



# GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EÓLICA-FOTOVOLTAICA

**Danilo Cachina 1, Marllen Santos 2, Mario González 3**

1, 2 e 3 Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRN

Campus Universitário Lagoa Nova, Natal/RN, Brasil

[danilocachina@hotmail.com](mailto:danilocachina@hotmail.com), [marllenylla@hotmail.com](mailto:marllenylla@hotmail.com), [mario@ct.ufrn.br](mailto:mario@ct.ufrn.br)

## RESUMO

*O objetivo deste artigo é propor um modelo conceitual para implantação de sistemas híbridos de geração distribuída eólico-fotovoltaicos que possa ser aplicado em qualquer tipo de organização. Para tanto foi necessário compreender a Resolução Normativa 482/2012 quanto à sua aplicação e aos benefícios percebidos, bem como identificar as principais tecnologias, equipamentos, vantagens e desvantagens relacionadas a sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos por meio de uma revisão sistemática da literatura. O modelo proposto é dividido em sete passos: seleção do local, caracterização do local, estudo dos recursos, balanço energético, dimensionamento do sistema, análise de viabilidade com simulação e análise de cenários futuros.*

**Palavras-chave:** *Sistemas Híbridos, Energia Solar Fotovoltaica, Energia Eólica, Geração Distribuída.*

## 1 INTRODUÇÃO

Apesar do crescente fomento à geração de energia por fontes complementares, os sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos ainda são pouco explorados no Brasil, ainda que no país os potenciais de geração dessas duas fontes sejam enormes. A motivação para realização deste estudo consiste na lacuna identificada por meio de pesquisas em estudos específicos do setor energético, artigos, dissertações e teses, que aponta a necessidade de desenvolvimento de modelos para implantação de sistemas híbridos de geração distribuída através de energias complementares e que permitam uma análise de suas principais variáveis e aspectos técnico-econômicos.

### 1.1 Método da pesquisa

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica sistemática em base de dados sobre os temas: energia eólica (40 artigos selecionados); energia solar fotovoltaica (33 artigos selecionados) e sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos (7 artigos). Além disso, uma pesquisa bibliográfica tradicional foi conduzida em livros e artigos a respeito do tema análise de viabilidade econômica. O presente artigo é um recorte da pesquisa desenvolvida e, por isso, nem todas as referências originalmente utilizadas foram inseridas aqui, mas apenas as principais.

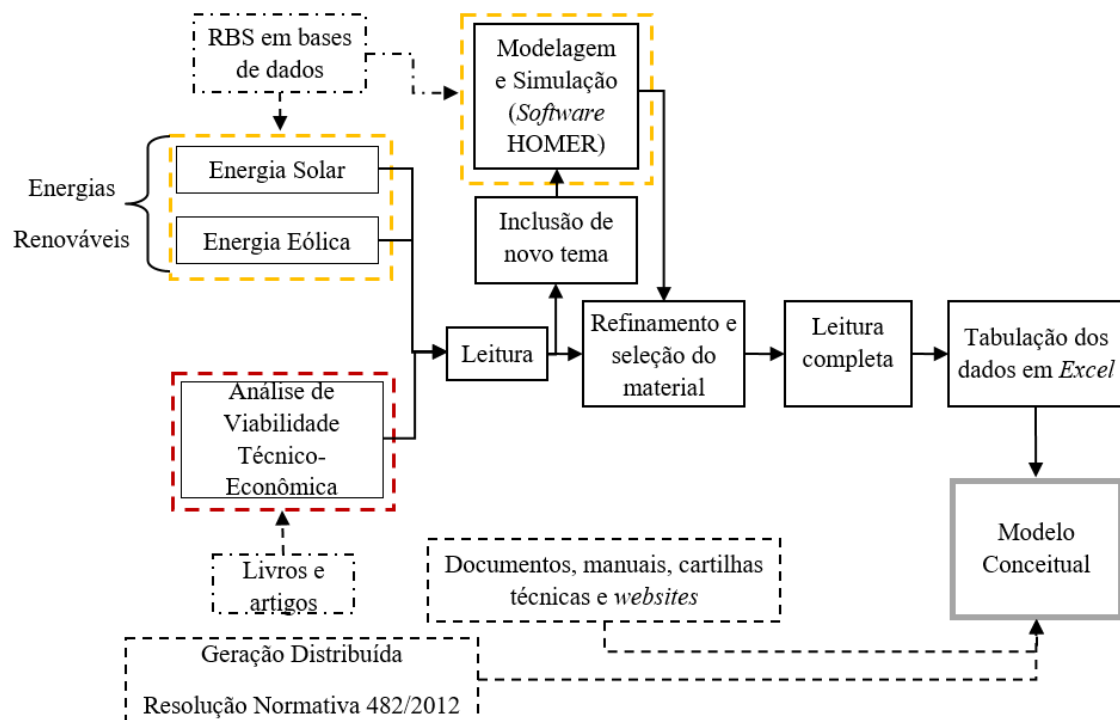


Figura 1 – Passo a passo utilizado para proposição do Modelo. Fonte: Elaboração própria.

