade, obrigado!

Não conspira quem nada ambiciona.

Sófocles.

RESUMO

MASCHIO, Dierli Maiara da Rosa. PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE EM GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA USANDO REDES DE PETRI ESTOCÁSTICAS. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso II – Departamento Acadêmico de Informática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Mecanismos de planejamento de capacidade são fundamentais para a geração alternativa de energia elétrica. Em particular na geração de energia solar, usando painéis fotovoltaicos, esse interesse é bastante evidente. Sem eles, toda a infraestrutura precisa ser construída e testada para que só então se dimensione o real potencial de geração. Além de financeiramente custosa, essa abordagem também consome tempo de implantação e se mostra inflexível para a reconfiguração e teste de diferentes cenários de produção. Esse trabalho propõe um modelo em redes de Petri que captura as variabilidades de geração e serve ao planejamento de capacidade na geração de energia solar fotovoltaica. Será mostrado que, a partir da calibragem de um modelo para um único gerador, é possível simular e estimar os impactos disso no potencial de geração como um todo. A partir dessa abordagem, múltiplos cenários podem ser reconfigurados, simulados e analisados em um curto espaço de tempo, o que tende a ser valioso sob o ponto de vista de planejamento preditivo.

Palavras-chave: Energia Solar, Redes de Petri, Planejamento

ABSTRACT

MASCHIO, Dierli Maiara da Rosa. CAPACITY PLANNING IN ENERGY GENERATION PHOTOVOLTAICS USING STOCHASTIC PETRI NETWORKS. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso II – Departamento Acadêmico de Informática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Capacity planning mechanisms are fundamental for the alternative generation of electric energy. In particular in the generation of solar energy, using photovoltaic panels, this interest is quite evident. Without them, the entire infrastructure needs to be built and tested so that only the real potential of generation can be dimensioned. In addition to being financially costly, this approach also consumes deployment time and is inflexible for the reconfiguration and testing of different production scenarios. This work proposes a model in Petri nets that captures the variability of generation and serves the planning of capacity in the generation of photovoltaic solar energy. It will be shown that, from the calibration of a model to a single generator, it is possible to simulate and estimate the impacts of this on the generation potential as a whole. From this approach, multiple scenarios can be reconfigured, simulated and analyzed in a short time, which tends to be valuable from a predictive planning perspective.

Keywords: Solar Energy, Petri Nets, Planning

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Célula Fotovoltaica.	17
FIGURA 2	– Constituição de um painel solar.	18
FIGURA 3	– Processo de produção de energia solar fotovoltaica em uma residência.	19
FIGURA 4	– Rede de Petri simples.	21
FIGURA 5	– Modelo do painel solar.	32
FIGURA 6	– Modelo de geração de energia solar, com armazenamento, consumo interno e rede externa.	32
FIGURA 7	– Condições impostas nos arcos.	33
FIGURA 8	– Irradiação solar no dia 03/01/2018.	35
FIGURA 9	– Irradiação solar no dia 08/06/2018.	35
FIGURA 10	– Painel Solar com potência de 280 Watts, conforme a irradiação do dia 03/01/2018	36
FIGURA 11	– Painel Solar com potência de 355 Watts, conforme a irradiação do dia 03/01/2018.	36
FIGURA 12	– Painel Solar com potência de 280 Watts, conforme a irradiação do dia 03/01/2018.	37
FIGURA 13	– Painel Solar com potência de 355 Watts, conforme a irradiação do dia 08/06/2018.	37
FIGURA 14	– Resultados obtidos com as simulações referente ao dia 03/01/2018.	39
FIGURA 15	– Resultados obtidos com as simulações referente ao dia 08/06/2018.	39
FIGURA 16	– Primeira comparação para o dia 03/01.	40
FIGURA 17	– Segunda comparação para o dia 03/01.	40
FIGURA 18	– Primeira comparação para o dia 08/06.	40
FIGURA 19	– Segunda comparação para o dia 08/06.	40
FIGURA 20	– Expectativa estimada no lugar <i>Lbb</i> , utilizando dados do dia 03/01.	42
FIGURA 21	– Tempo de espera no lugar <i>Lbb</i> , utilizando os valores do dia 03/01	42
FIGURA 22	– Expectativa estimada no lugar <i>Lb</i> , utilizando dados do dia 08/06.	42
FIGURA 23	– Tempo de espera no lugar <i>Lb</i> , utilizando os valores do dia 08/06.	42
FIGURA 24	– Taxa de transferência do lugar <i>Lt</i> , utilizando os valores do dia 03/01/2018.	44
FIGURA 25	– Taxa de transferência do lugar <i>Lt</i> , utilizando os valores do dia 08/06/2018.	44
FIGURA 26	– Taxa de transferência do lugar <i>Lr</i> , utilizando os valores do dia 03/01.	45
FIGURA 27	– Taxa de transferência do lugar <i>Lr</i> , utilizando os valores do dia 08/06.	45
FIGURA 28	– Tempo de espera do lugar <i>Lr</i> , utilizando os valores do dia 03/01.	46
FIGURA 29	– Tempo de espera do lugar <i>Lr</i> , utilizando os valores do dia 08/06.	46
FIGURA 30	– Modelo com 3 geradores.	47
FIGURA 31	– Tempo de espera no lugar <i>Lb</i> , utilizando os valores do dia 03/01.	48
FIGURA 32	– Tempo de espera no lugar <i>Lt</i> , utilizando os valores do dia 08/06.	48

FIGURA 33 – Taxa de transferência do lugar Lt , utilizando os valores do dia 03/01.	48
FIGURA 34 – Taxa de transferência do lugar Lt , utilizando os valores do dia 08/06.	48
FIGURA 35 – Taxa de transferência do lugar Lr , utilizando os valores do dia 03/01/2018.	49
FIGURA 36 – Taxa de transferência do lugar Lr , utilizando os valores do dia 08/06/2018.	49

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	–	Valores de irradiação.	35
TABELA 2	–	Valores de irradiação e seus respectivos <i>delays</i>	38
TABELA 3	–	Estimativas.	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 ENERGIA SOLAR	16
2.1.1 Funcionamento da geração de energia solar fotovoltaica	17
2.2 REDES DE PETRI	20
2.2.1 Redes de petri Estendidas	22
2.3 SOFTWARE	24
2.3.1 Trabalhos relacionados	25
3 PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE EM GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTVOLTAICA	27
3.1 ETAPAS DE PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE	28
3.2 CARACTERIZAÇÃO DE MODELOS DE PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE	29
3.3 PARAMETRIZAÇÕES E MÉTRICAS DE INTERESSE	30
3.4 MODELAGEM DE UM GERADOR GENÉRICO DE ENERGIA SOLAR	31
3.5 APLICAÇÃO DO MODELO GENÉRICO	34
3.5.1 Irradiação	34
3.5.2 Painel Solar	36
4 SIMULAÇÃO	38
4.1 EXPERIMENTOS	39
4.2 ANÁLISES	41
4.2.0.1 Aplicação 1: Baterias	41
4.2.1 Aplicação 2: Rede Externa	44
4.2.2 Aplicação 3: Quantidade de geradores	46
5 CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Um dos fundamentos da sustentabilidade econômica de qualquer país é a sua capacidade de prover logística e energia para o desenvolvimento de sua produção, através da elaboração de um bom planejamento energético, com segurança e em condições competitivas e ambientalmente sustentáveis (TOLMASQUIM, 2012). No entanto, esse planejamento tem desafiado os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia a acompanhar e sustentar o crescimento exponencial da demanda desse tipo de recurso, pois é rápida a evolução de equipamentos e indústrias tanto em termos de tecnologias quanto de dimensões físicas.

Com a finalidade de suprir essa demanda juntamente com a preocupação em ser sustentável, a busca pela geração de energia através de fontes renováveis tem crescido continuamente. Estudos apontam para investimentos substanciais no setor, aplicados principalmente no desenvolvimento de fontes alternativas de geração, como a implantação de sistemas de energia eólica e solar fotovoltaica (EPE, 2018). Estima-se que estas ações possam complementar o atual modelo de geração, centrado em usinas hidrelétricas no Brasil principalmente e, assim, complementar o sistema de geração de energia elétrica mundial.

Dentre as possíveis formas alternativas de geração de energia, podem ser citadas as fontes renováveis, que compõem uma maneira eficaz e ecologicamente sustentável de produzir energia. Geração eólica e solar, por exemplo, representam esse tipo de energia já que provêm de fontes ilimitadas de recursos, como o sol e o vento. A energia eólica, utiliza a energia cinética que existe na movimentação de dispositivos (turbina eólica) com o vento, que convertem o movimento (energia mecânica) para o gerador produzir energia elétrica. Já a energia solar, é dividida em dois tipos: térmica, por aquecimento de água; e fotovoltaica. Ambas se utilizam da incidência solar sobre painéis.

Energia cinética é um tipo de energia que está relacionada com o movimento

dos corpos. O resultado da energia cinética está intrinsecamente ligado ao valor da massa do objeto e a sua velocidade de movimento.

De interesse particular desse trabalho, estão os painéis solares. Um painel é caracterizado por receber raios solares e convertê-los em energia elétrica através dos efeitos da irradiação (calor e luz) sobre o material semicondutor do painel (ANEEL, 2002). Eles geram grande parte da energia elétrica, conforme sua respectiva potência, durante o dia e uma quantidade intermitente em dias nublados e durante a noite, mas, em contrapartida, apresentam grandes vantagens como baixa manutenção, fácil manuseio e, principalmente, eles operam em função de um recurso ilimitado, que é o sol.

Um dos desafios da geração de energia em larga escala via painéis é que não se conhece, a priori, a relação entre demanda e consumo, ponderada pelas possíveis interferências externas e imprevisíveis no esquema de geração, como o clima ou até mesmo a falha desses painéis. As referências técnicas (manuais) fornecem, em geral, dados sobre potência e porcentagem da eficiência de cada painel, o que é medido pela proporção de irradiação solar incidente sobre a superfície da célula que é convertida em energia elétrica. No entanto, essa documentação não infere sobre o desempenho do sistema de geração como um todo, composto em geral por múltiplas células paralelas, tampouco sobre suas inúmeras inter e intra relações.

Quando as estimativas dessa natureza não estão disponíveis em fase de projeto, o sistema precisa ser desenvolvido, implantado e então medido para que se constate seu grau de desempenho de geração sob diferentes condições de operação. Essa abordagem pode ser custosa em termos de tempo e recursos, uma vez que requer a construção de toda a infraestrutura física para suportar a medição do sistema de geração.

Alternativamente, o comportamento dinâmico de geradores fotovoltaicos pode ser representado, com certo nível de abstração, por um modelo de simulação. Em tese, essa abordagem tende a viabilizar o planejamento de capacidade de sistemas dinâmicos, pois permite representar o comportamento de um sistema, como um conjunto de geradores fotovoltaicos, e extrair via modelo estimativas que possam antecipar como o sistema se comportaria perante variações nos parâmetros de operação.

Uma vez que um sistema de geração fotovoltaico é caracterizado por concorrência (por recursos), não-determinismo (variabilidade do ambiente), paralelismo (múltiplos geradores) e formação de fila (incidência solar, baterias, rede, etc.), então identifica-se um formalismo que pode ser útil para representar tais sistemas, que

são as Redes de Petri (RP) (MURATA, 1989). Uma rede de Petri incorpora uma fundamentação matemática, aliada a um interfaceamento gráfico, que permite que um sistema seja descrito formalmente por meio de um mecanismo intuitivo. A partir de um modelo em RP, diversos cenários podem ser descritos em um curto espaço de tempo e inúmeras propriedades podem ser verificadas ou estimadas.

Em particular, quando a natureza do problema é estocástica, uma extensão de RP surge como opção de modelagem: as redes de Petri estocásticas generalizadas (*Generalized Stochastic Petri Networks*) (GSPNs) (BALBO et al., 1994). Uma GSPN estende as redes de Petri ordinárias com a noção de tempo. Isso eleva o potencial de estimativas que podem ser obtidas, especialmente via simulação. Por exemplo, é possível estimar, aceitando uma pequena margem de erro, como um sistema se comporta sob determinadas condições de operação. Pode-se variar os parâmetros do modelo, estimar o impacto de uma dada configuração, reproduzir um conjunto numeroso de cenários e estimativas quase que instantaneamente, etc.

