

## ESTUDOS DE SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA DE UM MUNICÍPIO BRASILEIRO

Ana S. L. Ribeiro<sup>1</sup> (IC), Giancarlo Aquila<sup>1</sup> (PQ), Benedito D. Bonatto<sup>1</sup> (PQ)<sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá**Palavras-chave:** Geração Distribuída. Energia Fotovoltaica. Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos. Sustentabilidade Energética. Redução de Emissões de CO<sub>2</sub>**Introdução**

O desenvolvimento de fontes alternativas de energia se tornou fundamental para reduzir a dependência da matriz energética hidrelétrica no Brasil, especialmente diante da crescente demanda por eletricidade e das limitações ambientais e geográficas para novos projetos hidrelétricos. A diversificação das fontes energéticas, incluindo a adoção de tecnologias renováveis, como a geração fotovoltaica, se apresenta como uma solução promissora para mitigar riscos de desabastecimento e promover sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, as recentes mudanças normativas, como a Resolução ANEEL 482 de 2012 e a Lei nº 14.300 de 2013, criaram um ambiente regulatório mais favorável à microgeração e minigeração distribuída, incentivando consumidores a se tornarem geradores de energia e a compartilharem o excedente com a rede elétrica. Contudo, há lacunas no setor público quanto à implementação de sistemas fotovoltaicos, o que evidencia a necessidade de políticas públicas mais direcionadas para apoiar a sustentabilidade energética em infraestruturas públicas.

O presente estudo foi conduzido no município de Conchal-SP, que forneceu dados energéticos para análise, e busca demonstrar como a adoção de sistemas fotovoltaicos em infraestruturas públicas pode contribuir para a redução de custos com energia elétrica e diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>. A pesquisa utilizou métodos de dimensionamento técnico e econômico para avaliar a viabilidade dos projetos, mostrando que, apesar do alto investimento inicial, há um retorno financeiro positivo a longo prazo, além de benefícios ambientais significativos. A implementação de tecnologias fotovoltaicas em unidades consumidoras do poder público, não apenas otimiza a gestão energética do município, mas também serve como exemplo de compromisso com práticas ecológicas sustentáveis e pode impulsionar políticas de eficiência e transição energética em outros municípios brasileiros.

**Metodologia**

O estudo iniciou com a caracterização do consumo energético do município de Conchal-SP, a partir das faturas de energia elétrica disponibilizadas pela

prefeitura. Com base nesses dados, foi possível determinar o consumo anual e identificar os principais locais para a implementação dos sistemas fotovoltaicos. A partir daí, foi realizado o dimensionamento técnico dos sistemas utilizando uma planilha no Excel e o software PVSystem. No presente resumo, foi utilizada a Escola Municipal Alonso Ferreira de Camargo como estudo de caso, mas os mesmos procedimentos foram adotados para todos os locais públicos de interesse.

Primeiramente, com dados iniciais já preenchidos na planilha, foi necessário utilizar relações para encontrar o Valor Presente de Consumo Anual, a Demanda, a Produção Esperada para uma placa, o Valor Presente de Produção Anual e, finalmente, a Quantidade de Placas do sistema. Tais passos são exemplificados através das Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Dimensionamento Excel - Parte 1

Dados		Escola Municipal Alonso Ferreira de Camargo	
Nome da Unidade:	C68		
Consumo anual (Ca)	1768,615	kWh	
G (crescimento esperado)	0,03%	ao ano	
n	25	anos	
i	11,23%	ao ano	
$(1+G)^n$	1,007527		
$(1+i)^n$	0,069852		
G - i	-11,20%		
VP consumo anual	14676,23	kWh	
PGTO consumo anual	1772,35	kWh	
Área de uma placa (A)	2,186	m <sup>2</sup>	
Rendimento (η)	21,30%		
Radiação solar local (média)	5,00	kWh/m <sup>2</sup>	<a href="https://power.larc.nasa.gov">https://power.larc.nasa.gov</a>
Perdas estimadas	10%		sombreamento, poeira, etc.
Fator de segurança	10%		
Temp amb	35		
Temp ref	18		
Temp inst	31		
Coef temp	0,35%	W/°C	
Dias em um ano	365		