Os dados foram reunidos em uma representação esquemática, compondo um modelo de implementação cujo objetivo é servir de base para replicação em quaisquer organizações.

## 2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS E SISTEMAS EÓLICOS

### 2.1 Geração distribuída

A geração distribuída pode ser compreendida através da Resolução Normativa da ANEEL (2012) nº 482 que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e sobre o sistema de compensação. São consideradas duas



modalidades de geração distribuída e um sistema de compensação de energia, que assumem as seguintes definições:

I - Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utiliza fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

II - Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

III - Sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade onde os créditos foram gerados, desde que possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ) junto ao Ministério da Fazenda.

O uso da geração distribuída pode ocasionar impactos na rede elétrica, tanto positivos quanto negativos. Dentre os considerados positivos podem ser citados [1]: a geração de energia ocorre próximo ao consumo, o que resulta na redução dos custos e perdas no processo de transmissão de energia; incremento de energia na rede elétrica, aumentando a sua disponibilidade; o alívio da carga dos geradores convencionais permite que estes sejam utilizados para absorção de reativos da rede; rapidez, praticidade e versatilidade de instalação dos geradores; possibilidade de geração de energia a um custo mais baixo do que o praticado pela distribuidora; incentivo à autoprodução e desenvolvimento do mercado, gerando empregos e movimentando a economia.

A respeito dos impactos negativos podem ser citados [2]: reajustes do sistema de proteção para a nova realidade da rede, isso se deve ao fato de que o sistema foi originalmente estruturado para uma operação unilateral com distribuição radial; aumento considerável dos custos necessários para fazer o controle do perfil da tensão do lado da transmissão; a operação dos autoprodutores fica sob responsabilidade dos mesmos, o que pode resultar em manobras de desligamento que podem afetar a proteção da rede; inserção de harmônicos por parte dos inversores presentes nos sistemas de geração



a partir de fontes geradoras de corrente contínua; falta de informação sobre os diversos geradores que serão acrescentados à rede; pode levar ao aumento de ocorrências de sobretensão na rede.

Pode-se constatar que as maiores desvantagens relativas à geração distribuída são relativas ao planejamento da rede elétrica, e não propriamente a fraquezas ou aspectos negativos dessa modalidade de geração. Por isso, as vantagens devem ser consideradas relevantes a despeito das desvantagens, visto que os benefícios que podem ser alcançados através da geração distribuída são consideráveis.

Essa pesquisa delimita-se à minigeração híbrida de energia eólico-fotovoltaica com o intuito explicitar os meios para a obtenção das vantagens da geração distribuída, principalmente o da compensação de energia (*net metering*) definida na Resolução Normativa 482/2012.

## 2.2 Sistemas Solares Fotovoltaicos

Considerando todas as novas formas de geração de energia elétrica, o uso de energia solar fotovoltaica vem se mostrando como uma alternativa importante, economicamente viável e ambientalmente aceita [3].

Um sistema típico de energia solar fotovoltaica é composto por quatro principais elementos [4, 5]: módulos fotovoltaicos para coleta da radiação solar, que são conjuntos de células fotovoltaicas; suportes estruturais para orientação espacial dos módulos; inversores, que são equipamentos que convertem a energia gerada em corrente contínua pelos módulos fotovoltaicos para corrente alternada. Isto faz com que o sistema seja compatível com as redes de distribuição de energia e equipamentos elétricos/eletrônicos comumente utilizados; controlador de carga, no caso de sistemas isolados; conjunto de baterias, no caso de sistemas isolados.

As duas principais classificações de sistemas fotovoltaicos são *on-grid* (ou conectados à rede) e *stand alone* (ou isolados). Sistemas *on-grid* estão diretamente ligados à rede elétrica tradicional, no qual a energia excedente é injetada na rede, o que isenta a utilização de baterias. Os sistemas conectados à rede de distribuição de energia permitem o ingresso no sistema de compensação de energia da normativa 482/2012, e é caracterizado pela conexão do sistema de autoprodução, por meio de inversores, na rede. Já os sistemas isolados necessitam de baterias integradas ao sistema com o objetivo de armazenar energia para que possa ser utilizada quando não há irradiação solar para geração de energia. Geralmente são utilizados em áreas remotas.

### 2.2.1 Procedimentos para instalação de sistemas fotovoltaicos visando a geração distribuída

Como pode ser observado na Figura 2, um método de cinco etapas foi utilizado para instalação de um sistema fotovoltaico em uma universidade federal. O autor utilizou os programas Google Earth 2014 e Sketchup versão 8, a fim de verificar os possíveis layouts do sistema; e o Radiosol, para o levantamento de dados de radiação solar [6].