1.1 OBJETIVOS

Dentro do exposto o objetivo deste trabalho é construir um modelo de simulação em GSPN para o planejamento de capacidade de um sistema de geração de energia fotovoltaica. Esse modelo é alimentado e calibrado com parâmetros que caracterizam o sistema real. Então, o modelo é simulado sob condições adversas, que podem ser impostas ao sistema na geração de energia. Tais condições são implementadas por meio da variação de certos parâmetros, como incidência solar, taxa de geração, carregamento de bateria, etc.

Por fim, para cada configuração de cenário são coletadas estimativas que sugiram, com certo grau de precisão, aspectos de planejamento de capacidade e antecipem situações de geração, como estimativa média de produção, percentual de carregamento de baterias, injeção de energia na rede externa, etc.

O trabalho é validado a partir da comparação dos valores obtidos pelas simulações e o sistema real. Diante disso, o trabalho é constituído de 3 capítulos principais: referencial teórico em que explana-se o funcionamento da geração de energia solar fotovoltaica e as formalidades referentes as redes de Petri e sua extensão estocástica generalizadas. A seguir, etapas, caracterização, parametrizações e o modelo obtido para o planejamento e capacidade de geração solar fotovoltaica, e por fim, as simulações e análises

de cada configuração.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O cenário mundial de energia contempla dois tipos de fontes primárias para a produção de energia elétrica, a energia renovável e a energia não renovável. A energia renovável é caracterizada por fontes que a natureza repõem rapidamente ou até mesmo são infinitas, dentre elas a energia proveniente do sol, do vento e da água, sendo essas as principais fontes usadas atualmente. Já a energia não renovável utiliza fontes que podem se esgotar com o tempo, já que a sua produção é lenta comparada com a velocidade de uso delas. Derivados do petróleo e gás natural são fontes desse tipo.

No Brasil a energia oriunda de usinas e centrais hidrelétricas correspondem hoje a cerca de 64% da produção total (ELÉTRICA, 2018). Esse tipo de geração é mais utilizado devido ao grande potencial de água ainda disponível no país. Entretanto está diminuindo com o tempo, pois alguns valores ecológicos são ameaçados por esta forma de produção de energia já que a maioria das usinas e pequenas centrais hidrelétricas localizam-se em ecossistemas lóticos importantes (VALERO, 2012). A partir disso, a geração de energia solar desempenha um papel vital, dada a sua abundância de recursos de geração, contribuindo com o sistema de energia elétrica de maneira ecologicamente sustentável.

2.1 ENERGIA SOLAR

A energia solar é a energia renovável obtida pela luz do sol. Ela pode ser transformada em energia térmica ou elétrica e aplicada em diversos propósitos. As duas principais formas de aproveitamento da energia solar são a geração de energia elétrica e o aquecimento solar de água. Para a produção de energia elétrica são usados dois sistemas: o heliotérmico, em que a irradiação é convertida primeiramente em energia térmica e posteriormente em elétrica; e o fotovoltaico, em que a irradiação solar é convertida diretamente em energia elétrica.

A energia solar fotovoltaica é uma solução eficaz para aplicações industriais, comerciais e residenciais conectadas a rede elétrica ou com modo autônomo de operação. Fatores como eficiência, confiabilidade, custo e qualidade de energia, podem definir as tendências de uso da energia solar. O uso de sistemas baseados em energia solar cresceram rapidamente, aumentou cerca de 11 vezes de 2015 a outubro de 2017 (SAUAIA, 2017). Esse aumento é devido a vantagens como pouca manutenção, fonte inesgotável e economia gerada pela geração independente.

2.1.1 FUNCIONAMENTO DA GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O sistema fotovoltaico solar converte diretamente a radiação solar em eletricidade utilizando células fotovoltaicas (REINDERS et al., 2017). A essa conversão dá-se o nome de efeito fotovoltaico. Esse efeito consiste na propriedade de alguns materiais apresentarem uma diferença de potencial quando atingidos por raios de luz. O material mais utilizado para esta função é o silício. Na Figura 1 pode-se observar o processo de funcionamento de uma célula fotovoltaica.

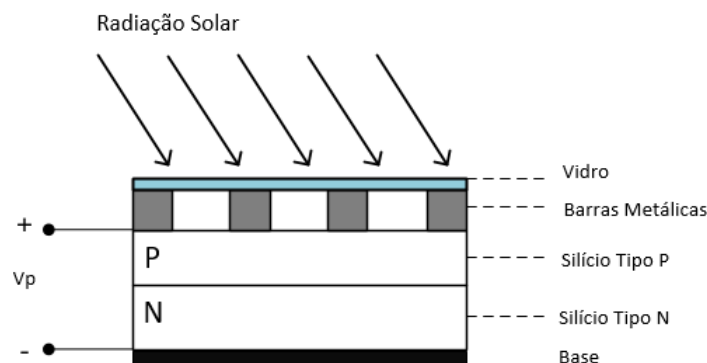


Figura 1: Célula Fotovoltaica.

No momento em que as partículas da luz solar, os fótons, colidem junto aos átomos desses materiais, provocam o deslocamento dos elétrons na junção PN, gerando a eletricidade. A Figura 2 mostra a composição de um painel solar.



Figura 2: Constituição de um painel solar.

Fonte: <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar-fotovoltaico.html/>

Propriedade dos materiais utilizados (SOLAR, 2011):

- Células fotovoltaicas: elas tem aproximadamente 1,85mm de espessura. São feitas a partir de uma fina camada de cristal de silício ultra puro;
- Vidro especial: esse vidro utilizado na fabricação é um vidro ultra puro, com baixo teor de ferro com aproximadamente 4mm de espessura, desenvolvido com uma substância antirreflexiva, para garantir menos reflexão e deixar o máxima de radiação solar passar por ele;
- Película encapsulante: é um filme encapsulante do painel, conhecido como EVA, que significa Acetato-Vinilo de etileno, é um material selante de cura rápida, projetado especificamente para painéis solares. Sua função é proteger as células fotovoltaicas contra o envelhecimento causado pelos raios UV, temperaturas extremas e umidade;
- *Backsheet*: é um material plástico branco colocado na parte de trás do painel solar, protegendo os componentes internos do painel, agindo como um isolante elétrico;
- Caixa de junção: essa caixa fica na parte de trás do painel, onde as células fotovoltaicas são interconectadas eletricamente em série, possuindo diodos de *by-pass* que visam garantir a segurança e o bom funcionamento do painel solar;
- Moldura de alumínio: são de alumínio anodizado, desenvolvidas para adicionar robustez ao painel, protegendo-o na hora da instalação.

Para a geração de energia elétrica solar fotovoltaica, uma série de componentes devem ser instalados cuidadosamente para que a energia elétrica seja gerada e utilizada.

Todo o funcionamento do sistema de geração de energia elétrica, pode ser observado na Figura 3:



Figura 3: Processo de produção de energia solar fotovoltaica em uma residência.

Fonte: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>

Conforme a Figura 3, pode-se acompanhar como funciona o processo de geração de energia solar fotovoltaica em uma residência:

- (i) Painel fotovoltaico: a irradiação solar penetra os painéis fotovoltaicos gerando a energia elétrica em DC (corrente contínua) indo diretamente ao controlador de carga;
- (ii) Controlador de carga: funciona como válvulas para o sistema, evitando a sobrecarga ou descarga exageradas na bateria, aumentando sua vida útil e desempenho;
- (iii) Baterias: são usadas para armazenar a energia elétrica para que o sistema possa ser utilizado quando não há sol. Elas possuem uma capacidade máxima de energia armazenada que é definida no manual do dispositivo;
- (iv) Inversor DC/AC: são responsáveis por transformar a corrente contínua contida nas baterias em corrente alternada (AC).

A disponibilidade de energia solar depende da estação do ano, condições climáticas, poluição ou posição geográfica (BICA; CRISTIAN, 2008). O sistema fotovoltaico não requer alta irradiação solar para funcionar. Contudo, a quantidade de

energia gerada depende da densidade das nuvens. Mesmo uma pequena quantidade de nuvens pode resultar em uma menor produção de eletricidade em comparação a dias de céu completamente aberto.

A geração de energia solar envolve alguns processos que caracterizam esse tipo de geração, como a radiação, que é a forma de transferência de energia vinda do sol através da propagação de ondas eletromagnéticas ou fótons, a irradiação solar, que é a quantidade de radiação incidente em uma superfície durante um intervalo de tempo, e a irradiância solar, que é a taxa da radiação solar incidente em uma superfície por unidade de área, normalmente medida em $Watts/m^2$. Esse último, é utilizado para o cálculo da quantidade estimada de energia elétrica que um sistema fotovoltaico é capaz de produzir.

A irradiação solar é um dos principais parâmetros em que é possível estimar aspectos relacionados ao potencial de geração sob condições adversas, como em dias de muito sol, nublados ou até com chuva, o que viabiliza o poder de decisão em tempo de projeto. No sistema de geração como um todo, incluindo o banco de baterias, o controlador de carga e os inversores, pode-se planejar a potência gerada pelo sistema através de variações desses parâmetros. Uma das formas de prover essas estimativas de planejamento é por meio de um modelo capaz de simular as taxas de geração, carregamento de baterias entre outras estimativas, a fim de prever a capacidade do sistema. Uma alternativa de abordagem de modelagem é apresentada a seguir.

2.2 REDES DE PETRI

Rede de Petri é um formalismo para a modelagem matemática, com interfaceamento gráfico, de sistemas de processamento de informações que são caracterizados por concorrência, assincronia, distribuição, paralelismo, não determinismo, estocasticidade, dentre outros (MURATA, 1989). Essa abordagem é adequada para uma variedade de aplicações, como análise e especificação de software, sistemas distribuídos, modelagem, verificação e controle industrial, sistemas a eventos discretos, matrizes de lógica programável, entre outros. O que todas essas aplicações tem em comum é que incorporam a noção de fluxo e podem ser descritos por fluxogramas que expressem atividades paralelas, simultâneas, sincronizadas, etc.

Formalmente uma RP é representada por uma 5-tupla:

$$RP = (L, T, F, W, M_0). \quad (1)$$

Esta estrutura é composta por:

- $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$, é um conjunto finito de lugares;
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, é um conjunto finito de transições;
- $F \subseteq (L \times T) \cup (T \times L)$, é um conjunto de arcos (relação de fluxo);
- $W : F \rightarrow 1, 2, 3, \dots$, é uma função de peso;
- $M_0 : L \rightarrow 0, 1, 2, \dots$, é a marcação inicial.

Graficamente, esse formalismo pode ser, e é em geral, expresso pelos elementos mostrados na Figura 4:

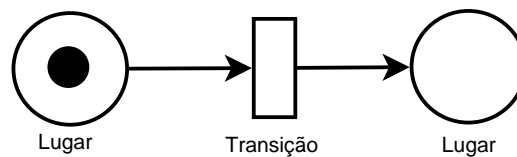


Figura 4: Rede de Petri simples.

Esses elementos da Figura, representam a composição da rede, em que as setas unidirecionais são os arcos, os círculos são lugares, o retângulo representa a transição temporizada e por fim, a marcação circular preta presente no lugar que são os *tokens*.

Os arcos são rotulados com seus pesos, ou condições que podem ser impostas em um lugar. O componente de M , denotado por $M(L)$, expressa a quantidade de *tokens* em cada lugar L . Na modelagem, usa-se o conceito de condições e eventos, em que os lugares representam as condições e as transições representam eventos do modelo.

Uma transição tem um número determinado de entradas e saídas, representando as pré-condições e pós-condições do evento, respectivamente. A presença de um símbolo em um lugar é interpretada como mantendo a verdade da condição associada ao lugar. Em outra interpretação, k *tokens* são colocados em um local para indicar que k itens de dados ou recursos estão disponíveis.

Para redes de capacidade finita, para que uma transição t seja habilitada, existe uma condição adicional de que o número de *tokens* em cada local de saída p de t não

pode exceder sua capacidade $K(l)$ após o disparo t . Essa regra com a restrição de capacidade é chamada de regra de transição estrita.

2.2.1 REDES DE PETRI ESTENDIDAS

Em sua construção original, as RPs são aplicáveis à modelagem de diversos problemas computacionais, como processamento de código, projetos de hardware, fluxos, no sentido amplo do termo, etc. No entanto, uma classe particular de problemas, os que possuem a característica de serem dirigidos pelo tempo, não encontram na formulação original das RPs um mecanismo adequado, ou suficiente, de modelagem. Nesse sentido, inúmeras extensões das RPs convencionais foram propostas ao longo dos anos para incorporar o tempo. Dentre elas as redes de Petri estocásticas generalizadas, em inglês *Generalized Stochastic Petri Networks* (GSPN).