Fonte: Autoria Própria

Tabela 2 - Dimensionamento Excel - Parte 2

Demanda	1949,58	kWh ao ano
Produção de uma placa esperada	681,80	kWh ao ano
nº de placas	3	
Fator de degradação do sistema	0,25%	ao ano
Potência de uma placa	500	Wp
Potência do sistema	1,5	kWp
n	25	anos
i	11,23%	ao ano
$[1-(1+G)^n(1+i)^{-n}]$	0,934385	
G + i	11,48%	
VP produção anual	5547,991	kWh ao ano
PGTO produção anual	669,9935	kWh ao ano
kWh/kWp ao dia	3,56	

Fonte: Autoria Própria

A segunda forma de dimensionamento foi através do software PVSyst, permitindo análises e comparações. Para isso, os passos foram os seguintes: inserir latitude e longitude no PVSyst para obter dados anuais de irradiação, temperatura, vento e umidade. A partir daí, uma curva da linha horizonte é gerada para o local, podendo ser melhorada com a inserção de detalhes da área.

A seguir, o sistema é especificado com base no consumo anual da unidade consumidora, orientações quanto aos módulos e inclinação a um valor próximo ao da latitude do local, atendendo à especificação de perdas em relação ao ótimo igual a zero e do fator de transposição ser maior ou igual a 1, para que a irradiação incidente esteja sob o módulo.

O Azimute deve ser zero e os módulos devem ser voltados para o Norte. Após seguir esses passos, o software é capaz de dimensionar o sistema de geração fotovoltaica, de acordo com as características do local desejado.

Dado o sistema dimensionado, é possível fazer uma análise econômica quanto a essa instalação, também via Excel (Tabelas 3 e 4). Para isso, é necessário calcular parâmetros como: o Capex Unitário, determinando a despesa para a implementação do sistema; O Opex, para os gastos das atividades rotineiras de manutenção do sistema; o Saldo Líquido, o Saldo Acumulado, o Saldo Líquido Descontado e, por fim, o Saldo Acumulado Descontado, que será útil para as próximas análises.

É importante mencionar que a Figura 4 demonstra apenas os dados obtidos até o ano quatro, para fins de exemplificação, mas que tais análises foram realizadas até o ano 25, pois foi considerado um horizonte de planejamento de 25 anos, já que esta é a vida útil das placas solares geralmente utilizadas para o sistema.

Outro parâmetro analisado foi quanto aos impactos ambientais gerados pelo uso de Sistemas PV, que além de oferecerem uma fonte de energia sustentável e renovável, resultam em uma redução significativa de emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>. Vale-se ressaltar que a energia solar é na matriz energética a fonte com menor emissão desse gás durante seu processo de produção. Para calcular essa redução, a relação entre o fator de emissão (0,3406 tCO<sub>2</sub>/kWh) e o valor presente da produção de energia foi estimado com funções do Excel e o resultado pode ser visualizado na Tabela 5.

Tabela 3 - Análise Econômico Financeira - Parte 1

1	Dados			
2				
3	CAPEX unitário do sistema FV	R\$ 4,39	por Wp	fonte Greener (2023)
4	CAPEX total	R\$ 26.537,55		
5	OPEX	0,50%	do CAPEX	
6	OPEX (anuidades)	R\$ 132,69		
7				
8	Distribuidora local	CEMIG		
9	Valor Fio A na tarifa	R\$ 0,054	kWh	https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferao/tarifa/
10	Valor Fio B na tarifa	R\$ 0,232	kWh	
11	Valor TFSEE	R\$ 0,001	kWh	
12	Valor P&D	R\$ 0,003	kWh	
13				
14	Alíquota ICMS	18%		
15	Tarifa local	R\$ 0,545		
16	G (crescimento esperado)	2,3%	Holdermann et al 2014	https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.064

