

# Estudo de um sistema eólico de geração distribuída para uma residência

Study of residential small wind distributed generation system

*Arthur M.Q. Siqueira, Pedro Alvim A. Santos*

## RESUMO

O trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica de uma família com 5 pessoas alcançar autosuficiência energética. Para isso, desenvolveu-se o projeto de implantação de um pequeno aerogerador em uma residência familiar com 5 pessoas, localizada na fazenda da Ressacada, próxima ao aeroporto de Florianópolis, a partir dos mecanismos técnicos e financeiros acessíveis. Com o fim de calcular o rendimento do projeto eólico, foram usados dados das condições do vento obtidos através de medições no local. Para a análise da viabilidade econômico-financeira utilizou-se uma metodologia que incluiu o cálculo do fluxo de caixa do projeto. Ao final são apresentados cenários alternativos, com o objetivo de avaliar a sensibilidade das variáveis para tornar o projeto economicamente viável.

**Palavras-Chave:** Energia eólica; Geração distribuída; Análise econômica; Estudo de caso.

## ABSTRACT

*The present work performs a technical and economical viability analysis of a small wind turbine for a residence with 5 people, located near the Ressacada farm close to Florianópolis airport. In order to assess the capacity factor and economical results of this study, a wind measurement campaign and a economical viability model were used, including cash flow and sensitivity analysis so that the project can be viable.*

**Keywords:** Wind energy, Distributed generation, Economical analysis, Case study.

## **INTRODUÇÃO**

### **Meta e motivação do trabalho**

A autossuficiência em energia é uma das condições necessárias para soberania energética. Com a motivação de encontrar alternativas para autossuficiência energética de uma família, desenvolveu-se neste trabalho um projeto de implementação de um pequeno aerogerador eólico para suprir a demanda de uma casa com 5 pessoas, localizada na fazenda da Ressacada, próxima ao aeroporto de Florianópolis. A escolha do local é justificada pelo conhecimento prévio e preciso dos dados relativos às condições do vento no local.

A micro turbina de geração está ligada à rede de distribuição 380/220V. O sistema funciona sem bateria, o excedente da eletricidade gerada é entregue à rede, e quando a eletricidade gerada não suprir a demanda da casa, se consumirá energia da rede. Esta tecnologia é chamada de grid-tie, em oposição à off-grid, que funciona sem ligação à rede, necessitando portanto de um banco de baterias (WWEA, 2012).

### **Sistema de compensação de energia elétrica**

A geração distribuída é normalmente desenvolvida a partir de políticas de incentivo, entre as quais se destacam as chamadas Feed-In Tariffs (FIT) ou Compensação de Energia (Net-Metering). A resolução normativa nº482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012) estabeleceu as definições regulatórias de uma modalidade de compensação energética (ANEEL, 2014).

Nesta modalidade, os consumidores que tem geração renovável na própria casa possam alimentar a rede de distribuição nas horas em que não usam toda a energia que produzem. Para cada kWh fornecido à rede o consumidor recebe um “crédito de energia” que poderá ser descontado nas contas futuras. Na fatura de luz subsequente, o consumidor pagará a diferença entre energia consumida e o excedente de energia gerada no mês anterior, podendo, no caso ótimo, pagar apenas a taxa mínima cobrada pela distribuidora (taxa de uso da rede). Este sistema de “poupança” visa incentivar e tornar projetos de gerações residencial e comercial viáveis, dispensando o uso de baterias para armazenamento de energia pois a rede de distribuição executa virtualmente esta função. Tal regulamentação somente é válida para geradores que utilizam fontes incentivadas (hídrica, solar, biomassa, eólica e co-geração) (ANEEL, 2014).

Após 20 meses da publicação da resolução 482 da ANEEL (abril 2012), apenas 34 projetos haviam sido desenvolvidos no Brasil, somando 263 kW, ou 0,0002% da potência instalada no país, entre os quais 1 projeto de biomassa, 6 de eólica, 27 de energia fotovoltaica. Alguns fatores principais podem explicar o pequeno êxito da adoção inicial: tributação, condições de financiamento e falta de conhecimento técnico por parte dos consumidores (DAMAS et al., 2012).

## DESCRIÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO TÉCNICA

### Conexão com a rede

Para usufruir do sistema de compensação de energia estabelecido pela ANEEL, o mesmo deverá estar de acordo com a regulamentação imposta pelo distribuidor local. Em Santa Catarina, a CELESC publicou a regulamentação para geração distribuída, com os requisitos de sistema necessário para conexão com a rede (CELESC, 2013). Portanto, para o funcionamento de um sistema eólico de geração distribuída serão necessários os seguintes componentes (“Le petit éolien : ce qu’il faut savoir pour se raccorder au réseau,” 2011):

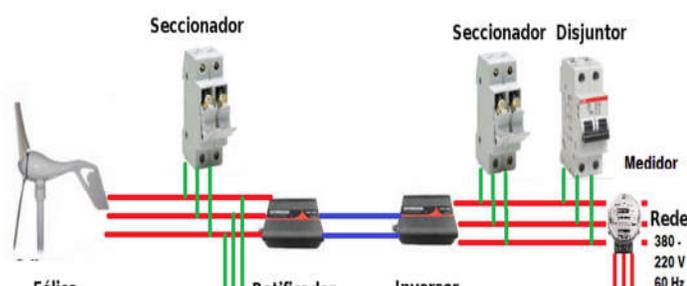


Figura 1 – Esquema da conexão com a rede para o sistema eólico proposto

Para raios - Dirige as descargas elétricas atmosféricas para a terra, e protege assim os equipamentos elétricos.

Primeiro Seccionador - Quando ativado o seccionador curto-circuita o gerador para permitir manutenção.

Retificador - É o componente que converte a corrente alternada saindo do gerador trifásico da micro turbina eólica em corrente contínua. É basicamente composta por quatro diodos. A tensão de entrada é retificada para que o inversor consiga melhor regular a tensão. As pontes retificadoras usadas são robustas para estas aplicações, porém deve-se dar atenção à qualidade dos terminais usados nas extremidades dos fios e em todos os apertos, pois a circulação de corrente gera

calor e, caso existam más ligações, podem provocar arcos elétricos, que danificarão os componentes ao longo do tempo.

Inversor - É o componente do sistema que converte a corrente continua retificada em corrente alternada compatível com a rede elétrica (tensão e frequência) (WOOD, 2011)

Segundo seccionador - É o componente que isola o sistema de geração da rede de distribuição, permitindo uma manutenção na instalação em condições seguras.

Disjuntor diferencial - Protege a instalação contra os curtos-circuitos. A função diferencial assegura as pessoas.

## Escolha do sistema

### Cálculo da produção anual de energia (PAE)

A partir dos dados do vento medidos na Fazenda Experimental de Ressacada, o comportamento estatístico do vento pode ser aproximado por uma distribuição de Weibull (SANTOS, 2014), com objetivo de calcular a PAE. Os dados usados para a curva de potência foram interpolados da curva do fabricante (ENERSUD, [s.d.]). Com estes valores calculou-se a PAE (SANTOS, 2011), conforme mostra a tabela 1.

Velocidade Vento [m/s]	Potencia saída teórica [W]	Occôrencia de condição do vento	Occorencia (%)	Occorencia*Potencia
0	0	1672	1,91%	0
1	0	5553	6,34%	0
2	10	11589	13,24%	1,3235
3	20	15967	18,24%	3,6471
4	50	15796	18,04%	9,02
5	110	10331	11,80%	12,9785
6	190	9189	10,49%	19,9394
7	300	7728	8,83%	26,4775
8	440	5636	6,44%	28,3213
9	620	2647	3,02%	18,7428
10	820	888	1,01%	8,316
11	1070	287	0,33%	3,5072
12	1280	74	0,08%	1,0818
13	1400	58	0,07%	0,9274
14	1440	75	0,09%	1,2334
15	1420	46	0,05%	0,746
16	1350	20	0,02%	0,3084
17	1190	5	0,01%	0,068
		87561		136,6381 watts (media)
				~98 kWh/mes
				~1176 (PAE)

Figura 2 – Cálculo da PAE com curva de potência e estatística do vento.

## Lista de equipamentos

O trabalho teve como objetivo desenvolver um projeto com tecnologia 100% nacional. O Aerogerador escolhido foi o modelo EnerSud Razec 266 desenvolvido

por uma empresa brasileira em parceria com a UFRJ. O equipamento foi dimensionado para suprir a carga de uma residência de com 4 ou 5 pessoas, com potência nominal de 1kW. Após muitas pesquisas, inversor encontrado compatível com aerogerador escolhido foi um modelo importado. Já os equipamentos de estrutura e segurança cumprem com o objetivo inicial.

### **Turbina: critérios de escolha**

O gerador usado é um gerador síncrono de ímãs permanentes, que pode funcionar a baixas velocidades, pois o torque de partida é baixo, não precisando, portanto, de excitação. O equipamento possui um alto rendimento. Desde os anos 1990, o preço dos ímãs à Neodímio baixou o que tornou sua utilização mais comum.