GSPN é uma extensão que combina RPs temporizadas e não temporizadas. O aspecto temporizado é representado por parâmetros que modelam variáveis aleatórias, distribuídas exponencialmente (ou por arranjos exponenciais). Esses parâmetros são associados a um tipo particular de transição chamadas de temporizadas. Quando o tempo é irrelevante para uma determinada transição, pode-se simplesmente usar transições não temporizadas ou imediatas.

Formalmente, uma GSPN é uma 7-tupla:

$$GSPN = (L, T, Li, I, O, H, M_0, W). \quad (2)$$

Em que:

- $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$, é um conjunto finito de lugares;
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, é um conjunto finito de transições;
- $Li : T \rightarrow \mathbb{N}$ é a função de prioridade, onde:

$$\Pi(t) = \begin{cases} \geq 1, & \text{se } T \text{ é imediato;} \\ 0, & \text{se } T \text{ é temporizado.} \end{cases}$$

- $I : (T \times L) \rightarrow \mathbb{N}$ é a função de entrada que define as multiplicidades de arcos direcionados de lugares para transições;

- $O : (T \times L) \rightarrow \mathbb{N}$ é a função de saída que define as multiplicidades de arcos direcionados de transições para lugares;
- $H : (T \times L) \rightarrow \mathbb{N}$ é a função de inibição, que define as multiplicidades de arcos inibidores de lugares para transições;
- $M : L \rightarrow \mathbb{N}$ é a função de marcação inicial. M indica o número de tokens que estão em cada lugar, ou seja, define o estado de um modelo GSPN;
- $W : T \rightarrow \mathbb{R}^+$ é a função de ponderação que representa os pesos de transições imediatas (w_t) ou as taxas de transições temporizadas (λ_t), em que:

$$W(t) = \begin{cases} w_t \geq 0, & \text{se } T \text{ é imediato;} \\ \lambda_t > 0, & \text{se } T \text{ é temporizado;} \end{cases}$$

A relação entre lugares e transições é estabelecida pelos conjuntos $\bullet t$ e t^\bullet , definidos da seguinte forma:

Definição 1 *Dada uma transição t em T , define-se:*

- $\bullet t = \{l \in L \mid I(t, l) > 0\}$ como as pré-condições em t ;
- $t^\bullet = \{l \in L \mid O(t, l) > 0\}$ como as pós condições em t .

As regras de *habilitação* e *disparo* para transições são definidas a seguir.

Definição 2 (Regra de Habilitação) *Uma transição $t \in T$ é dita estar habilitada em uma marcação M se e somente se:*

- $\forall l \in \bullet t, M(l) \geq E(t, l)$.

Quando uma transição ativada é disparada, ela remove *tokens* de entrada para saída (suas condições *pre* e *pós*).

Definição 3 (Regra de disparo) *O disparo da transição $t \in T$ habilitado na marcação M leva a uma nova marcação M' de tal modo que: $\forall p \in (\bullet t \cup t^\bullet), M'(p) = M(p) - I(t, p) + O(t, p)$.*

Uma GSPN é considerado *limitada* se houver um limite $k > 0$ no número de *tokens* em cada lugar. Portanto, garante que o espaço de estados resultante de

uma GSPN limitado seja finito, característica importante em termos de tratamento computacional. Dessa forma, as GSPNs permitem combinar arranjos exponenciais para modelar diferentes distribuições de tempo (DESROCHERS; AL-JAAR, 1995).

Quando o número de *tokens* em cada entrada coloca p de t é N vezes o mínimo necessário para habilitar t ($\forall p \in \bullet, M(p) \geq N \times I(t, p)$, onde $N \in \mathbb{N}$ e $N > 1$), permite que a transição seja acionada mais de uma vez. Nesta situação, a transição t é dita habilitada com o grau $N > 0$.

Disparo de transição pode usar uma das seguintes semânticas dinâmicas:

- *Servidor-único*: N Disparos iniciais;
- *Servidor-infinito*: N Disparos paralelos;
- *Servidor- k* : a transição é ativada até k vezes em paralelo; Os tokens que permitem a transição para um grau superior a k são processador após os primeiros disparos de k .

Somente as transições ativadas podem disparar eventos. As transições imediatas são acionadas assim que são ativadas. Quando uma transição ativada é disparada, ela move *tokens* de entrada para saída.

As GSPNs podem ser isomórficas à *Cadeias de Markov de Tempo Contínuo* (CTMC) (MARSAN et al., 1995). No entanto, elas são mais expressivas, porque permitem que métricas sejam calculadas tanto via simulação quanto pela análise do espaço de estados. No último caso, uma GSPN é de fato convertida em CTMC para análise. Além disso, as GSPNs permitem combinar arranjos exponenciais para modelar diferentes distribuições de tempo (DESROCHERS; AL-JAAR, 1995). Nesse trabalho serão usados apenas transições exponenciais e análises por simulação. Arranjos de transições exponenciais e análises não baseadas em simulações são aspectos e melhorias sugeridos como trabalhos futuros.

2.3 SOFTWARE

As simulações para as GSPN, foram realizadas no *software TimeNet*. Esse *software* permitem calcular estimativas, através de equações específicas utilizadas durante uma simulação estacionária padrão (usada para este trabalho). Esse tipo de simulação consiste em achar a estimativa máxima calculada para cada lugar com os disparos

das transições ligadas a eles. Para o trabalho, utilizamos apenas duas estimativas, apresentadas nas Equações 3 e 4:

$$\text{ValorEsperado} = (\#Ln); \quad (3)$$

$$\text{Util} = (\#Ln > 0). \quad (4)$$

Para a utilização dessas equações, o software utiliza uma gramática especial, neste caso as funções dependentes de marcação ou seja, lugares que receberam *tokens* tem nas definições uma medida de desempenho da forma: $\#Ln$, referindo-se a expectativa de *tokens* presentes no lugar Ln . Outra função importante, envolve a Equação 4 em que mede a probabilidade do lugar Ln , em ter pelo menos um *token* durante a simulação (ZIMMERMANN; KNOKE,). Diante disso, muitas estimativas podem ser calculadas, dependendo da análise escolhida para o modelo.

2.3.1 TRABALHOS RELACIONADOS

O planejamento de energia e o uso das GSPN em sistemas com natureza estocásticas têm sido citados em diferentes áreas de estudo. A seguir estão dois trabalhos que podem ser citados pela importância do planejamento da geração de energia e três trabalhos reforçando a utilização da GSPN em diferentes sistemas respectivamente:

- Em (OLIVEIRA; MARIA, 2017), o artigo apresenta uma abordagem de otimização para o planejamento de geração renovável em sistemas de distribuição de energia. O objetivo foi determinar a colocação ótima da geração distribuída renovável visando minimizar os investimentos e custos operacionais em um planejamento de longo prazo. A abordagem proposta representa o comportamento estocástico dos recursos renováveis, manipulando dados históricos para determinar os fatores de capacidade eólica e fotovoltaica.
- Em (MONTROYA-BUENO et al., 2015), o artigo apresenta um modelo para obter a alocação e o período ideais de geração distribuída, de acordo com a garantia, é proposto como parte do planejamento da expansão da distribuição. O modelo visa minimizar os custos de investimento em geração distribuída renovável (fotovoltaica e eólica), custo de investimento na expansão da subestação, custos de

operação e manutenção, custo de perdas de energia e o custo da energia adquirida do sistema de transmissão;

- Em (ARTEIRO et al., 2007), o artigo apresenta um modelo de desempenho para Middleware Orientado a Mensagem desenvolvido em redes de Petri estocásticas que permite a realização de experimentos de simulação visando à identificação da capacidade de entrega de mensagens e do ponto de saturação do sistema.
- Em (DEY et al., 2011), os autores propõe um modelo abrangente de redes inteligentes foi proposto usando GSPNs. O modelo é usado para analisar as restrições e entregas da rede elétrica inteligente do futuro.
- Em (LU et al., 2010), o artigo trata do gerenciamento de energia de uma usina de energia fotovoltaica. Sendo projetados diferentes modos de operação de geração utilizando Redes de Petri, a fim de calcular o despacho de energia de uma margem de potência ajustável para as unidades de armazenamento.

Embora próximos ao trabalho aqui proposto, nenhuma dessas iniciativas da literatura estabelece a análise sob a ótica do planejamento de capacidade especificamente em geração de energia solar, diante disso, a proposta deste trabalho é apresentada a seguir.

3 PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE EM GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A falta de uma estimativa pode levar à construção de todo o sistema físico de geração de energia, para que só então ele possa ser medido e os níveis de geração possam ser estimados. Essa abordagem, além de cara, consome tempo, dificulta o redimensionamento e contingenciamento, além de ser bastante dependente de uma política de tentativa e erro.

Outra maneira de se planejar uma infraestrutura adequada para uma dada demanda de geração, é por meio de um planejamento prévio acerca da capacidade do sistema. Tal planejamento pode ser executado, por exemplo, por meio de modelos.

No contexto da geração fotovoltaica, o planejamento de capacidade consiste, sobretudo, em estimar os níveis de geração para uma dada situação operacional. Então, com base na variação, por simulação, do cenário operacional, é possível estimar, em um curto espaço de tempo, múltiplos cenários e configurações.

Em tese, tais estimativas podem servir, por exemplo, para determinar o modo mais econômico de geração, o modo mais eficiente, o percentual de acúmulo, de perda, e tantas outras estimativas, facilmente implementáveis via modelo.

Em particular, duas classes de estimativas despontam como elementares quando se executa com um planejamento de capacidade em geração: (i) limite mínimo de produção; e (ii) ponto de saturação do sistema. Conhecer esses dois limites, com certo grau de confiança, ainda que não exato, permite que o engenheiro possa antecipar quando o sistema irá alcançar o ponto de saturação, ou a produção mínima (MENASCÊ; ALMEIDA, 2003). Isso, em tese, o habilita a antecipar políticas preventivas, mitigar o impacto e o volume de produção, planejar contratos de serviço mais precisos e realístico, etc.

Um sistema é dito estar saturado quando um de seus recursos se aproxima de 100% de utilização. Em geral isso é associado a um gargalo para o desempenho

(ARTEIRO et al., 2007). No caso de geração fotovoltaica, a ideia de estar saturado pode ser associada à produção máxima, o que é um aspecto positivo, mas com eventuais perdas de recurso, como por exemplo ocorre quando a incidência solar é superior ao necessário para o painel operar em seu limite máximo. Ou, ainda, à saturação do armazenamento em banco de baterias, etc.

O intuito central do planejamento de capacidade, aqui, é garantir que as demandas futuras de carga possam ser atendidas de maneira efetiva por uma certa infraestrutura física de geração, ponderando-se as possíveis variabilidades que alteram os níveis de serviço prestado.

3.1 ETAPAS DE PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE

Para sua execução, em geral, o planejamento de capacidade em geração solar fotovoltaica, compreende um conjunto de etapas que envolvem (i) o conhecimento do ambiente; (ii) a caracterização e predição da capacidade do sistema; (iii) a predição de desempenho do sistema; e (iv) a análise de custo (MENASCÊ; ALMEIDA, 2003).

Durante a etapa de conhecimento do ambiente devem ser obtidas informações acerca do comportamento dinâmico do sistema, incluindo uma descrição dos equipamentos e os parâmetros reais envolvidos. A coleta dos dados é realizada através da medição do sistema. Com base nos dados coletados, é realizada uma caracterização de cada parâmetros, de acordo com as prioridades e relevância de cada no sistema.

A predição de desempenho pode ser definida como o processo de estimar métricas de desempenho para um determinado conjunto de parâmetros (MENASCÊ; ALMEIDA, 2003). Tais parâmetros são considerados essenciais ao sistema ou à carga que este pode ser submetido, logo, nomeia-se parâmetros de carga.

O conjunto de métricas, ou regras, selecionadas para o desempenho do sistema varia de acordo com a sua natureza e com os objetivos da própria predição. No contexto de avaliação de desempenho de um sistema de geração de energia elétrica a partir de um sistema solar fotovoltaico, as principais métricas incluem:

- Fluxo de energia no banco de baterias e na rede externa;
- Variação de irradiação solar conforme a hora do dia;
- Quantidade disponível de painéis solares fotovoltaicos;

- Saturação da capacidade das baterias disponíveis.