Fonte: Autoria Própria

Tabela 4 - Análise Econômico Financeira - Parte 2

Ano	0	1	2	3	4
Isenção de ICMS ?		sim	sim	sim	sim
Tarifa local		R\$ 1,033	1,05699429	1,081305159	1,106175177
Alíquota de ICMS		18%	18%	18%	18%
(+) Economia anual + Isenção ICMS		R\$ 2.577,28	R\$ 2.629,96	R\$ 2.683,72	R\$ 2.738,59
Escadinha		15%	30%	45%	60%
(-) Encargos (Sistemas < 500 kWp)		R\$ 71,18	R\$ 145,27	R\$ 222,36	R\$ 302,54
(-) Encargos (Sistemas > 500 kWp)		R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
(-) OPEX		R\$ 40,65	R\$ 40,65	R\$ 40,65	R\$ 40,65
(-) CAPEX	R\$ 8.130,00				
(=) Saldo Líquido	-R\$ 8.130,00	R\$ 2.465,45	R\$ 2.444,04	R\$ 2.420,72	R\$ 2.395,40
Saldo Acumulado	-R\$ 8.130,00	-R\$ 5.664,55	-R\$ 3.220,51	-R\$ 799,80	R\$ 1.595,60
Saldo Líquido Descontado	-R\$ 8.130,00	R\$ 2.216,47	R\$ 1.975,35	R\$ 1.758,92	R\$ 1.564,76
Saldo Acumulado Descontado	-R\$ 8.130,00	-R\$ 5.913,53	-R\$ 3.938,18	-R\$ 2.179,26	-R\$ 614,51
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)		11,23%			

Fonte: Autoria Própria

Tabela 5 - Redução Emissão de Carbono – Excel

Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	11,23%	ao ano
Valor do Negócio	R\$ 19.444,31	
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 11.314,31	
Valor Anual Uniforme (VAUE)	R\$ 1.442,49	
TIR modificada	15,18%	
LCOE	R\$ 0,72	por kWh
Payback Simples	2,33	anos
Payback Descontado	2,44	anos
VP CAPEX	R\$ 8.130,00	
VP OPEX	R\$ 336,61	
VP Encargos	R\$ 3.471,61	
VP Produção Energia	16643,97276	kWh
Fator de emissão (SIN)	0,3406	tCO <sub>2</sub> /kWh
Emissão reduzida de CO <sub>2</sub>	5668,94	tCO <sub>2</sub>

Fonte: Autoria Própria

## Resultados e discussão

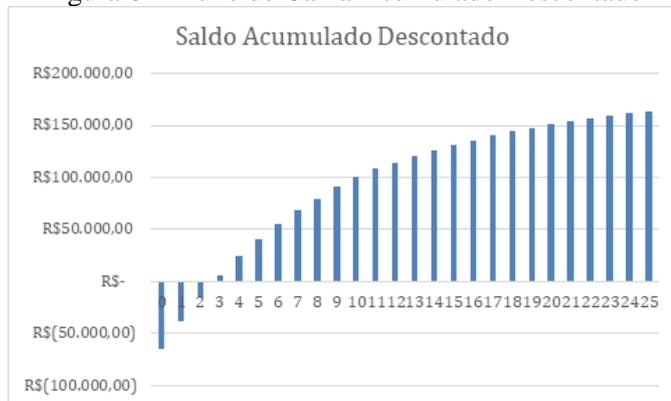
O estudo utilizou as tabelas apresentadas (Tabelas de 1 a 5), e os recursos de fórmulas do excel junto aos conceitos estudados sobre o dimensionamento de sistemas PV, para estimar os custos de sua implementação. A partir daí, diversos resultados puderam ser obtidos e estes serão expostos a seguir.

