

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE MICRORREDES PARA ATENDIMENTO DE COMUNIDADES ISOLADAS

MURILO NICOLAU*, SUSANA VIANA*, L. C. P. SILVA*, JOSÉ PISSOLATO FILHO*

**Departamento de Sistemas e Energia, DSE
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP
Campinas, SP, Brasil*

Emails: nicolau@fem.unicamp.br, vianasus@dsce.fee.unicamp.br, lui@dsee.fee.unicamp.br, pisso@dsce.fee.unicamp.br

Abstract— Access to electricity is vital to people's life quality. In Brazil there are many families without access to electric energy due to their isolated location far away from the national interconnected grid. In the world there are over two billion people without access to electricity. The implementation of microgrids with renewable generation has proven to be a viable alternative to serve this population. The implementation study of these networks is important to evaluate their technical and economic viability. An important difficulty against the execution of these studies is the collection of network data, since the access to these isolated networks is very difficult. This work demonstrates the importance that studies on the electrical network variables have for their proper operation in the present and future scenarios and how the parameters of the network can be estimated in a simplified manner. In this work several simulations are presented using the microgrid model, although not all the study possibilities are exhausted. Three consumption scenarios and the voltage profiles across the microgrid are evaluated. Also, two generation cases are studied, one with centralized and the other with decentralized generation. In both cases line losses are also evaluated.

Keywords— Microgrid, Modeling, Rural electrification, Isolated systems.

Resumo— O acesso à energia elétrica é vital para a qualidade de vida das pessoas. No Brasil existem muitas famílias sem acesso à energia elétrica devido à localização isolada onde moram. No mundo existem mais de 2 bilhões de pessoas nessa situação. A implantação de microrredes com geração renovável tem se mostrado uma alternativa viável para atender essas populações. O estudo de implantação dessas redes é importante para avaliar sua viabilidade técnica e econômica. Uma dificuldade importante encontrada nesses estudos é o levantamento dos dados das redes, pois o acesso ao local onde essas redes estão ou serão implantadas é muito difícil. Esse trabalho mostra a importância que estudos das grandezas elétricas da rede têm para seu bom funcionamento presente e futuro e como os parâmetros das redes podem ser estimados de uma forma simplificada. São estudados três cenários de consumo e é avaliado o perfil de tensão ao longo da microrrede para cada um deles. São estudados também dois casos relativos à geração, um com geração centralizada e outro com geração descentralizada, e é feita uma avaliação das perdas nas linhas em cada caso.

Palavras-chave— Microrrede, Modelagem, Eletrificação rural, Sistemas isolados

1 Introdução

Os sistemas isolados representam 3% do total do consumo de energia elétrica no Brasil (Gton, 2009).

Segundo dados do censo de 2010, cerca de 729 mil domicílios brasileiros não são atendidos por nenhuma forma de energia elétrica. O atendimento a esses domicílios pode ser feito de quatro maneiras diferentes segundo Di Lascio and Barreto (2009). Duas delas consideram a interligação desses domicílios à sistemas existentes. As outras duas consideram atendê-los de forma isolada. São elas: atendimento com nova geração distribuída e microrrede, e, atendimento com nova geração distribuída individual de fonte de energia solar fotovoltaica. Ainda segundo Di Lascio and Barreto (2009), cerca de 150 mil domicílios podem ser atendidos por essas duas topologias de sistema elétrico, sendo 100 mil através de microrredes.

Diversas microrredes têm sido implantadas no Brasil para atender comunidades isoladas (Villaça, 2011). Existem diversos estudos sobre a implantação dessas microrredes no que diz respeito às

formas de energia renovável disponíveis, aos custos de implantação e manutenção, à viabilidade de implantação com energias renováveis ou formas de energia convencionais. Mas estudos sobre o comportamento da rede e suas variáveis elétricas como tensão, potência, diferentes cenários de demanda, frequência de carga e descarga de baterias, têm sido escassos por diversos motivos. Alguns desses motivos são: a falta de dados sobre as microrredes, o tamanho das redes e a pequena quantidade de cargas instaladas. Este trabalho visa mostrar a importância desses estudos para a implantação, estudo e melhoria na utilização dessas microrredes, principalmente porque apesar de pequenas, elas tendem a crescer muito rápido devido às melhorias que elas trazem às comunidades (Cartaxo, 2000).