Nesse trabalho, serão estes os aspectos considerados para o planejamento de capacidade através da modelagem do sistema, para coletar e analisar as estimativas colhidas através das simulações. Simulações estas, que são caracterizadas na seção a seguir.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DE MODELOS DE PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE

Em geral, a etapa de predição de desempenho envolve a construção e uso de modelos que são abstrações de sistemas reais. Do ponto de vista de desempenho, dois tipos de modelos podem ser construídos para um sistema: modelos analíticos e modelos de simulação (ARTEIRO et al., 2007).

Nos modelos analíticos, a descrição do sistema é realizada através de um conjunto de fórmulas ou equações que podem ser solucionadas para um conjunto de parâmetros de entrada, permitindo a derivação das métricas de desempenho. Mas esse tipo de abordagem normalmente se aplica a cenários reduzidos, com um alto nível de abstração, além de poder se tornar complexa de processar computacionalmente.

Já nos modelos de simulação, a descrição do sistema é embutida em um programa de computador que, ao executar, simula a sua operação. O estado do sistema é normalmente representado através de variáveis que assumem valores discretos. Ao longo de uma simulação, as operações do sistema são simuladas repetidas vezes e as métricas configuradas são computadas.

Tendo em vista esses aspectos, este projeto adota uma análise por simulação, já que o planejamento da geração de energia através dos painéis solares possui um comportamento variável, não determinístico, suscetíveis a ruídos, distúrbios e imprevisibilidade. Assim, eles serão aqui simulados para tentar acompanhar essa variabilidade, ao menos parte delas, e fornecer uma resposta probabilística aceitável, computada em tempo aceitável, com recursos computacionais viáveis. As respostas pretendidas dimensionarão, com certo grau de precisão, a capacidade do sistema perante uma variação discreta de seus parâmetros.

Nesse contexto, as GSPNs, que têm um papel fundamental em teoria, simulação e planejamento de capacidade, serão utilizadas nesse trabalho. Estima-se que elas possam retornar um indicativo dos níveis de geração de energia elétrica de painéis,

sob parâmetros variáveis, como por exemplo a natureza estocástica da irradiação solar (SHARMA, 2017).

Para contextualizar a importância do planejamento desse tipo de geração de energia, (D'SA, 2005) expõem algumas vantagens relacionadas:

- Melhorar os coeficientes que calculam o capital de investimento através de planos que diminuam o custo da energia por unidade de saída e energias alternativas;
- Analisar futuras solicitações de capacidade eficientemente;
- Contribuir para o bem estar social e ambiental de forma a dar assistência ao desenvolvimento social em todas as dimensões sociais, econômicas e ambientais, implantando custos adicionais para questões de impacto ambiental;
- Escolher adequadamente entre alternativas, identificando através do gerenciamento da demanda, os custos efetivos dos melhoramentos e as opções de diversidade de recursos;
- Priorizar programas e políticas, através de regulamentações que diminuam a tributação para uso de determinado recurso energético.

Diante disso, a proposta desse trabalho consiste na construção de um modelo para um sistema real de geração de energia elétrica a partir de painéis solares fotovoltaicos. Para isso, o uso da simulação em GSPN utilizando o software *TimeNet*, deve ser cuidadosamente implementado para que o modelo seja validado, obtendo-se resultados satisfatórios.

3.3 PARAMETRIZAÇÕES E MÉTRICAS DE INTERESSE

Os parâmetros para a variação do sistema com a simulação, estão dispostos a seguir:

- Quantidade de baterias disponíveis;
- Quantidade de energia elétrica que pode ser ou deverá ser utilizada;
- Quantidade de irradiação solar;

Ao final desse trabalho devem ser respondidas questões, como por exemplo, as especificadas a seguir:

- Qual a taxa de carregamento de um banco de baterias?
- Qual a taxa de transferência de energia para a rede externa, sob um determinado índice de consumo, e de capacidade do bando de baterias?
- Que dimensionamento do banco de baterias seria adequado para armazenar uma dada quantidade de energia por um dado espaço de tempo, sob determinado índice de consumo?

Diante disso, a habilidade para estimar e confrontar o potencial de geração de múltiplos painéis é uma alternativa para o planejamento de capacidade de uma usina fotovoltaica. Tais estimativas poderiam servir, por exemplo, para:

- Planejar a infraestrutura necessária para garantir X unidades de geração;
- Confrontar o custo de infraestrutura em face ao potencial de geração;
- Construir cláusulas legais e realísticas para a unidade de geração;
- Evitar eventuais exiguidades de demanda em decorrência do consumo real ou pretendido.

Na sequência, é apresentado o modelo GSPN proposto nesse trabalho para o alcance desses pressupostos.

3.4 MODELAGEM DE UM GERADOR GENÉRICO DE ENERGIA SOLAR

Inicialmente, propõe-se um modelo genérico, capaz de simular a geração de energia conforme a irradiação solar, como mostra a Figura 5:

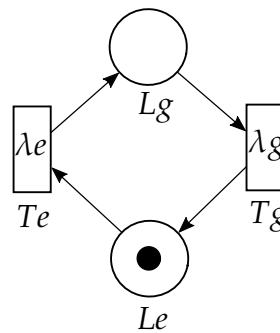


Figura 5: Modelo do painel solar.

Nesse modelo, a transição temporizada Te representa o controle de fluxo da geração de energia, em que dispara com uma taxa de *delay* λe (número real atribuído ao *delay* de transição). Ao disparar, Te libera *tokens* que são armazenados no lugar Lg . Esse lugar modela a fila gerada a espera do disparo pela transição Tg . Essa transição representa o fluxo de geração de energia, e dispara a uma taxa de *delay* λg . Essa taxa é definida proporcionalmente ao valor de irradiação do sistema real.

Na sequência, esse modelo, que corresponde a um único gerador, é complementado com outros elementos do sistema real, como o banco de baterias, rede de consumo externo e consumo interno, como pode ser observado na Figura 6.

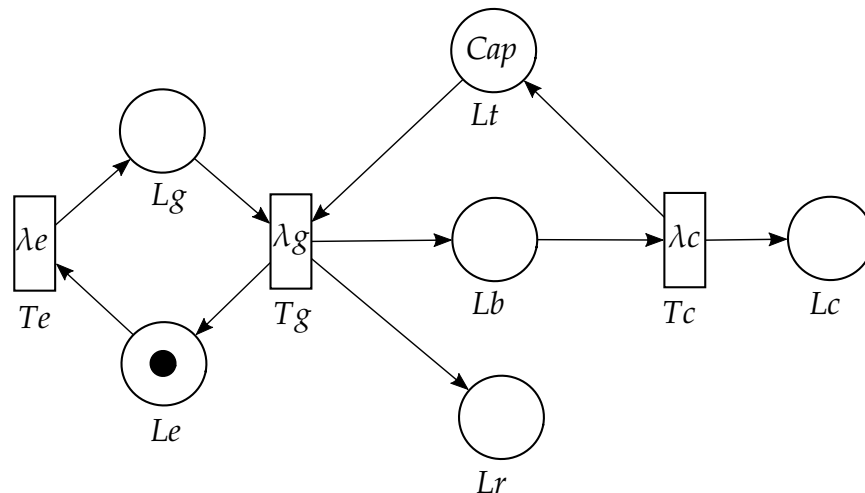


Figura 6: Modelo de geração de energia solar, com armazenamento, consumo interno e rede externa.

Os novos elementos do modelo, são descritos a seguir:

- Lb : Lugar em que os *tokens* disparados por Tg serão armazenados, representando

o banco de baterias, posteriormente, os *tokens* armazenados são disparados pela transição Tc com um *delay* λc que representa o consumo de energia do sistema.

- Lt : Lugar que modela o tamanho da capacidade máxima: Cap do banco de baterias (Lb), ligado a transição de consumo Tc e a transição de geração Tg , ou seja, a cada disparo da transição Tg , um *token* é retirado de Lt significando que a bateria foi carregada diminuindo sua capacidade de armazenamento, e a cada disparo da transição Tc um *token* é armazenado em Lt significando que a bateria foi descarregada, aumentando novamente sua capacidade;
- Tc : Transição que modela a espera de consumo de energia interna, essa espera dura um *delay* λc que pode ser variado;
- Lc : Lugar que armazenam os *tokens* que foram consumidos conforme o disparo da transição Tc ;
- Lr : Lugar que armazenam os *tokens* que foram gerados e que não podem estar no banco de baterias por estar com a capacidade máxima, definido pelas condições impostas nos arcos entre os lugares e transições apresentados a seguir.

O modelo foi limitado de maneira que, ao ultrapassar a capacidade máxima de armazenamento de energia, a energia gerada posteriormente (os *tokens*) passarão a ser armazenados no lugar Lr e não mais em Lb , produzindo assim excedente para comercialização. Para isso, 3 arcos foram limitados, conforme a Figura 7:

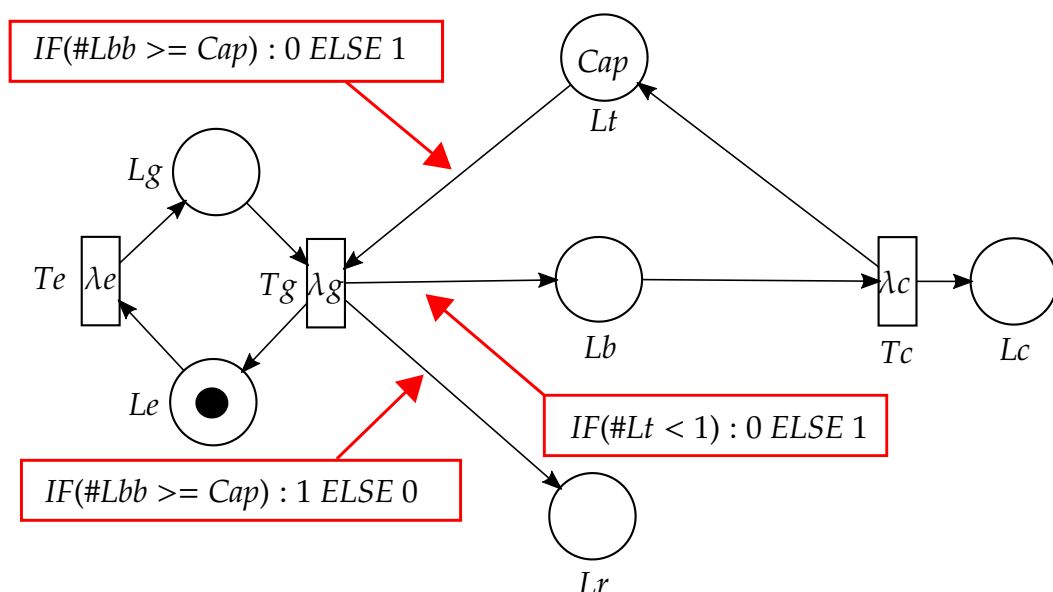


Figura 7: Condições impostas nos arcos.

A condição no arco entre Tg e Lb , mostra que se o lugar Lt estiver sem *tokens*, significa que a capacidade do banco de baterias está em seu valor máximo. Logo o arco é desabilitado e os *tokens* passam a ser disparados apenas para o lugar *Rede*, caso contrário, eles são armazenados no lugar: Lb (Banco de baterias). A condição do arco entre Tg e Lr tem o mesmo propósito da primeira condição, garantindo que esse arco, só seja habilitado quando a capacidade da bateria está em seu valor máximo. E por fim, o arco entre Tg e Lt garante que a transição Tg , ao ser disparada quando a capacidade do banco atingiu seu máximo, apenas coloque o *token* no lugar Lr e não retire-o do lugar Lt no disparo da transição, dessa maneira não muda o estado da capacidade já que a energia produzida é direcionada diretamente para a rede.

3.5 APLICAÇÃO DO MODELO GENÉRICO

Os parâmetros a serem variados no modelo proposto definem, na prática, condições adversas possivelmente enfrentadas pelo sistema real, sob as quais se deseja capturar estimativas, como mostrados a seguir.