O campo magnético é gerado, como indica seu nome, pelos ímãs permanentes. Estes ímãs estão fixados no rotor da máquina, sendo rotacionados diretamente pelas pás da turbina eólica. No estator, bobinas de cobre geram uma tensão alternada. Para as eólicas, a maior dificuldade é de conseguir gerar à tensão de saída desejada com velocidade de rotação baixa, porque no caso de falta de vento, as pás podem girar devagar. Os ímãs permanentes permitem essa flexibilidade, porém, eles aumentam o peso do gerador. (WOOD, 2011)

### **Custos totais de equipamento**

Equipamento	R\$
Turbina&Gerador	14000
Inversor	7900
Medidor bi-direcional	330
Torre/base/fundação.	850
Instalação	500
<b>TOTAL em t(0)</b>	<b>23580</b>

+Inversor substituição em t(12)	7900
---------------------------------	------

Tabela 1 – Custos dos equipamentos

## VIABILIDADE ECONÔMICA

### Método de análise da viabilidade econômica

A existência de juros na nossa economia faz com que o valor real do dinheiro dependa do instante em que se ganha este dinheiro. Pode-se, por exemplo, por dinheiro a juros na caderneta de poupança no início do ano e receber o investimento inicial somado aos juros no final do ano. A equação (1) mostra a relação matemática do efeito dos juros.

$$\begin{aligned} \text{valor}(t_1) &= \text{valor}(t_0)(1 + \text{taxapoupança})^1 \\ \text{valor}(t_2) &= \text{valor}(t_0)(1 + \text{taxapoupança})^2 \end{aligned} \quad (1)$$

O mesmo contexto se aplica aos gastos. Um gasto no futuro é melhor que o mesmo gasto no presente, pois se pode investir o dinheiro até o dia do pagamento, recebendo, assim, juros. Para calcular o valor presente de um determinado pagamento no futuro pode-se usar a fórmula (2), onde a taxa de desconto equivale à taxa de poupança do exemplo anterior.

$$\begin{aligned} \text{valor}(t_1) &= \text{valor}(t_0)(1 + \text{taxadesconto})^{-1} \\ \text{valor}(t_2) &= \text{valor}(t_0)(1 + \text{taxadesconto})^{-2} \end{aligned} \quad (2)$$

Este fato tem implicações para projetos. Pode-se deduzir das fórmulas dadas que, em geral, é melhor ter rendas cedo e despesas tarde.

O investimento no projeto eólico significa que o dinheiro investido não pode ser utilizado em outro lugar (por exemplo, na caderneta de poupança). Se o projeto eólico não for mais vantajoso que qualquer outra alternativa realizável, então a decisão em favor do projeto eólico teria como consequência a perda de lucros do outro investimento (“custos de oportunidade”). Então, considerando somente o escopo monetário do projeto, pode-se concluir que temos que incluir uma análise de

investimentos alternativa para poder avaliar a viabilidade econômica do projeto. (SANTOS, 2011)

Como mostrará a conclusão deste trecho, a seleção do projeto alternativo é determinante para os resultados dos cálculos. No entanto, definir um valor é difícil e de algum grau arbitrário. Neste trabalho foram eleitos os lucros de uma caderneta de poupança hipotética. Segundo o Banco Central de Brasil, o valor médio de poupança p.a. entre 03/2015 e 05/2015 foi de 7,83%.

Na realidade é possível obter mais lucro através de investimentos alternativos. No entanto, uma análise profunda sobre uma taxa de desconto adequada no caso brasileiro vai além do escopo deste trabalho. A poupança pode servir como limite inferior razoável.

Para prever o valor da eletricidade gerada no futuro foi considerado um aumento igual à inflação. O preço da eletricidade pode variar com fatores sociais, políticos, ambientais e econômicos. No entanto, com o fim de simplificar os cálculos, os prognósticos do aumento de preço da eletricidade se baseiam nos dados históricos da inflação. O valor atual da tarifa da CELESC para a bandeira verde é R\$0,4288 para uma residência normal. Segundo os dados do Banco Mundial, a inflação média no Brasil foi 5,48% p.a. entre 2005-2014.

O inversor tem uma expectativa de vida mais curta que os outros aparelhos. Nos cálculos foi assumido que ele terá que ser substituído depois de 12 anos. Como os custos de inversores estão diminuindo rapidamente, não foi considerada a inflação. Isto é, o valor do compra do inversor substituído foi estimado ser R\$ 7.900,00 no ano 12, isto é, R\$ 3.194,00 descontado no ano 0. Nem foram consideradas custos de manutenção, nem de operação.