2 Sistemas isolados

São considerados sistemas isolados no Brasil aqueles que não estão conectados ao sistema interligado nacional (SIN). Grande parte da carga atendida por esses sistemas está localizada em áreas urba-

nas na região norte do país. Essas áreas urbanas são compostas de cidades grandes e médias, geralmente acima de 4 mil habitantes. O restante está distribuído em diversas comunidades afastadas dos centros urbanos (do Rosário et al., 2005).

2.1 Comunidades isoladas

São consideradas comunidades isoladas o agrupamento de casas afastadas dos centros urbanos e que são de difícil acesso, geralmente somente por via fluvial (Athayde et al., 2005). Essas comunidades possuem características bastante diversas entre si. A concentração de casas pode variar de apenas 5 casas até algumas centenas delas e as populações podem chegar a alguns milhares de habitantes (Pinho et al., 2008). Embora bastante diversificadas, todas essas comunidades podem ser atendidas por alguma forma de microrrede de distribuição de energia elétrica.

Essas comunidades, quando dispõe de energia elétrica, utilizam como fonte de energia geradores à diesel (do Rosário et al., 2005). Alguns problemas relativos a esta opção são o alto custo do combustível e a baixa eficiência dos geradores operando neste tipo de sistema. Devido à distância e dificuldade de acesso o custo do transporte encarece bastante o combustível. O superdimensionamento dos geradores devido à padronização da potência nominal destes faz com que o rendimento desses geradores seja muito baixo. Por exemplo, na usina termoeletrica de Maici –RO, a potência máxima consumida pelas cargas poucas vezes ultrapassa um quarto da capacidade do gerador. O consumo específico de combustível desse gerador foi medido em 0,5978 litro/kWh, sendo que a média para os geradores controlados pela Eletrobrás é de 0,2955 litro/kWh (Di Lascio and Barreto, 2009).

2.2 Curvas de carga

É muito difícil estabelecer um padrão de curva de carga para as comunidades devido às diferenças no uso da energia elétrica entre elas. Pois cada comunidade desenvolve um tipo de atividade produtiva muito diferente uma da outra. Algumas praticam a pesca e necessitam de refrigeração. Outras a produção de óleo e farinha e utilizam máquinas para moagem. Algumas possuem comércio, escola, posto de saúde. Isso diferencia bastante uma comunidade da outra na forma como utilizam a energia elétrica.

No âmbito residencial o uso é muito parecido e geralmente o consumo das casas é pequeno pois utilizam o mínimo necessário. Considera-se como necessidade básica de energia elétrica dos domicílios: iluminação, comunicação e refrigeração (Eletrobrás, 2015).

Sem dúvida, a melhor maneira de se conhecer o consumo de energia elétrica de uma comunidade

é a medição direta para aquelas que já utilizam energia elétrica, ou um levantamento de cargas para aquelas que ainda não a têm. Qualquer uma dessas alternativas envolve o deslocamento até à comunidade, o que muitas vezes é inviável.

Outra maneira seria estimar o consumo utilizando uma base de dados de comunidades com características semelhantes já disponíveis na literatura (Barbosa, 2006). Esse trabalho baseou-se nos dados de uma comunidade que já possui uma microrrede e por isso tem medições de dados de demanda.

3 Sistema simulado

Para as simulações foi selecionada a comunidade de Campinas, município de Manacapuru –AM. Segundo as características descritas na seção 2.1, essa é uma comunidade de tamanho grande e os dados de demanda disponíveis na literatura são mais precisos, pois são dados reais medidos. Isso melhora a qualidade dos resultados das simulações feitas.

A vila é composta por 126 edificações e a sua população no ano 2000 era de 1000 habitantes (Pinho et al., 2008). Essa comunidade possui um sistema fotovoltaico-diesel que foi concebido através de uma cooperação entre o Brasil e os Estados Unidos (Taylor et al., 1994). É um sistema de 50 kW cujas características são:

- Módulos fotovoltaicos totalizando 51,2 kWp;
- Sistema de armazenamento com baterias de chumbo-ácido de 240 V/192 kWh;
- Inversor de 50 kW;
- Grupo gerador diesel com dois geradores de 53 kVA cada.

O projeto original ainda previa 20 kW de geração eólica mas essa alternativa não é tecnicamente viável devido às baixas velocidades do vento na região, pelo que não foi instalada.