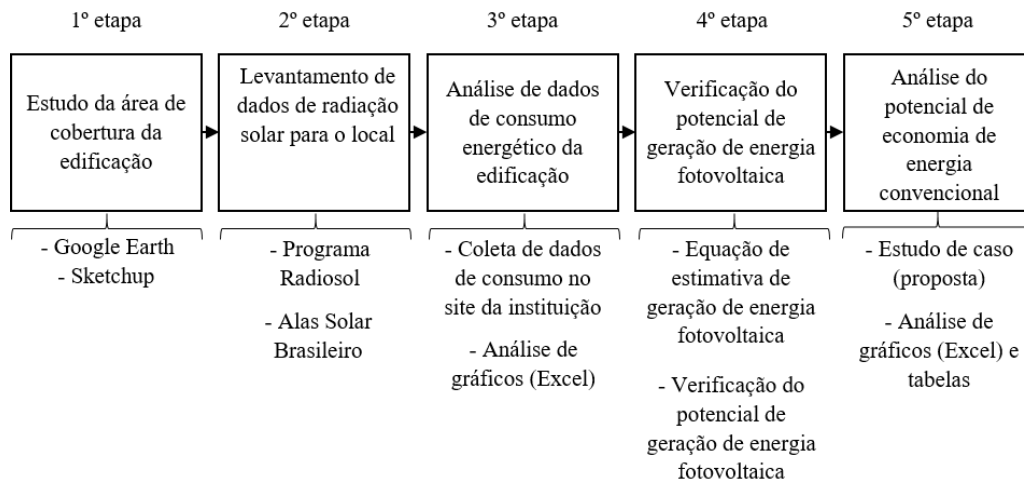


Figura 2 – Etapas para instalação de sistema fotovoltaico no prédio administrativo da UFPEL. Fonte: Elaboração própria baseado em [6].

Em outro método, para o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico residencial foram definidas as coordenadas de uma residência com quatro moradores cujo consumo típico equivale à 400 kWh/mês, indicando ainda a utilização do software SolarEnergy300 para simulação do estudo [7].

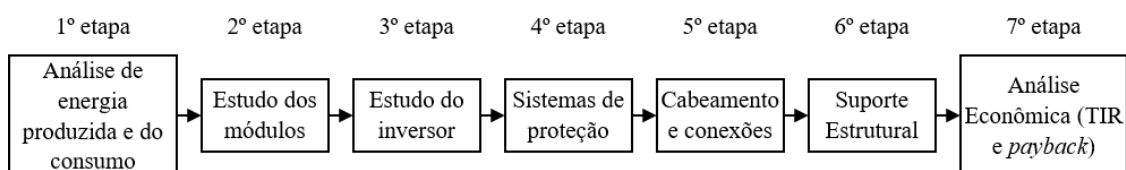


Figura 3 – Etapas para instalação de sistema fotovoltaico em uma residência. Fonte: Adaptado de [7].

Um método prático proposto por [8, 9] sugere 16 passos para instalação de um sistema de módulos fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de energia elétrica (Figura 4), englobando desde o dimensionamento do sistema através do simulador até as fases de vistoria e acompanhamento por parte da distribuidora e do dono do sistema, respectivamente.



Figura 4 – Passo a passo para instalação de sistema de geração distribuída solar fotovoltaico. Fonte: Adaptado de [8, 9].

A parte técnica não é contemplada de maneira detalhada, inclusive, há a proposição de contratação, na etapa 2, de uma empresa especializada para se responsabilizar por essa parte técnica e burocrática. Um procedimento para fins práticos de conexão do sistema fotovoltaico à rede, estabelecido por [10], aborda as fases e alguns prazos que devem ser seguidos pelas centrais geradoras junto à concessionária distribuidora de energia. O procedimento engloba a solicitação e emissão do parecer de acesso; compra, instalação e geração; solicitação e realização de vistoria; regularização de aspectos técnicos, solicitação e aprovação do ponto de acesso; e efetivação da conexão.

### 2.3 Sistemas Eólicos

A energia eólica é proveniente de um recurso abundante, renovável, limpo, disponível em muitas regiões do Brasil. Para o aproveitamento da energia cinética dos ventos, isto é, do recurso eólico para

geração de eletricidade, são necessários, *a priori*, os seguintes componentes: turbina eólica, gerador e transformador [11], conforme a Figura 5.