3.5.1 IRRADIAÇÃO

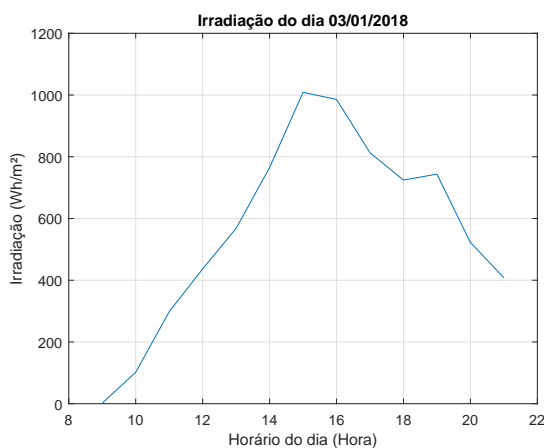
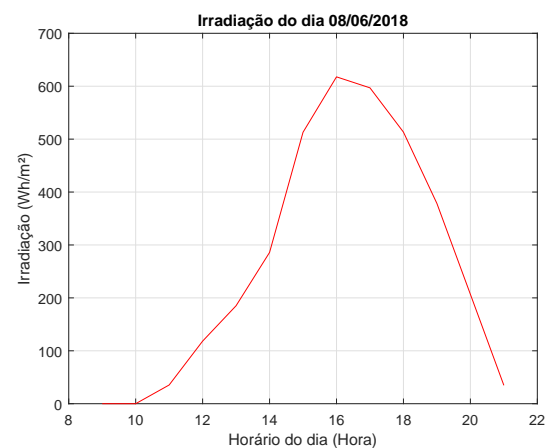
Os valores de irradiação foram definidos conforme dados obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (INMET, 2008). Este instituto faz monitoramento, análise, previsões de tempo e clima com um sistema que coleta dados como: temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade de vento, pressão atmosférica entre outros, utilizando uma rede de estações meteorológicas automáticas distribuídas por todo o país.

A escolha dos dados para este trabalho, foram obtidos da cidade de Dois Vizinhos/PR, pois o instituto dispõe de uma estação automática que obtêm os dados de irradiação por hora, de interesse particular deste trabalho. Os dados colhidos foram do dia 03/01/2018 e 08/06/2018, pois o mês de janeiro é considerado de maior irradiação solar e temperatura, e junho tem as menores taxas de irradiação e temperatura, assim pôde-se variar a irradiação de forma a contemplar o máximo e mínimo de potência gerada pelos painéis. A escolha dos horários foi entre às 9:00 horas da manhã e 21:00 horas da noite, nos dois dias já que são os horários onde a irradiação é mais significativa. A Tabela 1 mostra esses valores obtidos.

Tabela 1: Valores de irradiação.

Hora	Irradiação (Wh/m^2)	
	03/01/2018	08/06/2018
9:00	1,7	0
10:00	101,9	0
11:00	297,8	35,35
12:00	436,6	118,25
13:00	568,1	185,17
14:00	765,1	285,86
15:00	1008,8	513,0
16:00	985,8	617,71
17:00	813,0	596,94
18:00	724,6	513,28
19:00	743,7	378,38
20:00	522,4	206,75
21:00	408,0	34,71

As Figuras 8 e 9 mostram os gráficos obtidos conforme os valores na Tabela 1:

**Figura 8:** Irradiação solar no dia 03/01/2018.**Figura 9:** Irradiação solar no dia 08/06/2018.

Note que, como esperado, em janeiro a taxa de irradiação permanece mais acentuada entre 15:00 e 16:00 horas. Já em junho é maior às 16:00 horas.

3.5.2 PAINEL SOLAR

Atualmente existem painéis solares que geram diferentes valores de energia conforme suas respectivas potências. Os painéis usados como exemplo neste trabalho apresentam potência de 280 e 355 Watts, mas os resultados podem ser diretamente reproduzidos para outras configurações já que o modelo proposto leva em conta a irradiação solar sendo a potência do painel um valor genérico neste caso.

Os manuais de cada gerador trazem informações referentes as potências, tensões e correntes que eles suportam. Neste caso observa-se nas figuras 10, 11, 12 e 13 os valores de irradiação dos dias escolhidos conforme a potência de cada painel:

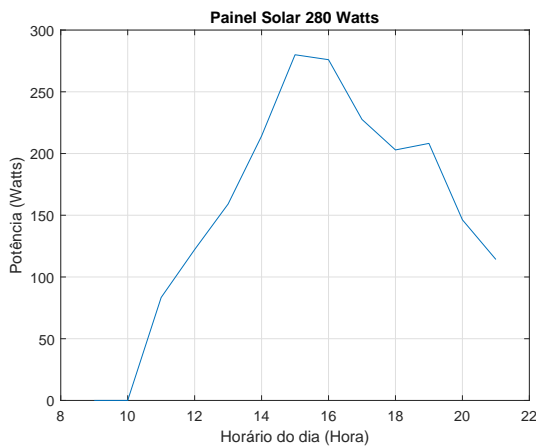


Figura 10: Painel Solar com potência de 280 Watts, conforme a irradiação do dia 03/01/2018

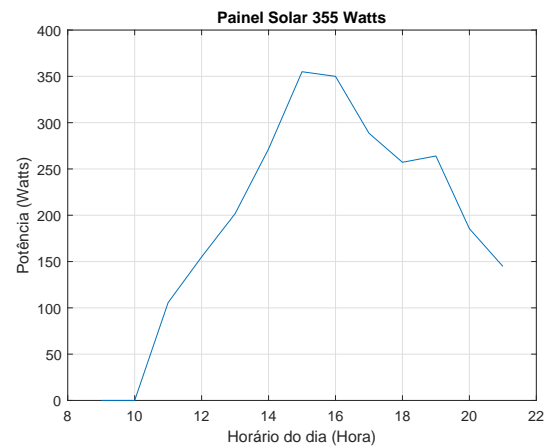


Figura 11: Painel Solar com potência de 355 Watts, conforme a irradiação do dia 03/01/2018.

Como pode-se observar nas Figuras 10 e 11, quando o painel solar recebe uma irradiação maior ou igual a $1000Wh/m^2$ ele produz a energia máxima. Nestes casos ambos geraram uma potência de 280 e 355 Watts, como acontece no dia de 03/01/2018. Já no dia 08/06/2018 a irradiação não ultrapassa de $617Wh/m^2$, assim a energia gerada pelo painel não chega ao seu máximo correspondente como pode-se observar nas Figuras 12 e 13:

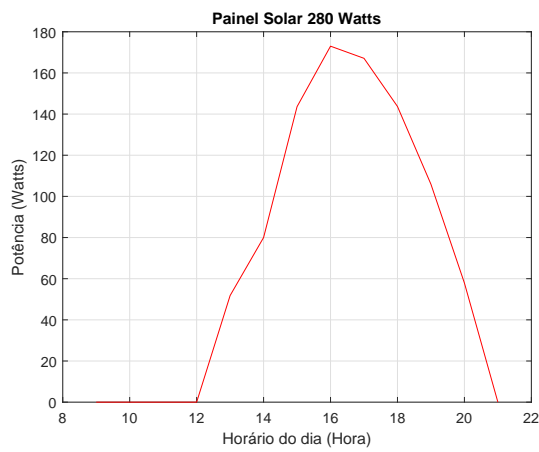


Figura 12: Painel Solar com potência de 280 Watts, conforme a irradiação do dia 03/01/2018.

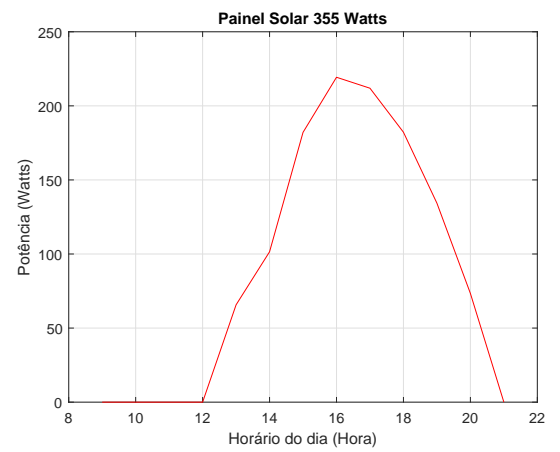


Figura 13: Painel Solar com potência de 355 Watts, conforme a irradiação do dia 08/06/2018.

4 SIMULAÇÃO

Com o software *TimeNet* o modelo foi simulado de modo a estimar a potência gerada por painéis conforme as irradiações impostas pelos dois dias. Para isso, foi utilizado o modelo da Figura 5, com os *delay* da transição Te λe fixo em 0.1 e o *delay* da transição Tg λg sendo variado conforme a Tabela 2. Essa variação acontece, devido a cada hora do dia ter um valor de irradiação diferente, logo, é preciso variar o *delay* para modelar o comportamento de geração mais próximo do real.

Tabela 2: Valores de irradiação e seus respectivos *delays*.

Hora	Irradiação (Wh/m^2)		Delay (segundos)	
	03/01/2018	08/06/2018	03/01/2018	08/06/2018
9:00	1,7	0	-	-
10:00	101,9	0	-	-
11:00	297,8	35,35	0,8	-
12:00	436,6	118,25	0,66	-
13:00	568,1	185,17	0,53	0,91
14:00	765,1	285,86	0,33	0,81
15:00	1008,8	513,0	0,1	0,58
16:00	985,8	617,71	0,11	0,48
17:00	813,0	596,94	0,28	0,5
18:00	724,6	513,28	0,37	0,58
19:00	743,7	378,38	0,35	0,82
20:00	522,4	206,75	0,57	0,9
21:00	408,0	34,71	0,69	-

As colunas 2 e 3 repetem os dados da Tabela 1, por conveniência. Os *delays* das colunas 4 e 5 são calculados conforme a irradiação de maneira proporcional ao *delay* fixo da transição Te (λe), para que o comportamento do modelo quando a irradiação é

de $1008,8 \text{ Wh/m}^2$ (valor máximo) atinja o máximo de geração com os valores de disparo das transições Tg e Te iguais a $0,1 \text{ s}$, não ocasionando filas nos lugares Le e Lg , gerando energia de forma imediata. Alguns valores de *delays* com irradiação menor que 180 Wh/m^2 , foram desconsiderados pois os manuais dos painéis consideram esses valores muito baixos para gerar energia de maneira relevante.

Após a modelagem, para a representação do potencial de energia do gerador conforme a Figura 5, calculou-se o tempo de espera dos *tokens* no lugar Lg , pois é neste lugar que eles ficam armazenados, antes de serem disparados pela transição Tg , variando assim a potência gerada pelo painel conforme a irradiação no horário estipulado. O cálculo feito obedece a Equação 5:

$$\text{TempoEspera} = (\#Lg) * \lambda g. \quad (5)$$

Os resultado das simulações, estão apresentados nas Figuras 14 e 15:

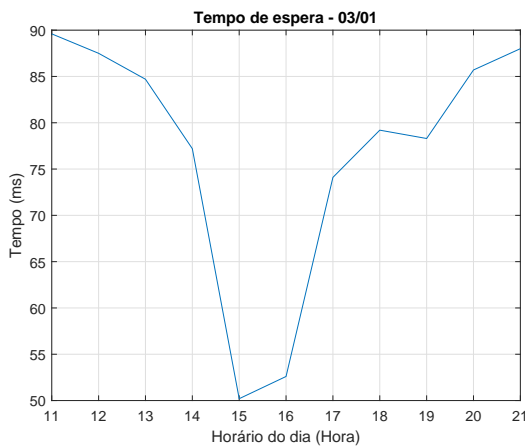


Figura 14: Resultados obtidos com as simulações referente ao dia 03/01/2018.

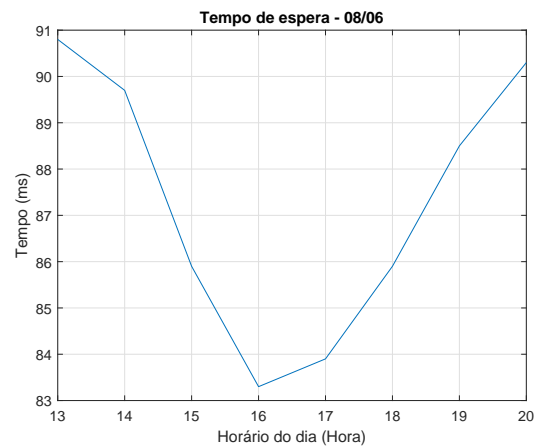


Figura 15: Resultados obtidos com as simulações referente ao dia 08/06/2018.

Analisando os gráficos observa-se um comportamento inversamente proporcional ao valor de *delay* de disparo da transição Tg λg , ou seja, quanto maior o *delay*, maior será o tempo para a geração de energia, quanto menor, maior é o tempo de espera e mais rapidamente a energia é gerada.