Durante o dia o subsistema de geração fotovoltaica alimenta diretamente a carga da vila, alimentando a microrrede através do inversor. Quando a geração de energia do arranjo fotovoltaico é superior à carga, este passa a carregar também o banco de baterias. À noite, ou durante um dia nublado ou chuvoso, o banco de baterias alimenta a vila até que chegue a descarregar 60 % de sua capacidade (profundidade de descarga máxima de 40 % para aumentar o tempo de vida útil das baterias), quando então é acionado o grupo gerador a diesel o qual opera em sua potência nominal até que o sistema de armazenamento de energia volte a estar carregado.

A topologia da rede foi estimada com base em fotos de satélite da comunidade disponíveis na internet através do serviço *maps* do *site* Google.



Figura 1: Foto do sistema completo.



Figura 2: Foto aproximada da parte 1 do sistema.

A Figura 1 mostra uma foto da comunidade toda. A partir de fotos mais aproximadas ilustradas nas Figuras 2 a 4 foi traçado um caminho provável para os condutores e foram medidas as distâncias utilizando as próprias ferramentas do *site*.

Foi considerado que a distância máxima entre dois postes deveria ser de 50 m. As distâncias medidas foram então subdivididas tendo em conta este limite de 50 m. Em cada um desses pontos foi considerado um poste que é uma barra do sistema.

A partir das fotos também é possível estabelecer os pontos de consumo de energia. Para estimar o consumo em cada barra, as edificações que aparecem nas fotos foram classificadas por tamanho. Foram considerados três tamanhos diferentes. A demanda máxima que acontece às 19 h e é igual a 33 kW (Cartaxo, 2000) foi dividida entre todas as edificações. Esses valores foram utilizados para estimar o consumo em cada barra do sistema. A Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros da rede.

4 Simulações

Com os dados da topologia da rede, mesmo que de forma aproximada, é possível fazer diversos tipos de simulações e testes para prever o comportamento da rede sob condições diferentes.

A seguir são apresentadas algumas simulações e os resultados obtidos a partir da topologia da rede descrita na seção 3.

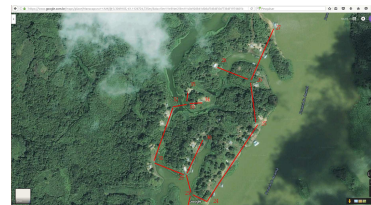


Figura 3: Foto aproximada da parte 2 do sistema.



Figura 4: Foto aproximada da parte 3 do sistema.

4.1 Parâmetros de simulação

Nas simulações foi considerado que a rede implantada é do tipo trifásica com neutro. A modelagem da rede foi feita pelo seu equivalente monofásico. O fluxo de potência foi calculado através do MATLAB®, usando a aplicação Matpower versão 5.1 (Zimmerman et al., 2011), considerando o método de Newton-Raphson e um erro de convergência de 10^{-12} . O erro de convergência menor do que o padrão (10^{-10}) foi escolhido para garantir uma melhor precisão dos resultados já que os valores de tensão e potência são menores que os dos sistemas de distribuição de energia típicos. Os valores de tensão de base e potência de base utilizados foram 220 V e 100 kVA respectivamente.

A cada hora do ano foi calculada a potência gerada pelos módulos fotovoltaicos segundo informações de temperatura e irradiância. Com esses dados e os dados da demanda foram atualizadas as informações da potência consumida e gerada em cada barra do sistema. Então foi calculado um fluxo de potência para cada hora do ano.

4.2 Dados meteorológicos

Foram utilizados dados meteorológicos horários para um ano completo referente à cidade de Belém -PA (UFSC, n.d.). A partir desses dados foi

Tabela 1: Parâmetros da rede utilizada nas simulações.

Parâmetro	Descrição
Barras	136
Ramos	135
Geração	barra 30
Carga instalada	33 kW
Carga máxima considerada	46 kW
Tensão	380 V/220 V
Extensão ramo principal	2800 m

possível calcular a potência gerada pelo sistema fotovoltaico a cada hora utilizando as equações 1 e 2.

$$P_{mp}(G_I, T_{cel}) = P_{mpstc} \frac{G_I}{G_{stc}} (1 + \gamma (T_{cel} - T_{stc})) \quad (1)$$

$$T_{cel} = T_{amb} + \frac{NOCT - 20}{800} G_I \quad (2)$$

Os termos P_{mpstc} , G_{stc} , γ , T_{stc} e $NOCT^1$ são constantes e são dados pelo fabricante do módulo solar. A variável G_I é a irradiância que atinge o módulo fotovoltaico e a variável T_{cel} é sua temperatura e é calculada a partir da equação 2 sendo T_{amb} a temperatura ambiente.