Há vários conceitos para analisar a viabilidade econômica. O conceito do Valor Presente Líquido (VPL), dado na fórmula (3) expressa todas as despesas e rendas do projeto em valor presente. O método do VPL foi escolhido porque, no caso de somente duas alternativas do mesmo volume de investimento, o cálculo do VPL oferece um resultado nítido. Isto é, um valor >0 significa que o projeto analisado é viável, enquanto no caso <0 não é.

$$VPL = \sum \text{rendas descontadas em } t_0 - \sum \text{despesas descontadas em } t_0 \quad (3)$$

### **Análise de fluxo de caixa**

Através da simulação do cálculo financeiro completo, o VPL foi de R\$ - 17189,57. Fica evidente que é um projeto inviável e seria mais vantajoso investir o recurso no caderneta.

Os prejuízos são causados, principalmente, por duas razões:

Primeiro, um investimento inicial em  $t_0$  muito alto faz quase impossível reembolsar o investimento através do sistema de compensação e a taxa de desconto é muito baixa. A baixa taxa de desconto no Brasil torna projetos de grande investimento a longo prazo difíceis em geral. Os cálculos foram feitos com a taxa de desconto para um cidadão comum.

Segundo, o lugar escolhido tem condições de vento impróprias. Os dados da medição do vento resultam em um PAE de ~1176 kWh/ano. Os dados do fabricante da turbina marcam 300 kWh/mês o que indica que tem usado um lugar com condições de vento melhores. Os resultados da medição do vento indicam outra vez que não é uma boa ideia calcular com os dados do fabricante sem verificar se as condições estão comparáveis.

### **Alterações**

Foram feitas variações na simulação para testar o comportamento do investimento a condições alteradas para avaliar a sensibilidade das variáveis.

### **Condições de ventos melhores**

Foi calculado um PAE de aproximadamente 1176 kWh/ano para o sítio escolhido. Uma variação de valores para o PAE indica que o projeto seria viável a partir de um PAE=3300 kWh/ano. Em um sítio com melhores condições de vento o projeto pode se tornar viável, como, por exemplo, em regimes de vento de maior intensidade já observados em Santa Catarina (DALMAZ, 2007).

### **Bandeiras tarifárias**

As bandeiras tarifárias amarelas e vermelhas tem impacto na renda. O impacto, no entanto, é pequeno. Supondo que a tarifa permanece na mesma bandeira durante 25 anos, obte-se os resultados da tabela 2.

Bandeira	Custo [R\$/kWh]	VPL [R\$]
Verde	0,42881	-17189,5
Amarela	0,45381	-16630,75
Vermelha	0,48381	-15978,26

Tabela 2 – Simulação com uma tarifa constante

### **Custos do equipamento**

Os custos de equipamento tendem a diminuir a cada ano com o desenvolvimento da tecnologia. Além disso, o crescimento da fabricação de equipamentos no Brasil os tornará mais baratos e evitará as taxas de importação. Uma redução de custo de investimento tem alto impacto na viabilidade. Teria-se um pay-off dentro de 25 anos com um custo de tecnologia de R\$ 9.585,00, supondo que o inversor não quebre. Isto é, para um custo menor que este, o projeto se torna viável.

Segundo o Small Wind World Report 2014, os custos atuais na China estão na casa de U\$1.900,00/kW instalado, o que representaria um custo 262% menor que o estimado para turbina da Enersud. Este custo por kWh no Brasil já tornaria o sistema viável economicamente.

### **Preço da energia**

Outros países aplicam um sistema feed-in tariff (FIT) que assegura a renda do gerador. As tarifas do FIT são normalmente mais altas que o preço convencional da energia. Se o Brasil aplicar um sistema FIT com FIT= R\$1,1978/kWh para cada kWh alimentado na rede, o investimento seria viável. Um FIT tão alto, no entanto, é politicamente improvável e muito custoso. Nosso caso, se deveria refinar R\$17189 em t0 para gerar somente (25 anos)\*PAE = 29400 kWh durante a vida útil.

### **Ajuda de financiamento**

Os cálculos supõem que o investimento é feito por capital próprio, o que supõe que o investidor tem recurso financeiro suficiente para fazer o investimento. Quando isso não é o caso, uma alternativa é buscar sistemas de crédito.