O consumo anual de energia no município é de aproximadamente 5.800 MWh, exigindo um sistema fotovoltaico de 4.900 kWp para suprir essa demanda. A análise econômica indicou que o investimento inicial (CAPEX) necessário para a instalação do sistema é de

aproximadamente R\$ 17,5 milhões. Embora o valor inicial seja elevado, a economia total ao longo dos anos é estimada em R\$ 40,3 milhões, tornando o projeto financeiramente viável.

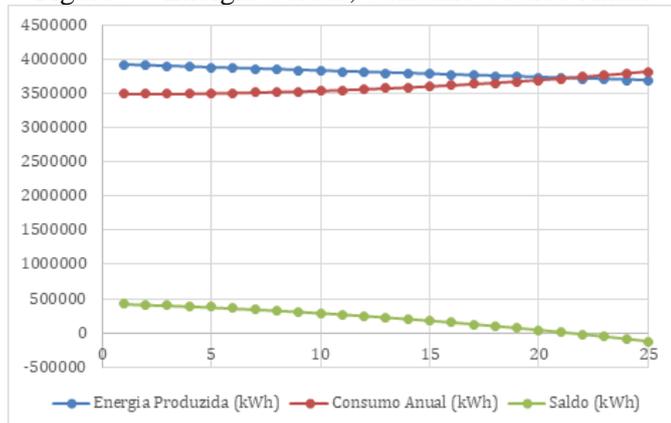
O Payback Descontado do sistema é de 2,44 anos (Figura 6), indicando que o investimento será recuperado rapidamente. A partir do terceiro ano, o saldo começa a ser positivo, e a economia gerada poderá ser direcionada para outras melhorias no município. O fluxo de caixa ao longo de 25 anos mostra um retorno financeiro gradual e sustentável, comprovando a eficácia do projeto para reduzir custos e promover a sustentabilidade energética.

Figura 6 – Fluxo de Caixa Acumulado Descontado



Fonte: Autoria Própria

Figura 7 – Energia Gerada, Consumo e Saldo Anual



Fonte: Autoria Própria

Além disso, nos primeiros anos após a instalação dos painéis fotovoltaicos, a produção de energia será superior ao consumo, gerando um excedente que será injetado na rede elétrica. Contudo, esse saldo positivo diminui gradualmente ao longo do tempo, conforme a vida útil dos painéis se aproxima do fim (Figura 7). Ademais, a instalação dos sistemas fotovoltaicos resultaria em uma significativa redução de emissões de carbono, estimada em 18.000 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes ao longo do período de operação.

### Conclusões

O estudo concluiu que a implementação de sistemas fotovoltaicos em infraestruturas públicas de Conchal-SP traz grandes vantagens econômicas e ambientais. Apesar do investimento inicial, a economia gerada a longo prazo permite que os recursos sejam redirecionados para outras áreas essenciais, como saúde e educação, trazendo impactos positivos para a população. O estudo também destacou o valor educativo e prático da pesquisa, por meio da experiência em dimensionamento de um sistema fotovoltaico a partir de dados reais de faturas de energia elétrica de um município brasileiro.

Além dos benefícios econômicos, a instalação de sistemas fotovoltaicos contribui para a sustentabilidade ambiental, reduzindo significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> equivalentes e alinhando-se às iniciativas globais de combate ao aquecimento global.

A pesquisa ressalta a importância de uma abordagem equilibrada entre geração distribuída e centralizada, sugerindo que políticas públicas e decisões baseadas em análises técnicas multidisciplinares são essenciais para o desenvolvimento sustentável do município. Assim, iniciativas desse tipo podem transformar a matriz energética local e servir como modelo para outros municípios em outras regiões do país..

### Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador e professor pelos diversos ensinamentos ao longo desses meses, além da oportunidade de aprendizado através dessa pesquisa. Aos colegas do Advanced Power Technologies and Innovations in Systems and Smart Grids Group (aPTIS-SG<sup>2</sup>) pelo apoio nas aulas, discussões e indicações.