4.3 Cabos

Uma questão fundamental durante o projeto de uma rede de distribuição de energia é escolher a bitola dos cabos que serão utilizados. A bitola mínima para os cabos é limitada pela demanda projetada. A bitola máxima é limitada pelo valor financeiro disponível para investimento. Assim existe um compromisso entre o custo e a queda de tensão nas linhas considerada aceitável.

Foram consideradas três bitolas (16, 25 e 35 mm²) de cabo multiplex de quatro condutores para simulação do perfil de tensão ao longo da rede. Os valores de resistência e reatância considerados nas simulações estão na referência (Nexans, 2013).

Os resultados dessa simulação considerando os três tipos de cabos diferentes e a rede conforme descrita na seção 3 operando na demanda máxima (33 kW) são apresentados na figura 5. Nota-se que o cabo 16, apesar de suportar a corrente de demanda máxima da rede não atende os requisitos de tensão (mínima de 0,92 pu e máxima de 1,05 pu) de atendimento de consumidores segundo o documento PRODIST da ANEEL. O cabo 25 não atende para o horário de pico conforme a figura. Já o cabo 35, atende para todos os horários.

4.4 Demanda

Um fenômeno que geralmente acompanha a eletrificação de comunidades isoladas é que a população da localidade tende a crescer mais rapidamente. Isso é devido principalmente à melhora do conforto e qualidade de vida que o acesso à eletricidade causa e também na possibilidade de aumento na renda da população, pois possibilita a aquisição de máquinas e equipamentos que aumentam a produtividade das atividades realizadas

¹ P_{mp} , potência no ponto de potência máxima em função da irradiância e da temperatura das células dos módulos FV, P_{mpstc} potência máxima para as condições padrão de irradiância ($G_{stc} = 1000 \text{ W/m}^2$) e temperatura ($T_{stc} = 25 \text{ °C}$), γ , coeficiente de variação de potência com a temperatura e $NOCT$ (Normal Operating Cell Temperature).

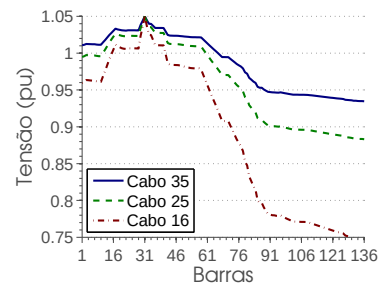


Figura 5: Perfil de tensão para diferentes tipos de cabos.

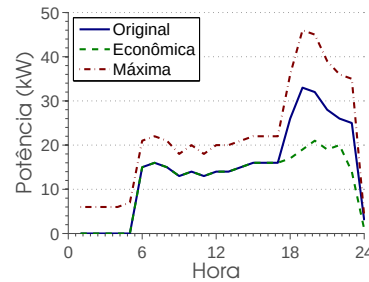


Figura 6: Perfis de demanda considerados nas simulações.

no vilarejo. Assim foram simulados diferentes perfis de demanda e analisados os impactos que essas alterações causam no comportamento da rede.

Os perfis de demanda simulados são mostrados na Figura 6. Os perfis de demanda foram denominados: Original, Econômica e Máxima.

Original Demanda da comunidade de Campinas medida em Agosto de 1997 ².

Econômica Demanda considerando a substituição de lâmpadas incandescentes, muito utilizadas na época da medição, por lâmpadas de baixo consumo.

Máxima Demanda considerando um aumento no consumo devido ao aumento de cargas instaladas no sistema até o limite máximo dimensionado na seção 3.

Uma diferença importante entre a demanda Máxima e as outras duas é a presença de consumo de eletricidade entre 1 h e 6 h. Foi considerado um consumo aproximado de 6 kW que é o consumo referente à refrigeração de alimentos (Cartaxo, 2000).

O perfil das tensões para cada um dos níveis de demanda considerados são mostrados na Figura 7. Esse resultado foi obtido para a máxima demanda do dia, ou seja, às 19 h considerando o cabo de 35 mm².

²Como só estão disponíveis dados de demanda de potência ativa não foi considerado o consumo de potência reativa nas simulações desse trabalho.