4.1 EXPERIMENTOS

Para validar as curvas anteriores do potencial de geração da modelagem, modificou-se os valores do tempo de espera. Essa modificação consistiu em opor os

valores obtidos nas Figuras 14 e 15 afins de comparação como pode ser observado nas Figuras 17 e 19.

Para a validação duas comparações foram realizadas. A primeira consistiu em comparar o tempo de geração do painel real (o que é sintetizado pelo cálculo do *delay*), curva em vermelho, em relação à estimativa do tempo de geração (curva em azul). Já a segunda, consistiu em comparar o valor de irradiação, curva em vermelho, em relação à mesma estimativa do tempo de geração (curva em azul). As duas comparações foram feitas para ambos os dias: 03/01 e 08/06, como mostra as Figuras 16, 17, 18 e 19:

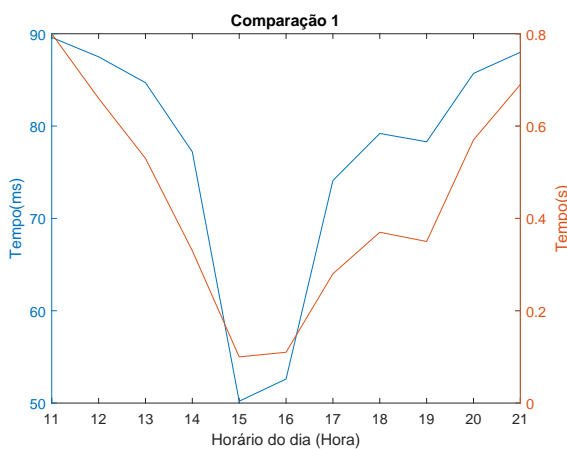


Figura 16: Primeira comparação para o dia 03/01.

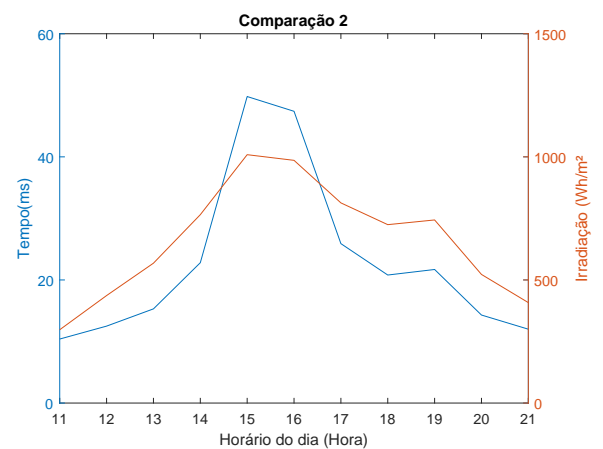


Figura 17: Segunda comparação para o dia 03/01.

Nas Figuras 18 e 19 estão as mesmas comparações mas utilizando os valores referente ao dia 08/06:

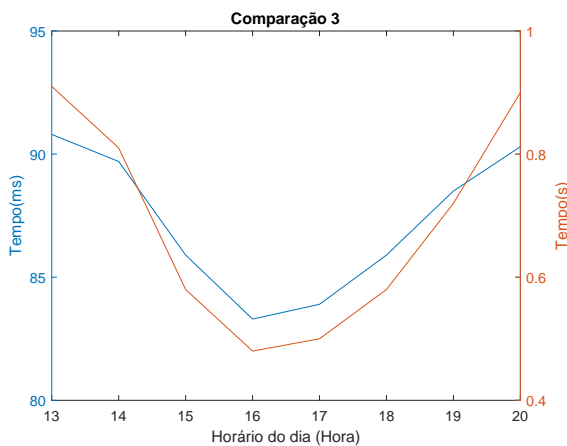


Figura 18: Primeira comparação para o dia 08/06.

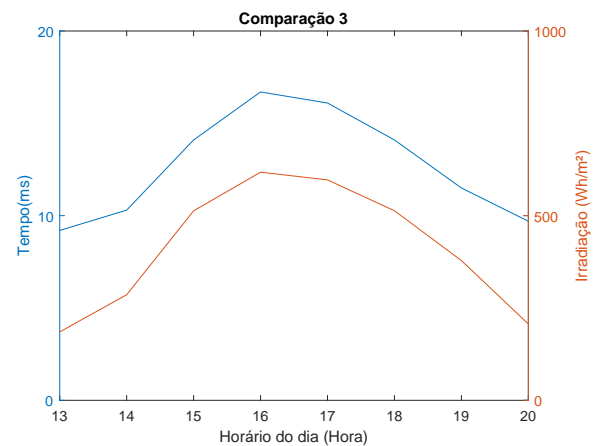


Figura 19: Segunda comparação para o dia 08/06.

Note que, esse tempo de espera obtido através das simulações, modela a noção

intuitiva de que o comportamento do modelo simulado esta muito próximo do comportamento do modelo real, ou seja, os valores estipulados para o disparo da transição Tg simula um tempo de espera com comportamento muito próximo do real.

Sabendo que o potencial estimado segue próximo à curva do tempo real de geração, pode-se explorar outros cenários do modelo, como segue as aplicações feitas a seguir.

4.2 ANÁLISES

Existem inúmeras configurações e análises a partir do modelo obtido, a seguir algumas aplicações que foram feitas.

4.2.0.1 APLICAÇÃO 1: BATERIAS

A primeira aplicação consistiu em calcular o tempo de espera do lugar Lb . Esse cálculo foi feito pelo software, através da Equação 6:

$$TempoEspera = (\#Lb) * \lambda g. \quad (6)$$

Essa equação, consiste em estimar o tempo médio, em que o lugar Lb fica ocupado com pelo menos um ou mais *tokens*, conforme o disparo das transições: Tg e Tc (transição de geração e transição de consumo). Os valores de Cap e do *delay* de consumo λc , foram fixados em 10 e 1,0 respectivamente.

Os valores obtidos das estimativas do valor esperado ($\#Lb$), e o tempo de espera, estão demonstrados nas Figuras 20, 22, 21 e 23, respectivamente:

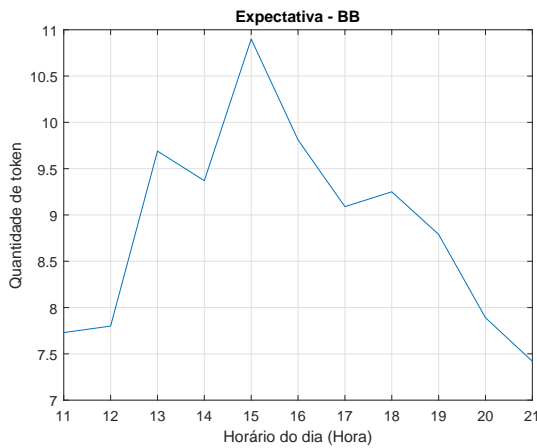


Figura 20: Expectativa estimada no lugar *Lbb*, utilizando dados do dia 03/01.

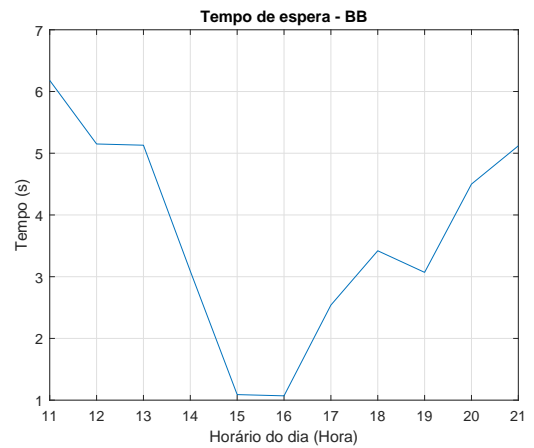


Figura 21: Tempo de espera no lugar *Lbb*, utilizando os valores do dia 03/01

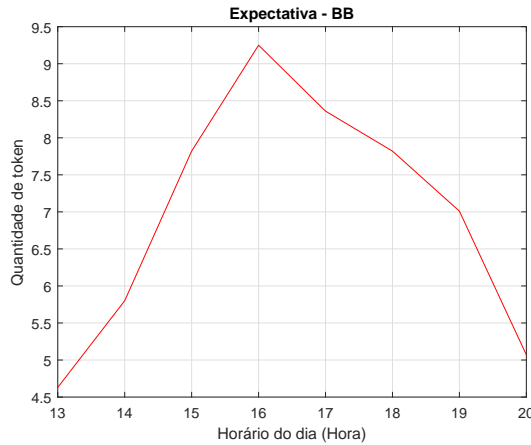


Figura 22: Expectativa estimada no lugar *Lb*, utilizando dados do dia 08/06.

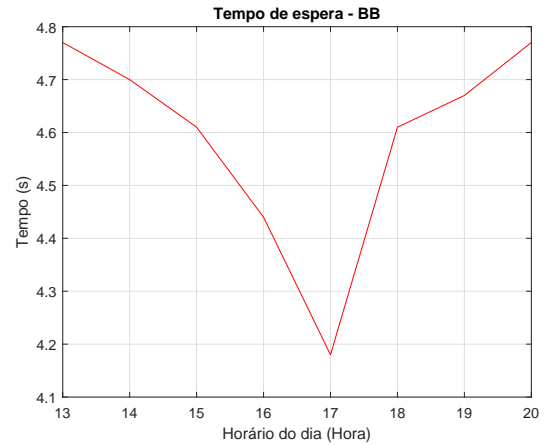


Figura 23: Tempo de espera no lugar *Lb*, utilizando os valores do dia 08/06.

Fazendo a análise dos gráficos, os resultados referente aos valores das Figuras 20 e 22, capturam a estimativa de acúmulo de carga do banco de baterias, ou seja, a quantidade máxima de *tokens* que o banco de baterias irá carregar, conforme a hora do dia, antes de ser consumido.

Quanto mais energia injetada, menos tempo levará para carregar a bateria por completo. Por exemplo, pela Figura 21 às 11:00 horas da manhã, a estimativa de carregamento é de aproximadamente: 6.2 segundos, já às 15:00 horas, horário em que a irradiação chega ao seu máximo, o valor é de 1 segundo, ou seja, quanto mais energia é produzida em curto espaço de tempo, mais rápido será o carregamento do banco de baterias.

Na prática, sobre capacidade e planejamento, essas estimativas podem ser

usadas para dimensionar o tamanho do banco de baterias. A partir dos resultados de valor esperado, utilizando um painel de 355 *Watts*, por exemplo, pode-se verificar na Tabela 3 na última coluna, o valor de potência máxima que é gerada em cada horário, dado as condições de simulação ($Cap=10$ e $\lambda_c=1,0$). Dessa maneira, às 11:00 horas por exemplo, o banco de baterias deve ter uma capacidade na prática de 818 *Watts*. Às 16:00: 3433,5 *Watts*, e assim por diante conforme a tabela. É importante mencionar, que os valores do tempo de espera, estão baixos, por escolha (λ_e e λ_g são na casa de segundos, poderia ser minutos ou horas por exemplo), pois eles poderiam ser maiores, desde que obedecessem a taxa de geração conforme os dados de irradiação.

Tabela 3: Estimativas.

Horário do dia (Horas)	Valor esperado # <i>Bb</i>	Tempo de Espera (segundos)	Potência Painel 355 <i>Watts</i>	Valor esperado * Potência (<i>Watts</i>)
11:00	7,73	6,18	105,7	817,06
12:00	7,80	5,15	155	1209,0
13:00	9,69	5,13	201,7	1954,47
14:00	9,37	3,09	271,6	2544,89
15:00	10,9	1,09	355	3869,5
16:00	9,81	1,07	350	3433,5
17:00	9,09	2,54	288,6	2623,37
18:00	9,25	3,42	257,2	2379,1
19:00	8,79	3,07	264,0	2320,56
20:00	7,89	4,50	185,5	1463,59
21:00	7,42	5,12	144,8	1074,41

Outra análise realizada para o banco de baterias, foi calcular a estimativa da taxa de transferência da capacidade do banco de baterias no lugar Lt , ou seja, o uso da capacidade máxima do banco de baterias. O cálculo para obter esses resultados, seguem a Equação 7:

$$TempoTransferencia = (\#Lt) - (\#Lt > 0) * (\lambda_c) \quad (7)$$

Os valores obtidos estão demonstrados pelos gráficos na Figura 24 e 25:

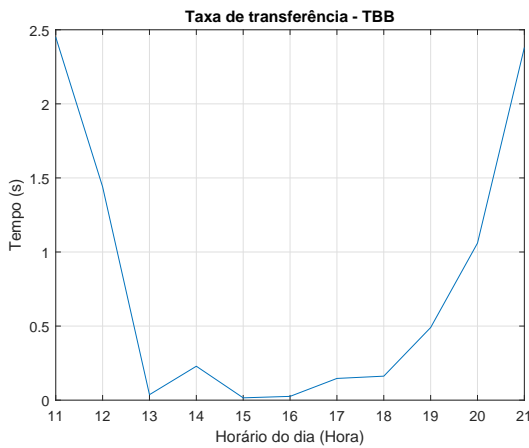


Figura 24: Taxa de transferência do lugar L_t , utilizando os valores do dia 03/01/2018.