Agradeço, também, o apoio financeiro proporcionado em parte pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energia Elétrica (INERGE), CAPES, CNPq, FAPESP, CPTEn, UNICAMP, Prefeitura Municipal de Conchal-SP e à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), que contribuíram, de forma relevante, com o desenvolvimento da pesquisa.

### Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Informações Técnicas - Geração Distribuída**. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojY2VmMmUwN2Qt>

[YWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxIiwidC I6ljQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNG U5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>](https://www.libertyenergia.eco.br/entenda-a-importancia-da-diversificacao-da-matriz-energetica/#:~:text=de%20um%20pa%C3%ADs.-,Como%20ocorre%20a%20diversifica%C3%A7%C3%A3o%20da%20matriz%20energ%C3%A9tica%3Fde%20impacto%20e%20de%20viabilidade) . Acesso em: 31 mai. 2023.

LIBERTY ENERGIA. **Entenda a importância da diversificação da matriz energética.** Disponível em: <https://www.libertyenergia.eco.br/entenda-a-importancia-da-diversificacao-da-matriz-energetica/#:~:text=de%20um%20pa%C3%ADs.-,Como%20ocorre%20a%20diversifica%C3%A7%C3%A3o%20da%20matriz%20energ%C3%A9tica%3Fde%20impacto%20e%20de%20viabilidade>. Acesso em: 31 mai. 2023

MARQUES, F. A. S. ; MORÁN, J. A. ; ABREU, L. ; SILVA, L. C. P. DA; FREITAS, W. **Impactos da Expansão da Geração Distribuída nos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP, [s.d.]

MERCADO LIVRE DE ENERGIA. **Energia elétrica no Brasil: história e as principais instituições criadas.** Disponível em: <https://livremercadodeenergia.com.br/energia-eletrica-no-brasil-historia-e-as-principais-instituicoes-criadas/>. Acesso em: 31 mai. 2023

NUNES ARAGÃO; GRANDE. **Estudo de Perdas no Sistema Elétrico de Potência com Presença de Geração Distribuída Usando o ATPDRAW.** Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, 2016.

PIRAN, F. A. S.; PANIZ, A. M. F. ANÁLISE DOS EFEITOS PROPORCIONADOS PELA TRANSFORMAÇÃO DE UMA REDE CONVENCIONAL EM SMART GRID: ESTUDO DE CASO EM UMA CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA DO RIO GRANDE DO SUL. **Latin American Journal Of Business Management**, Taubaté, v. 11, n. 2, p. 83-94, jul. 2020

QUANTUM. **História da Energia Solar Fotovoltaica: Como a evolução Tecnológica vem Ampliando o acesso à essa fonte sustentável de energia.** Disponível em: <https://www.quantumengenharia.net.br/historia-da-energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 31 mai. 2023.

SANTOS, L. P. D; JÚNIOR, R. H. P; SANTOS, V. C. L. **Geração Distribuída: Sistema de cogeração fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão.** Disponível em: [https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo\\_9.pdf](https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_9.pdf). Acesso em: 31 mai. 2023.

SILVA, P. F. **Análise de Modelos e Viabilidades para Inserção de Sistemas de Geração Fotovoltaica em Universidades Públicas Brasileiras Visando a Sustentabilidade Energética.** 2021. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021b.

SISTEMA FIEP. **O que é Geração Distribuída.** Disponível em: <https://www.fiepr.org.br/observatorios/energia/o-que-e-geracao-distribuida-1-21893-327075.shtml>. Acesso em: 31 mai. 2023

SOLLED ENERGIA. **POR QUE FALAMOS QUE A ENERGIA SOLAR REDUZ CO2?** Disponível em: <https://www.solledenergia.com.br/por-que-falamos-que-a-energia-solar-reduz-co2/>. Acesso em: 7 set. 2023

ZILLES, R. et al. **Sistema Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica.** 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.