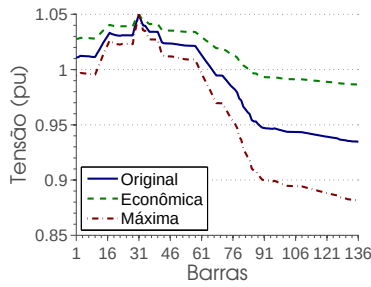


Figura 7: Perfil de tensão para diferentes demandas.

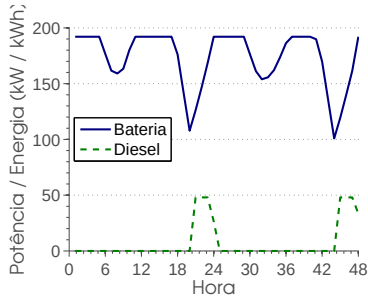


Figura 8: Energia armazenada na bateria e acionamento do gerador a diesel considerando a demanda denominada Original.

Também foram simulados o comportamento da bateria e do gerador diesel com a variação da demanda. O conjunto bateria, inversor e gerador diesel foi modelado como um gerador de 50 kW. A barra onde esse conjunto é conectado é a barra de balanço (*slack*) do sistema. Assim se a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos é insuficiente para alimentar as cargas, essa energia é suprida pelo conjunto bateria/inversor/diesel. O balanço de energia da barra *slack* é calculado utilizando-se as equações 3 e 4.

$$P_{gerador} = P_{cargas} + P_{perdas} - P_{mp} \quad (3)$$

$$P_{gerador} = P_{diesel} + P_{bateria} \quad (4)$$

A Figura 8 mostra o nível de carga da bateria e a utilização do gerador de apoio diesel ao longo de dois dias consecutivos. Nota-se que por volta das 6 h há uma queda na carga da bateria. Isso ocorre porque há consumo de energia pelos consumidores mas ainda não há irradiância suficiente para que os módulos fotovoltaicos supram essa demanda. Por volta das 12 h a bateria recupera seu nível máximo de carga devido ao pico de produção de energia pelo sistema fotovoltaico. Após as 18 h acontece uma descarga mais profunda da bateria, atingindo seu nível mínimo permitido (60 % da carga total), necessitando do apoio do gerador diesel para suprir a demanda que atinge seu nível máximo quando não há mais geração fotovoltaica.

A Figura 9 apresenta um comportamento parecido. A diferença está no menor tempo de fun-

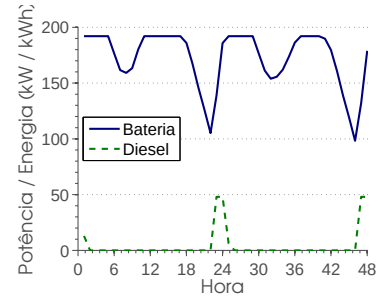


Figura 9: Energia armazenada na bateria e acionamento do gerador a diesel considerando a demanda denominada Econômica.

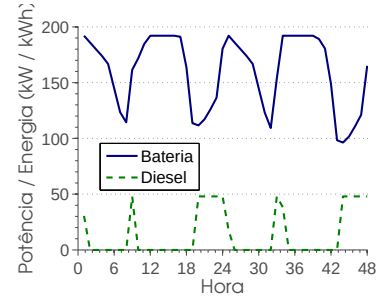


Figura 10: Energia armazenada na bateria e acionamento do gerador a diesel considerando a demanda denominada Máxima.

cionamento do gerador diesel devido à menor demanda.

O nível de carga da bateria foi calculado pela equação 5, sendo E_{bath} a energia armazenada na bateria na hora h e $\Delta t = 1$ hora.

$$E_{bath} = E_{bat(h-1)} + [P_{mp} + P_{diesel} - (P_{cargas} + P_{perdas})]\Delta t \quad (5)$$

A Figura 10 apresenta o caso em que foi considerada a demanda Máxima. A bateria apresenta duas descargas profundas ao longo do dia, necessitando de um maior apoio do gerador diesel. Nesse caso a capacidade atual da bateria é insuficiente para esse nível de demanda.

4.5 Perdas

A partir do modelo da rede também é possível simular as perdas nos condutores da rede. Foram feitas duas simulações, uma considerando a rede sem alterações (seção 3) e uma considerando a geração fotovoltaica distribuída pela rede.