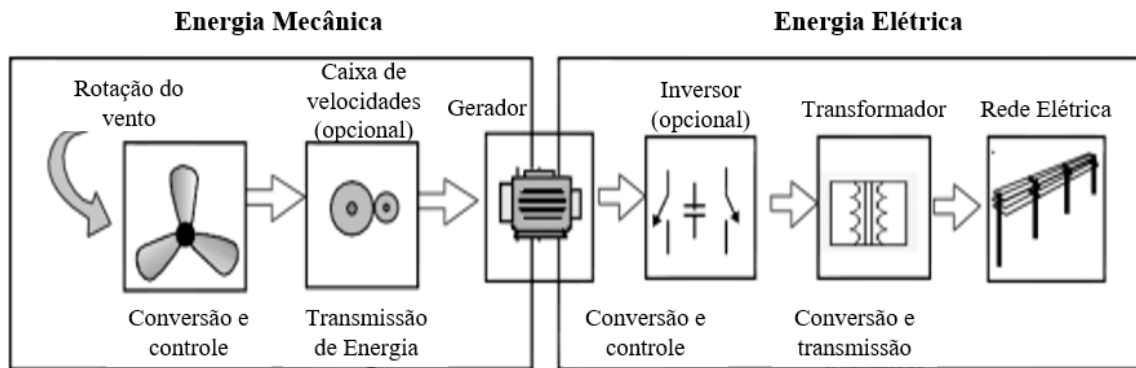


Figura 5 – Principais componentes do sistema eólico. Fonte: Adaptado de [12].

Basicamente, como pode-se observar na Figura 5, quando o vento atinge as pás da turbina eólica, converte-se energia cinética em mecânica, e logo em seguida, após passar pelo gerador, em energia elétrica, cuja corrente pode ser alternada ou contínua (havendo necessidade, nesse caso, do inversor para transformá-la em alternada), depois passa pelo transformador para só depois, na tensão adequada, ser injetada na rede elétrica.

### 2.3.1 Procedimentos para instalação de sistemas eólicos visando a geração distribuída

O estudo de [13] apresenta as principais questões a serem verificadas para a análise de viabilidade e gestão de projetos de parques eólicos, conforme pode ser visualizado na Figura 6.

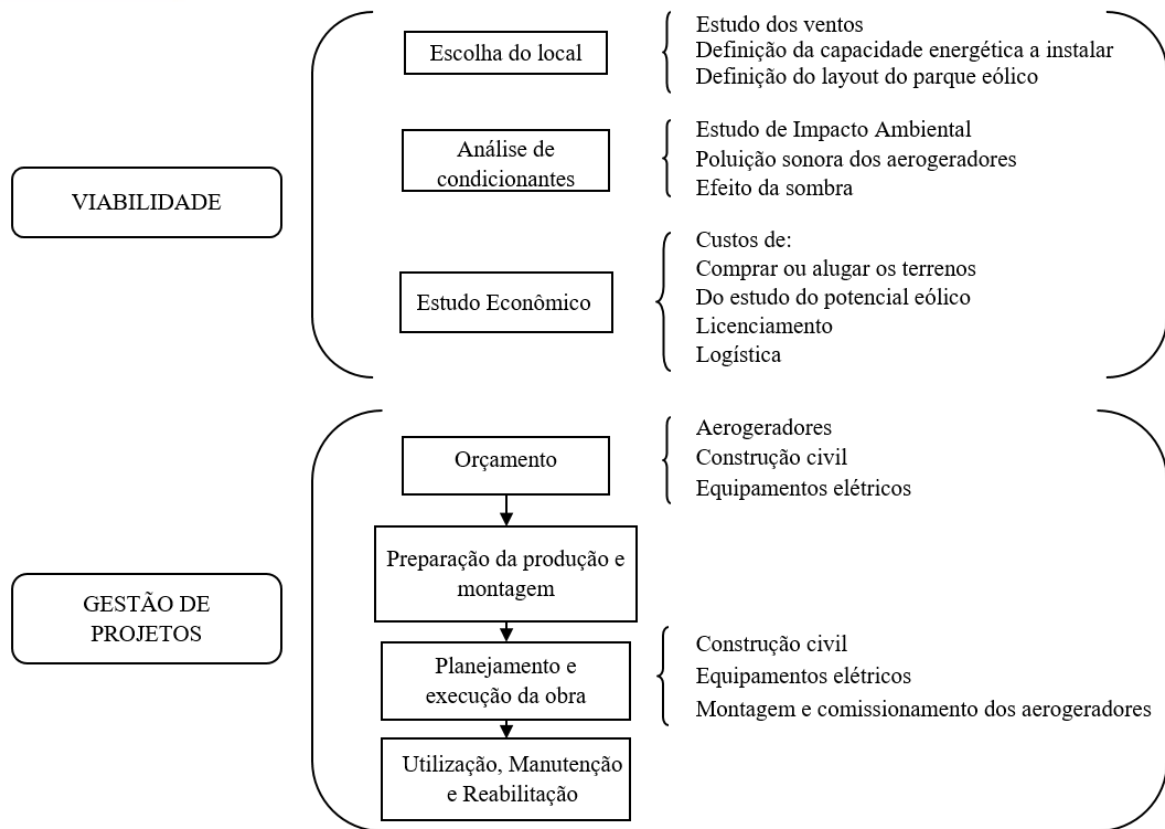


Figura 6 – Questões a serem consideradas na análise de viabilidade e gestão de projetos de parques eólicos. Fonte: Elaboração própria baseado em [13].