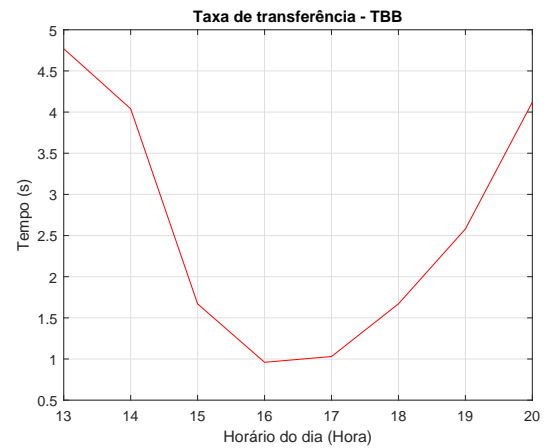


Figura 25: Taxa de transferência do lugar L_t , utilizando os valores do dia 08/06/2018.

A capacidade do lugar L_t tem um valor de marcação, ou seja uma quantidade inicial de *tokens* $Cap = 10$. Esse valor representa a capacidade máxima do banco de baterias, que conforme os disparos das transições T_g e T_c , o valor é decrementado e incrementando, respectivamente.

Pelo gráfico da Figura 24, entre os horários das 13:00 e 18:00 horas, essa taxa é menor devido os *delays* de disparo das transições T_g serem menores nesses horários, ou seja, são nesses horários que a capacidade máxima da bateria é atingida, pois as taxas estão próximas a zero, mostrando assim que a utilização e o carregamento da bateria estão mais rápidos. Outra maneira de ver o significado das estimativas na prática, é observado as estimativas do valor esperado na coluna 2 pela Tabela 3, por elas, podemos observar que nesse mesmo intervalo de horário o banco de bateria resultou em estimativas dos valores esperados próximos de 10, que é a capacidade máxima disponível no banco de baterias.

4.2.1 APLICAÇÃO 2: REDE EXTERNA

A segunda aplicação consiste em verificar a taxa de transferência no lugar *Rede*. Essa análise tem o objetivo de verificar o quanto de energia esta sendo injetado na rede, ou seja, o quanto de energia o banco de baterias deixou de acumular, devido a sua capacidade máxima. Esses valores fora obtidos na simulação conforme a Equação 8:

$$TempoTransferencia = (\#L_r > 0) / \lambda g. \quad (8)$$

Esta equação consiste em verificar a utilização do lugar Lr dividido pelo tempo de disparo da transição Tg (λg), resultando em uma taxa de transferência, (*token/segundo*):

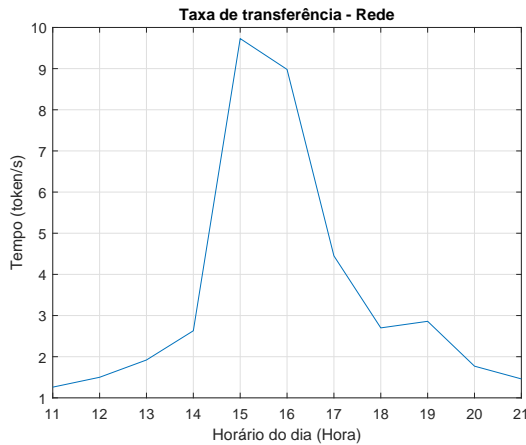


Figura 26: Taxa de transferência do lugar Lr , utilizando os valores do dia 03/01.

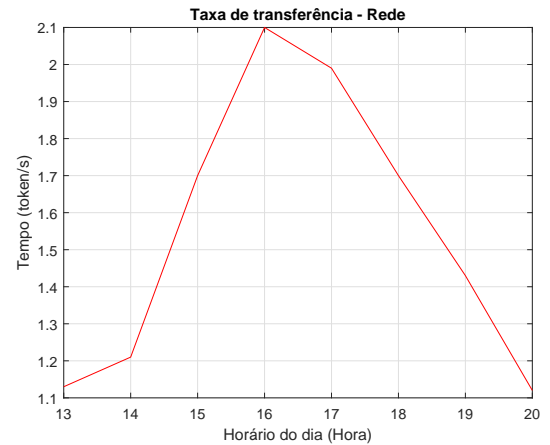


Figura 27: Taxa de transferência do lugar Lr , utilizando os valores do dia 08/06.

As figuras acima, mostram que quanto menor o tempo de disparo da transição Tg (λg), mais rápido será a taxa de transferência na rede, pois mais rapidamente será injetado *tokens* no banco de baterias ($\#Lb$), atingindo assim a capacidade máxima em um intervalo de tempo menor.

Na prática, pelas condições impostas nos *delays* λg e λc , na Figura 26 no horário das 15:00 horas por exemplo, a taxa de transferência é próximo a 10 *tokens/s*, ou seja, nestas configurações a rede recebe uma transferência máxima de 10 *tokens/s*, conforme o andamento da simulação.

Outra análise para a rede, consiste em estimar o tempo médio de espera do lugar Lr a receber um *token*, ou seja, uma quantidade de energia. Essa análise tem o objetivo de verificar a cada quanto tempo a energia esta sendo injetado na rede. Esses valores fora obtidos na simulação conforme a Equação 9:

$$TempoEspera = (\#Lr) * \lambda g. \quad (9)$$

Os resultados obtidos em ambos os dias podem ser observados nas Figuras 28 e 29:

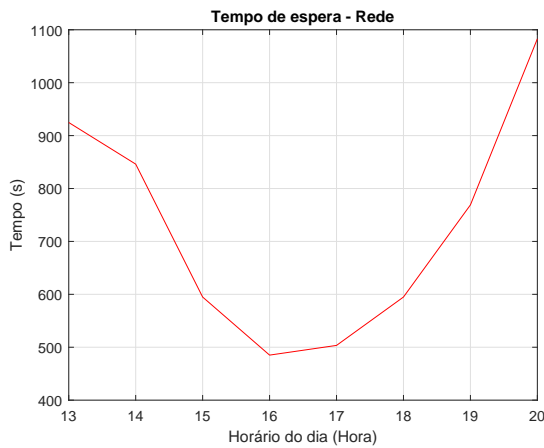


Figura 28: Tempo de espera do lugar Lr , utilizando os valores do dia 03/01.

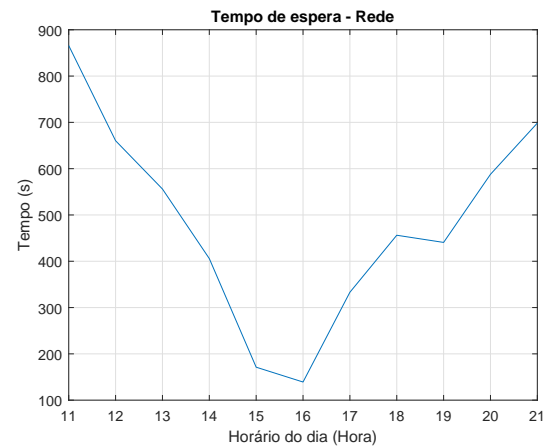


Figura 29: Tempo de espera do lugar Lr , utilizando os valores do dia 08/06.

Na prática, comparando esses resultados com o tempo de espera do lugar Lb , enquanto as 11:00 horas da manhã o tempo de espera é de 6,16 segundos, na rede é de 865,0 segundos, ou seja, os *tokens* vão ser disparados/gerados para o banco de baterias e consumidos conforme os *delays* λg e λc respectivamente, e somente quando o banco de baterias atingir o seu valor máximo de 10, o *token* irá ser direcionado para rede e não mais no banco de baterias, até que algum *token* seja consumido, liberando espaço no banco, direcionado os disparos novamente para Lb . Dessa maneira, a rede demora um tempo, comparado ao banco de baterias para receber os disparos de Tg , como mostra as figuras.

4.2.2 APLICAÇÃO 3: QUANTIDADE DE GERADORES

Essa aplicação consiste em fazer as mesmas análises das seções anteriores, a única diferença é que agora o modelo simulado é constituído de 3 geradores, para a mesma capacidade do banco de baterias (Cap) e a mesma taxa de consumo (λc), 10 e 1 respectivamente, como pode-ser verificar na Figura 30:

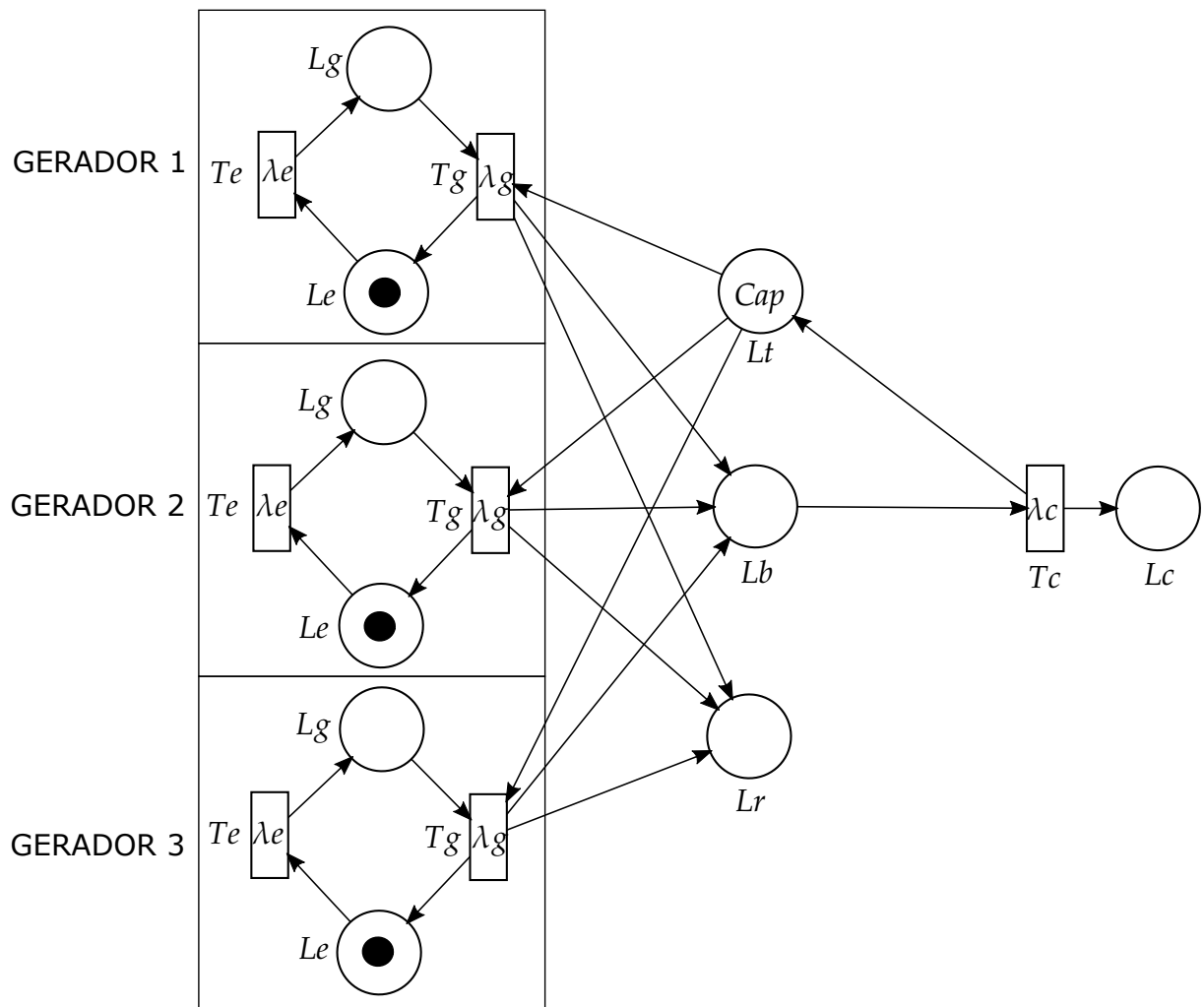


Figura 30: Modelo com 3 geradores.