As perdas totais foram calculadas segundo a equação 6, sendo P_{mk} o fluxo de potência ativa da barra m para a barra k e P_{km} o fluxo de potência ativa da barra k para a barra m .

$$\text{Perdas totais} = \sum (P_{mk} + P_{km}) \quad (6)$$

A geração fotovoltaica foi distribuída da seguinte maneira: 50 % dos 51,2 kWp foi mantida

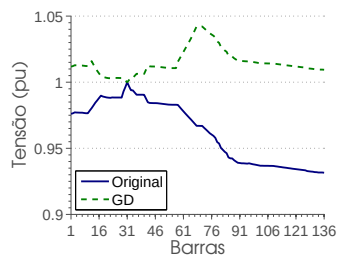


Figura 11: Tensões nas barras.

na barra 30, 25 % na barra 11 e os outros 25 % na barra 67. A diferença nas perdas entre o caso sem alterações e com geração distribuída, considerando o ano todo, foi uma redução de 18,1 % nas perdas.

Também foi analisada a alteração no perfil de tensões do sistema no horário (13 h) de máxima geração solar em um dia típico. Esse resultado é apresentado na Figura 11 onde é possível ver que o limite máximo para a tensão de 1.05 pu de acordo com o PRODIST não é ultrapassado.

5 Conclusão

Apesar de não existirem informações precisas, colhidas *in loco*, sobre microrredes e sistemas isolados é possível modelar essas redes e realizar estudos mais detalhados sobre elas. A quantidade de dados disponíveis através de trabalhos que foram realizados em comunidades isoladas e a possibilidade de ter um mapa dessas comunidades permite modelar a microrrede implantada ou a ser implantada sem que hajam deslocamentos ao local. A partir desse modelo podem ser simulados diversos cenários para o funcionamento das microrredes, o que permite otimizar o seu funcionamento e garantir a qualidade da energia fornecida aos consumidores no presente e no futuro.

6 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do financiamento do projeto 400466/2014-7.

Referências

- Athayde, M. R., Martins Filho, J. S. L. and Júnior, A. C. B. (2005). Avaliação da sustentabilidade de sistemas de energia em comunidades isoladas, *Congresso da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica*.
- Barbosa, C. F. d. O. (2006). *Avaliação tecnológica, operacional e de gestão de sistemas híbridos para geração de eletricidade na região*

amazônica, Master's thesis, Universidade Federal do Pará.

- Cartaxo, E. F. (2000). *Fornecimento de Serviço de Energia Elétrica para comunidades isoladas da Amazônia: Reflexões a partir de um estudo de caso*, PhD thesis, Campinas, SP: UNICAMP. Faculdade de Engenharia Mecânica-FEM.
- Di Lascio, M. A. and Barreto, E. J. F. (2009). *Energia e desenvolvimento sustentável para a Amazônia rural brasileira: eletrificação de comunidades isoladas*, Kaco.
- do Rosário, L. T. R., Van Els, R. and Júnior, A. C. B. (2005). Alternativas energéticas para comunidades isoladas da amazônia: A energia hidrocinética no maracá, sul do amapá.
- Eletrobrás (2015). *Especificações Técnicas dos Programas para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados no âmbito do Programa Luz para Todos*.
- Gton (2009). Sistemas elétricos isolados: Análise do mercado de energia elétrica, *Technical report*, Grupo Técnico Operacional da Região Norte - Eletrobrás.
- Nexans (2013). *Alumínio: Condutores Isolados e Cobertos*.
- Pinho, J. T., Barbosa, C. F. O., Pereira, E. J. d. S., Souza, H. M. S., Blasques, L. C. M., Galhardo, M. A. B. and Macêdo, W. N. (2008). *Sistemas híbridos*, Brasília: Ministério de Minas e Energia.
- Taylor, R. W., Leboeuf, C., Moszkowicz, M. and Valente, L. G. (1994). Joint us/brazilian renewable energy rural electrification project, *Photovoltaic Energy Conversion, 1994., Conference Record of the Twenty Fourth. IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1994, 1994 IEEE First World Conference on*, Vol. 2, IEEE, pp. 2383-2386.
- UFSC (n.d.). Arquivos climáticos em formato try, swera, csv e bin.
URL: <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>
- Villaça, A. L. (2011). *A implantação de mini-redes de energia solar em comunidades isoladas do amazonas*, Master's thesis, Universidade Federal de Lavras.
- Zimmerman, R. D., Murillo-Sanchez, C. E. and Thomas, R. J. (2011). Matpower: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education, *IEEE Transactions on Power Systems* **26**(1): 12-19.