O modelo preconiza que deve-se considerar a definição da capacidade energética a ser instalada, e, por fim, devem ser levantados todos os custos detalhadamente, relativos à aquisição de equipamentos, construção civil, logística, licenciamento, operação e manutenção [13].

O método exposto na Figura 7 também considera, além da escolha dos aerogeradores, fatores como relevo e obstáculos devem ser observados, bem como estudo dos impactos e as condições para acesso à rede elétrica [14].



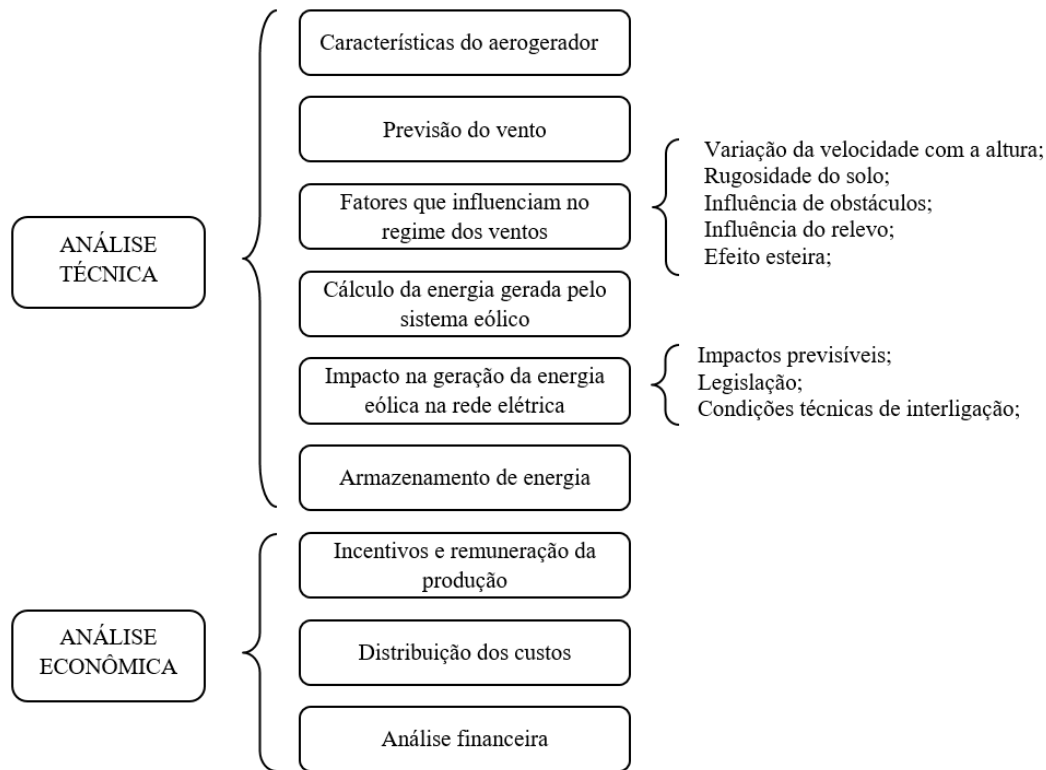


Figura 7 – Procedimentos para análise de viabilidade técnica e econômica de parques eólicos. Fonte: Elaboração própria baseado em [14].

Já a análise econômica compreende a perspectiva de remuneração pela produção, incentivos, o dimensionamento da distribuição de custos (Figura 7). Porém, vale salientar que o Brasil não trabalha com sistema de remuneração da energia produzida pelos micros e miniprodutores de energia, entretanto existem outros incentivos como o da compensação de energia, pela normativa 482/2012.

O estudo [15] trata do processo de construção de um parque eólico industrial, Figura 8, e destaca a escolha do local, o estudo do regime dos ventos, o estudo geológico-geotécnico, a caracterização dos acessos e a construção civil.