Nas Figuras 31 e 32, pode-se observar a comparação entre as estimativas com apenas um gerador (curva em vermelho) e a curva em azul com os 3 geradores utilizando para o cálculo de estimativas a Equação 6. É importante observar que os *delays* de todas as transições Te e Tg (λ_e e λ_g) são iguais.

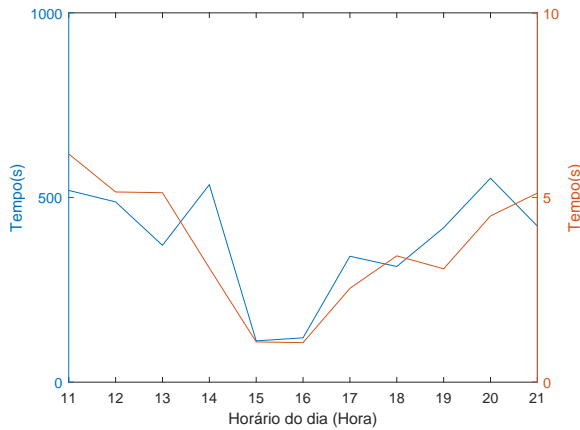


Figura 31: Tempo de espera no lugar *Lb*, utilizando os valores do dia 03/01.

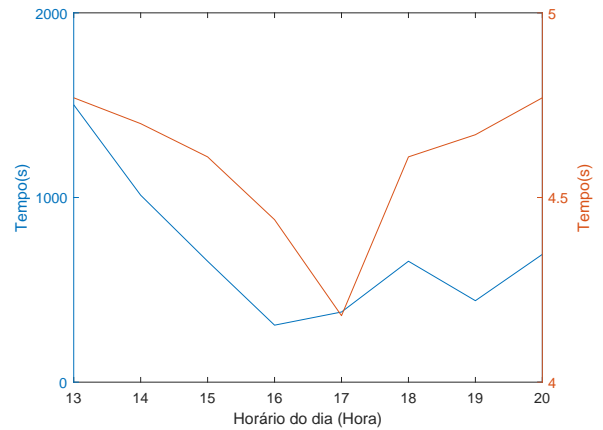


Figura 32: Tempo de espera no lugar *Lt*, utilizando os valores do dia 08/06.

Já nas Figuras 33 e 34, utilizam a Equação 7 para as estimativas. A comparação das figuras, mostra a curva em azul as estimativas com 3 geradores e em vermelho um único gerador.

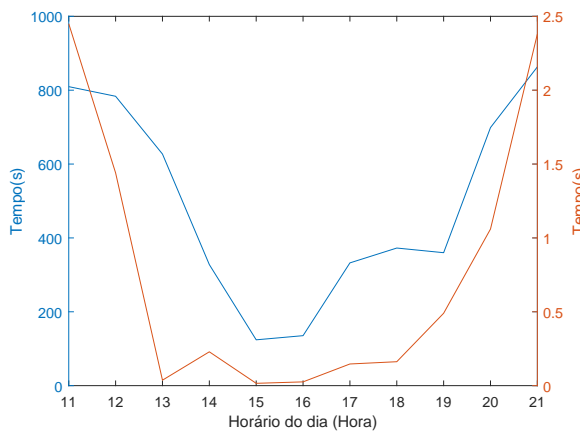


Figura 33: Taxa de transferência do lugar *Lt*, utilizando os valores do dia 03/01.

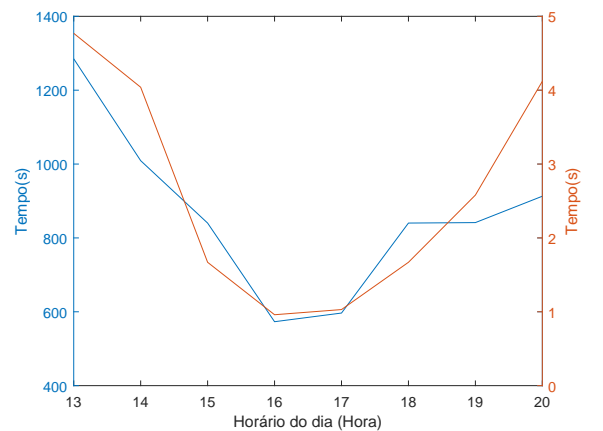


Figura 34: Taxa de transferência do lugar *Lt*, utilizando os valores do dia 08/06.

Pelos gráficos das Figuras 31, 32, 33 e 34, nota-se que o tempo de espera em ambos os dias foram estimados com valores bem maiores de tempo, devido a ter 3 geradores, disparando *tokens*. Mas, as estimativas para o banco de baterias nos lugares *Lb* e *Lt*, mostraram-se aleatórias comparadas as estimativas obtidas para um gerador. Isso se deve ao fato de que o modelo deve ser adaptado a outras distribuições de probabilidade que estão disponíveis pelo software, como Erlang, Hipo ou Hiper Exponencial, etc, a fim de absorver e melhor modelar as características do modelo, obtendo resultados significativos de estimativas.

Já para a taxa de transferência para a rede, utilizou-se a Equação 8. Na comparação, obteve-se resultados semelhantes já que a capacidade da bateria é mesma (10), conforme mostra as Figuras 35 e 36:

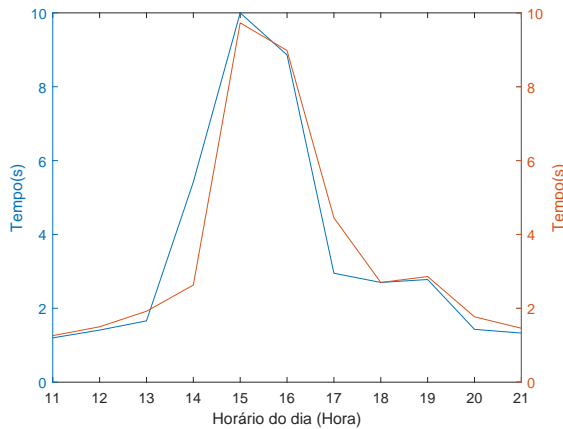


Figura 35: Taxa de transferência do lugar L_r , utilizando os valores do dia 03/01/2018.

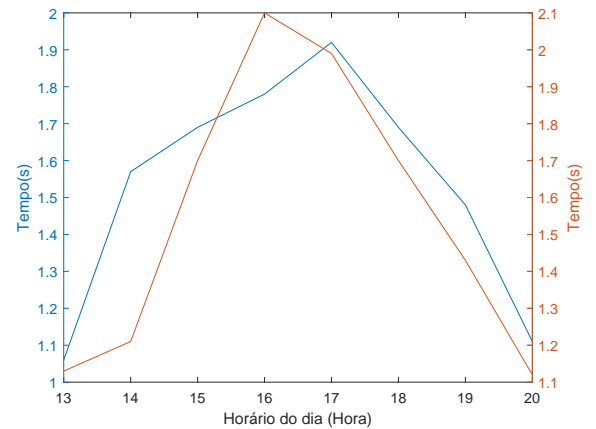


Figura 36: Taxa de transferência do lugar L_r , utilizando os valores do dia 08/06/2018.

Como as estimativas para 3 geradores em paralelo não foram satisfatórias, devido ao comportamento das curvas estimadas não serem semelhantes, em comparação com as estimativas de um único gerador. Diante disso, proponho como trabalho futuro, a modelagem e simulação do modelo com parâmetros de configuração do sistema simulado diferentes, a fim de resultar em estimativas e análises condizentes com um sistema real.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta modelos e simulações experimentais que mapeiam um sistema de geração de energia elétrica usando painéis fotovoltaicos. O modelo abstrai vários aspectos de um sistema real, capturando apenas a parte do comportamento que é relevante para o escopo das análises, como o índice de irradiação solar contrapondo em relação ao potencial de geração e a capacidade do sistema. Como resposta, o modelo estima índices de geração e utilização do sistema.

A alternativa pela modelagem em GSPN se mostrou atrativa, pois pode-se representar um grande número de cenários de geração em um curto espaço de tempo e capturar de cada um o comportamento estocástico de interesse. Em termos de geração fotovoltaica, essa abordagem pode viabilizar uma ampla gama de análises de planejamento de capacidade e cumprimento de contrato de geração, com o mínimo possível de recursos e, conseqüentemente, de custos. A abordagem é particularmente útil para a tomada de decisão e planejamento de capacidade quando se está, por exemplo, em fase de projeto e infraestrutura.

Embora os resultados para mais de um gerador, não tenham sido satisfatórios, pretendemos como trabalhos futuros, estender o modelo para cobrir uma quantidade i.e variedade maior de geradores, além de reproduzir o comportamento em simulação mais próximo do real, para assim, confrontar outras estimativas do modelo em relação aos índices medidos no sistema real de geração.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, A. N. d. E. E. Atlas de energia elétrica do brasil. **Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2002.
- ARTEIRO, R. D. et al. **Utilizando redes de Petri para modelagem de desempenho de middleware orientado a mensagem**. [S.l.]: WPerformance, 2007.
- BALBO, G.; BRUELL, S. C.; SERENO, M. Arrival theorems for product-form stochastic petri nets. **SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.**, ACM, 1994.
- BICA, D.; CRISTIAN, D. Photovoltaic laboratory for study of renewable solar energy. In: **IEEE. Universities Power Engineering Conference, 2008. UPEC 2008. 43rd International**. [S.l.], 2008. p. 1–5.
- DESROCHERS, A. A.; AL-JAAR, R. Y. **Applications of Petri nets in manufacturing systems: modeling, control, and performance analysis**. [S.l.]: IEEE, 1995.
- DEY, A.; CHAKI, N.; SANYAL, S. Modeling smart grid using generalized stochastic petri net. **arXiv preprint arXiv:1108.4139**, 2011.
- D'SA, A. Integrated resource planning (irp) and power sector reform in developing countries. Elsevier, 2005.
- ELÉTRICA, A. A. N. de E. **BIG - Banco de Informações de Geração**. 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>.
- EPE. Caderno da economia, fevereiro de 2018. **MME/EPE -Empresa de Pesquisa Energética: Rio de Janeiro, Brazil**, 2018.
- INMET, I. **Instituto nacional de meteorologia**. [S.l.]: Climatologia, 2008.
- LU, D. et al. Application of petri nets for the energy management of a photovoltaic based power station including storage units. **Renewable energy**, Elsevier, v. 35, n. 6, p. 1117–1124, 2010.
- MARSAN, M. A. et al. Modelling with generalized stochastic petri nets. J. Wiley & Sons Ltd, 1995.
- MENASCÈ, D. A.; ALMEIDA, V. A. F. **Planejamento de capacidade para serviços na web: Métricas, modelos em métodos**. [S.l.]: Editora Campus, 2003.
- MONTOYA-BUENO, S.; MUOZ, J. I.; CONTRERAS, J. A stochastic investment model for renewable generation in distribution systems. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, IEEE, v. 6, n. 4, p. 1466–1474, 2015.
- MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. **Proceedings of the IEEE**, 1989.

OLIVEIRA, L. W.; MARIA, T. C. J. Planning of renewable generation in distribution systems considering daily operating periods. **IEEE Latin America Transactions**, IEEE, 2017.

REINDERS, A.; VERLINDEN, P.; FREUNDLICH, A. **Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017.

SAUAIA, R. L. **Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, oportunidades e desafios**. [S.l.]: ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2017.

SHARMA, M. Power & energy optimization in solar photovoltaic and concentrated solar power systems. In: IEEE. **Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2017 IEEE PES**. [S.l.], 2017.

SOLAR, P. **PASSO A PASSO DA FABRICAÇÃO DO PAINEL SOLAR**. 2011. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>.

TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético no brasil. **Estudos avançados**, v. 26, n. 74, p. 247–260, 2012.

VALERO, E. Characterization of the water quality status on a stretch of river lérez around a small hydroelectric power station. **Water**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 4, n. 4, p. 815–834, 2012.

ZIMMERMANN, A.; KNOKE, M. **A Software Tool for the Performability Evaluation with Stochastic and Colored Petri Nets [M/OL]**. Berlin: Realtime Systems and RoboticsGroup, 2007 [2010-01-10].