Há linhas de créditos destinadas consumidores domésticos para aquisição equipamentos para geração de energia renovável. Os custos destas linhas de crédito específicas normalmente oferecem juros mais menores que linhas de créditos convencionais, e por isso podem diminuir os custos do investimento quando não se tem capital próprio suficiente.

Até o final deste trabalho, só encontrou-se disponíveis financiamentos para a obtenção de micro geradores e mini geradores solares fotovoltaicos.

A Caixa Econômica Federal, Santander e o Banco do Brasil oferecem linha de financiamento para sistemas alternativos de geração de energia, com taxa de 1,5 a 2,35% ao mês.

No entanto, no caso deste projeto eólico, o investimento já não é viável com capital próprio. A utilização de um crédito vai causar ainda mais prejuízos, já que os juros do crédito são mais altos que a taxa de desconto.

## **CONCLUSÕES**

Pôde-se observar a dificuldade para a autossuficiência energética de uma família urbana através da micro geração eólica residencial. Os maiores entraves encontrados foram o alto custo dos equipamentos brasileiros, a tributação sobre os importados, aliados ao tímido impacto do sistema de compensação energética proposto.

O setor de produção de equipamentos para micro geração eólica no Brasil é limitado e tem pouca expressão se levarmos em conta a dimensão do potencial desta tecnologia no país. Há poucas alternativas de equipamentos, o que reflete a alta dependência tecnológica brasileira e a dificuldade na produção de produtos de alta tecnologia em grande escala. O inversor que é um equipamento estratégico para as energias renováveis teve de ser importado neste projeto.

O valor presente líquido (VPL) do projeto foi de R\$17.189,00 negativos, o que significa um grande prejuízo. A taxa de desconto no Brasil é baixa, o que torna projetos de grande investimento a longo prazo difíceis, em geral. Além disso, o preço

do kwh também influenciou no resultado, como pudemos observar na variação das bandeiras.

Sistemas alternativos como o feed-in tarif (FIT) e outros subsídios especiais poderiam tornar o projeto viável, como foi mostrado no trecho da análise econômica. Porém, para isso, são necessárias políticas energética coerentes, compromissadas com o acesso universal à energia.

Tem-se, portanto, que o sucesso de um projeto de geração distribuída necessita avaliar com cautela a sensibilidade das diferentes variáveis envolvidas, principalmente relacionadas ao recurso eólico disponível no local de interesse, custo da tecnologia e incentivos governamentais de direito.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. **Resolução Normativa 482 de 17/04/2012** Brasília, BrazilAgencia Nacional de Energia Eletrica, , 2012.

ANEEL. **Micro e minigeracao distribuida: sistema de compensacao de energia eletrica (Cadernos Tematicos ANEEL)**Brasilia, BrazilANEEL, , 2014. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>>

CELESC. **Requisitos para a conexao de micro ou mini geradores de energia ao sistema eletrico da Celesc Ditribuicao**Florianopolis, BrazilCELESC, , 2013.

DALMAZ, A. **Estudo do potencial eolico e previsao de ventos para geracao de eletricidade em Santa Catarina.** [s.l.] (Dissertacao de Mestrado) Engenharia Mecanica - Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

DAMAS, L. B. et al. Cenario Nacional e Tendencias para Geracao Eolica. **Revista ABCM**, v. 17, p. 14, 2012.

ENERSUD. **Especificacao tecnica Turbina Eolica RAZEC 266**, [s.d.]. Disponível em: <[http://enersud1.hospedagemdesites.ws/?page\\_id=453](http://enersud1.hospedagemdesites.ws/?page_id=453)>

GALLUCCI, S. T. **Analise de investimento e desempenho de um pequeno aerogerador em zona urbana.** [s.l.] (Trabalho de Conclusao de Curso) Engenharia Mecanica - Universidade de Sao Paulo, 2007.

**Le petit éolien : ce qu'il faut savoir pour se raccorder au réseau.** Ti'éole Energies Eolennes, , 2011.

SANTOS, P. A. A. **Analise de investimento e desempenho de um pequeno aerogerador em zona urbana.** [s.l.] (Trabalho de Conclusao de Curso) Engenharia de Producao - Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

SANTOS, P. A. A. **Atmospheric stability impact on small wind turbine performance in a complex terrain.** [s.l.] (Dissertacao de Mestrado) Engenharia Mecanica - Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

WOOD, D. **Small Wind Turbines: Analysis, Design and Application.** London: Springer, 2011.

WWEA. **Small Wind World Report.** Bonn, Germany: World Wind Energy Association, 2012.

WWEA. **Small Wind World Report.** Bonn, Germany: World Wind Energy Association, 2014