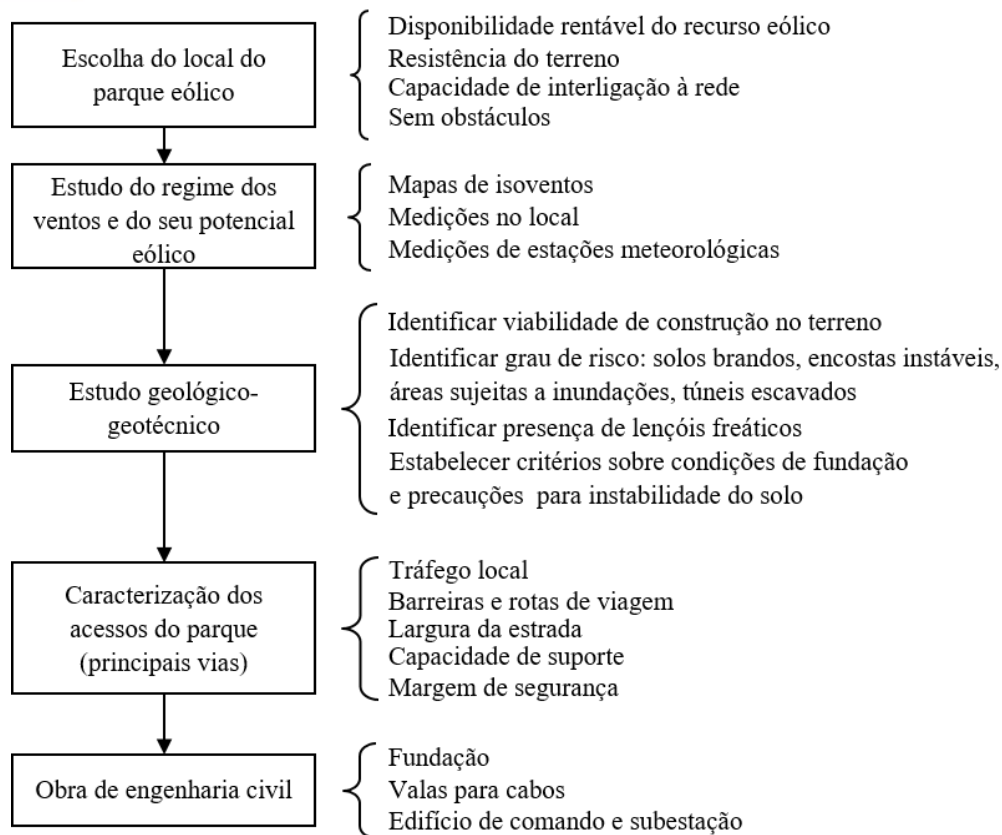


Figura 8 – Processo de construção de um parque eólico. Fonte: Adaptado de Gouveia [15].

A análise desses três estudos sobre parques eólicos permite compreender processos que estão também presentes na geração distribuída e em qualquer tipo de sistema de geração eólico, como estudo do local, dos ventos, construção civil e estudos econômicos. Frente ao exposto, pode-se constatar que existem inúmeros procedimentos e uma quantidade elevada de parâmetros a serem considerados para projeto e instalação de sistemas eólicos.

### 3 MODELO CONCEITUAL

O principal contributo deste artigo foi a elaboração do Modelo Conceitual (Figura 9) para instalação de sistemas híbridos de geração distribuída utilizando *software* para simulação dos dados. O Modelo Conceitual foi baseado na revisão de literatura desenvolvida no Tópico 2 deste artigo.

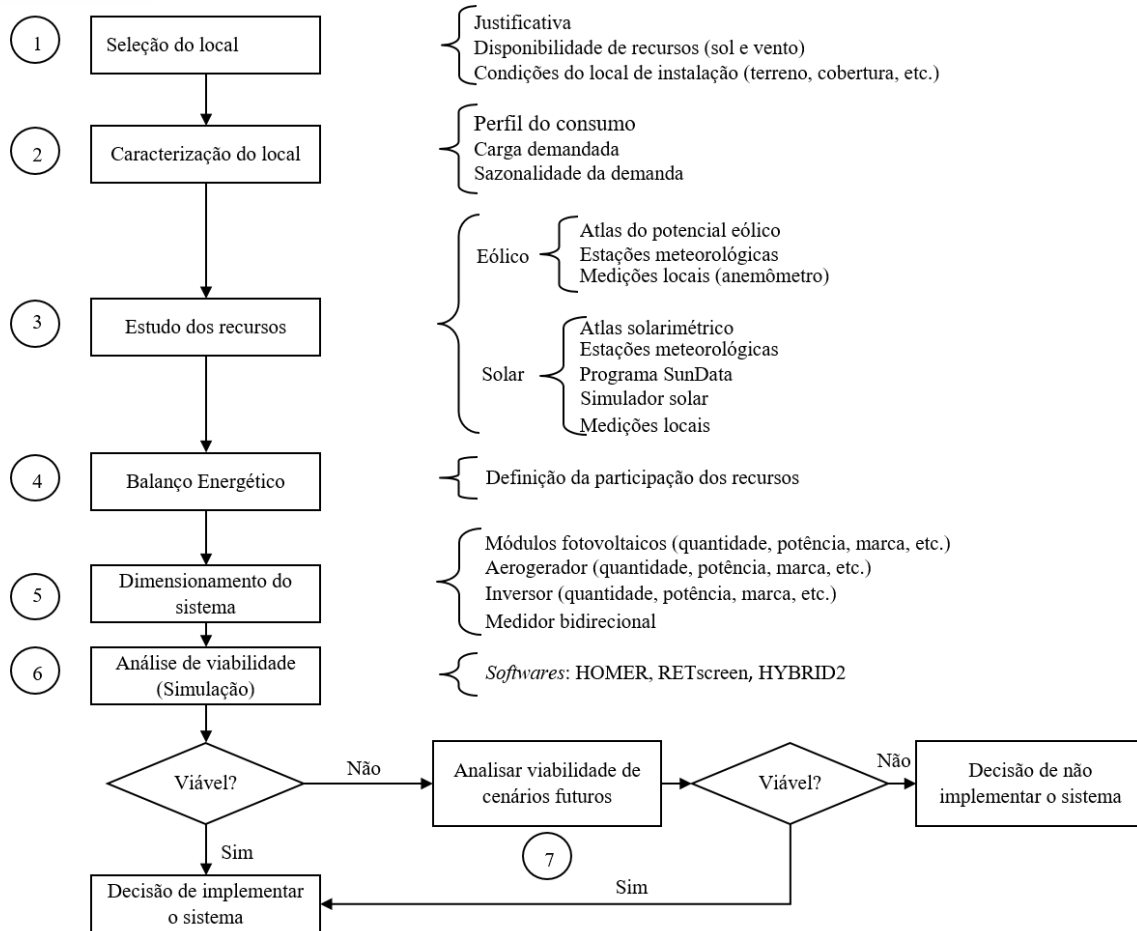


Figura 9 – Modelo conceitual do procedimento para implementação de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos de geração distribuída utilizando software para simulação. Fonte: Elaboração própria.

O primeiro passo do modelo consiste em selecionar o local com base em uma justificativa; na disponibilidade qualitativa de recurso (eólico e fotovoltaico); nas condições do local de instalação do sistema (se o terreno suporta, se a cobertura da edificação está íntegra, etc.); na verificação da capacidade de interligação do sistema à rede elétrica da distribuidora de energia, já que a meta é a compensação de energia; e da identificação de obstáculos e impedimentos à produção de energia, como edificações perto do aerogerador, sombras de prédios sobre a cobertura onde serão instalados os módulos fotovoltaicos.

O segundo passo diz respeito à caracterização do local selecionado para implementação do sistema híbrido. Para isso deve-se verificar o perfil de consumo do local, a sazonalidade da demanda, a carga consumida ao longo de um ano, tarifas e peculiaridades do local.

Já o terceiro passo compreende o estudo dos recursos solar e eólico. Para avaliação do recurso eólico existem algumas ferramentas como Atlas do potencial eólico da ANEEL, dados das estações



meteorológicas que podem ser coletados no site do INMET, e através de medições executadas no local por meio de equipamentos como o anemômetro.

Já avaliação do recurso solar pode se dar por intermédio do Atlas Solarimétrico de 2008 da ANEEL, de dados de estações meteorológicas do site do INMET, pelo programa SunData que identifica dados de irradiação solar para cada coordenada existente em seu banco de dados. Também pode ser feita através do programa simulador da AMERICADOSOL disponível em seu site e por medições realizadas no local de instalação dos módulos fotovoltaicos com equipamentos, como o piranômetro.

O quarto passo envolve o balanço energético, que ocorre com a definição do projetista, com base na disponibilidade de recursos financeiros e na estratégia da organização, da participação da fonte eólica e da fotovoltaica a fim de compor o sistema.

O quinto passo diz respeito ao dimensionamento do sistema híbrido, isto é, a determinação da quantidade e especificação dos equipamentos (aerogeradores, módulos fotovoltaicos, inversores, medidores, equipamentos de proteção), layout, direção (se norte, sul, leste ou oeste) e quais ângulos devem ser empregados para suas instalações

Depois, no sexto passo, ocorre a análise de viabilidade por meio de softwares, porém vale salientar que há a possibilidade de a simulação ser realizada via modelagem matemática, porém há vantagens consideráveis no uso dos programas computacionais. As três principais ferramentas ou *softwares* para análise de sistemas híbridos, utilizadas por pesquisadores no mundo inteiro são o HOMER, seguido por HYBRID2 e RETSCREEN.

Caso a simulação demonstre inviabilidade do sistema dimensionado, deve-se analisar cenários futuros. Para isso, analisar opinião de especialistas e prospectar taxas, custos e tarifas com base na extrapolação de dados atuais. Após, simular os novos dados no *software*, se ainda persistir a inviabilidade, a decisão deve ser de não implementar o sistema híbrido.

Por outro lado, se tanto após o sexto e sétimo passo, for constatada a viabilidade do sistema, esse estudo deve ser apresentado ao tomador de decisões da organização, pois a decisão de implementação é uma opção factível.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O modelo conceitual proposto aborda o passo a passo para a tomada de decisões referentes à implantação de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos e serve como ferramenta gerencial para indicar



quais fatores devem ser considerados para a realização de investimentos desse tipo, com vistas à obtenção das vantagens do sistema de compensação de energia. A relevância deste estudo é ampla, dado o enorme potencial de geração do país, tanto para a fonte eólica quanto para a fotovoltaica. O modelo é inédito e permite replicação em organizações de qualquer tipo.

## REFERÊNCIAS

- [1] GONÇALVES, L. F. **Contribuições para o estudo teórico e experimental de sistemas de geração distribuída.** Dissertação (Programa de pós-graduação em engenharia elétrica da UFRS) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2004.
- [2] RIBEIRO, U. **Estudo de viabilidade econômica de instalação de fontes de energia renováveis baseadas em células fotovoltaicas para o uso residencial.** Trabalho de conclusão de curso (Escola de engenharia de São Carlos) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.
- [3] SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; LAMAS, W.Q. The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v.20 p.133-141, 2013.
- [4] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Solar – ANEEL.** 3ª Edição, Brasília, 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>. Acessado em 25 de junho de 2015.
- [5] CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** 2014. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf). Acessado em: 25 de junho de 2015.
- [6] SIGNORINI, V. B.; VIANNA, S. D.; SALAMONI, I. **Análise do potencial de geração de energia solar fotovoltaica em um sistema integrado à edificação e interligado à rede - estudo de caso no prédio administrativo do campus Porto da UFPEL.** 3º Seminário Nacional de Construções Sustentáveis - SNCS. Passo Fundo/RS, 2014.
- [7] COOPER, E.; MARTINS JR., W. M. **Aplicação de painéis solares fotovoltaicos como fonte geradora complementar de energia elétrica em residências.** Curitiba, 2013. 86 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2013.
- [8] GREENPEACE. **Cartilha Solar.** 2013. Disponível em: <http://www.greenpeace.org/brasil/Global/brasil/documentos/2013/Cartilha%20solar.pdf>. Acessado em: 28 de junho de 2015.
- [9] AMERICADOSOL. **Como faço para ter energia solar em minha casa?.** 2015. Disponível em: <http://www.americadosol.org/guiaFV/>. Acessado em: 28 de junho de 2015.
- [10] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica.** 2ª ed., Brasília, 2005. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/download.htm>. Acessado em 16/11/2014.
- [11] FERREIRA, A. **Sistema de produção de energia eólica.** Porto, 2011. 191 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.
- [12] HAU. E. **Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics.** Ed. Springer, p. 783, 2006.
- [13] PINHO, A. **Gestão de Projectos de parques eólicos: contributos para a melhoria do processo.** 100 p. Dissertação (Mestrado integrado em engenharia civil - 2007/2008) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008a.
- [14] LOPES, A. **Produção eólica e enquadramento técnico-económico em Portugal.** 136 p. Dissertação (Mestrado integrado em engenharia eletrotécnica e de computadores major energia) - FEUP, Porto, Portugal, 2009.
- [15] GOUVEIA, Y. **Construção de um parque eólico industrial.** 123 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013



## BIOGRAFIAS

**Danilo Cachina** – Graduado em Engenharia de Produção e mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Especialista em Engenharia de Segurança pela Universidade Potiguar.

Ele possui experiência em Gestão de Processos; Logística e Gerenciamento de Estoques na construção civil e Desenvolvimento de Projetos de energia híbrida eólica-fotovoltaica.

Sr. Cachina é Engenheiro de Produção na UFRN e membro do Grupo de Pesquisa Cri-Ação.

**Marllen Santos** – Graduada em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte e mestranda em Engenharia de Produção na mesma instituição.

Ela atualmente desenvolve pesquisa voltada à otimização do desempenho na operação e manutenção dos parques eólicos brasileiros. Possui experiência em Sistemas de Gestão Integrados, Gestão de Projetos e Resiliência aplicada a atividades aeroespaciais. Tem publicado artigos com os temas: Medição de desempenho na prospecção de projetos eólicos; Indicadores de desempenho chave aplicáveis aos parques eólicos brasileiros; Prospecção de empreendimentos eólicos no Brasil.

Srta. Santos é membro do Grupo de Pesquisa Cri-Ação, que aborda criatividade para inovação de produtos e processos aplicada às cadeias de energia eólica e solar.

**Mario González** – Graduado em Engenharia Industrial pela Universidad Nacional de Ingeniería no Peru, especialista em Gestão da Inovação Tecnológica, na abordagem Open Innovation, mestre e doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de São Carlos. Temas de pesquisa nos quais atua: Inovação de Produtos e Processos em Redes de Operações Globais e cadeias de Energia Eólica e Solar.

Ele tem publicado artigos com os temas: Open innovation aplicado na cadeia de energia eólica; Impactos pela implantação de parques eólicos; Prospecção tecnológica para geração de energia eólica; Gerenciamento de projetos na construção de parques eólicos e Prospecção tecnológica para células fotovoltaicas.

Prof. Dr. González é o atual editor da Revista Product, do Instituto Brasileiro de Inovação e Gestão de Desenvolvimento de Produto e líder do grupo de pesquisa Cri-Ação da UFRN.