

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM MINI
GERADOR FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE: UM ESTUDO DE
CASO NO CAMPUS DO IFRN/SANTA CRUZ.**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

como parte dos requisitos para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUÍS DE FREITAS ARAÚJO

ORIENTADOR: Prof. Dr. Francisco De Assis Oliveira Fontes

Natal, agosto de 2017.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM MINI
GERADOR FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE: UM ESTUDO DE
CASO NO CAMPUS DO IFRN/SANTA CRUZ.**

LUÍS DE FREITAS ARAÚJO

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE**

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA
SENDO APROVADA EM SUA FORMA FINAL.**

PROF. Dr. FRANCISCO DE ASSIS OLIVEIRA FONTES - ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco De Assis Oliveira Fontes – Presidente (UFRN)

Prof. Dr. Lúcio Ângelo de Oliveira Fontes – Co-orientador (UFRN)

Prof. Dr. Cleiton Rubens Formiga Barbosa (UFRN)

Dr. Elierton Evangelista das Neves (Examinador Externo – PETROBRAS)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Araujo, Luis de Freitas.

Análise da viabilidade técnica e econômica de um mini gerador fotovoltaico conectado à rede: um estudo de caso no IFRN/Santa Cruz / Luis de Freitas Araujo. - 2018.

55 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Natal, RN, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Oliveira Fontes.

Coorientador: Prof. Dr. Lúcio Ângelo de Oliveira Fontes.

1. Energia fotovoltaica - Dissertação. 2. Geração distribuída - Dissertação. 3. Análise técnica - Dissertação. 4. Análise econômica - Dissertação. I. Fontes, Francisco de Assis Oliveira. II. Fontes, Lúcio Ângelo de Oliveira. III. Título.

“Em tudo dai graças.”

1 Tessalonicenses 5:18

Dedico essa dissertação aos meus pais

Vanderlei e Conceição.

Obrigado por tudo.

AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de iniciar sem agradecer a Deus por ter me dado saúde, sabedoria e paciência pra chegar até aqui.

Aos meus pais Vanderlei e Ceidão, por todo carinho, cuidado em que tiverem durante toda minha trajetória de vida.

À minha pequena grande família materna: Minha vó Marizete, meu tio Freitas Jr e minha tia Mariângela: Com eles aprendi o amor pela leitura, o respeito pela sapiência e a busca incessante pelo conhecimento.

À minha enorme família paterna aos quais eu herdei virtudes fundamentais para vida de qualquer ser humano. Com eles aprendi que o trabalho digno é a melhor arma contra nossos problemas cotidianos.

Tenho o orgulho de carregar no sangue a alcunha “Freitas Araújo” a qual representam as melhores qualidades oferecidas: educação e trabalho árduo.

Minha irmã Lílian, meu cunhado Haroldo e minha companheira de todas as horas Lylyane, obrigado pela presença de vocês em minha vida.

Aos meus amigos de graduação, aos companheiros que conheci na pós-graduação, aos amigos que fiz no IFRN/Santa Cruz, aos meus companheiros de Martins, vocês tornaram a jornada mais divertida e aconchegante nos momentos que dividimos juntos. Não quero citar nenhum nome com medo de esquecer alguém, mas todos, sem exceção, estão guardados no meu coração.

Não podia jamais terminar essa página sem citar dois nomes importantíssimos em minha vida: Maria do Socorro e Francisco Erismar, mais conhecidos por Corrinha e Neném. Não tenho palavras para agradecer o quanto vocês foram e são importantes em minha vida. Muito obrigado por terem sido tão presentes quando eu precisei me fazer ausente. Serei eternamente grato.

Por último e não menos importante finalizo agradecendo aos professores: Fontes pela acolhida como orientador, Cleiton e Lúcio, como avaliadores desse trabalho. Também ao avaliador externo, Elierton, que sempre esteve como uma sentinela, pronto para me ajudar. Ao amigo Vavá, técnico do laboratório de energia.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	19
1.1.1 Objetivo Geral	19
1.1.2 Objetivos Específicos.....	19
2. REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 O Potencial da Energia Fotovoltaica	19
2.1.1 A Energia Fotovoltaica Centralizada – Usinas Fotovoltaicas (UFVs)	21
2.1.2 O Mercado Global da Energia Solar FV	23
2.2 Geração Fotovoltaica Distribuída	27
2.2.1 Medição Bidirecional de Registros Independentes.....	27
2.2.2 Medições Simultâneas	28
3. Resolução 482/2012 e as alterações pela Resolução 687/2015.....	28
4. Estrutura Tarifária – Resolução 414 da ANEEL.....	30
4.1 Estrutura Tarifária – Definição global.....	31
4.1.1 Caracterização do IFRN como consumidor	31
5. Análise Técnica	31
5.1 Produtividade do Sistema (Y_f).....	32
5.2 Produtividade de Referência (Y_R)	32
5.3 Rendimento Global do Sistema (Performance Ratio – PR)	33
6. Análise Econômica.....	33
6.1 Matemática Financeira – Critérios de avaliação de investimentos.	33
6.2 Valor Presente Líquido – VPL	34
6.3 Taxa Interna de Retorno – TIR.....	35
6.4 PayBack Simples – PBS	35
6.5 <i>PayBack</i> Descontado – PBD	35
7. Descrição do sistema de Microgeração Fotovoltaica Conectada à rede elétrica com potência de 84 kW em Santa Cruz/RN.....	36
7.1 Objetivo do Projeto	36
7.2 Localização do Sistema Fotovoltaico.....	36
7.3 Descrição Geral da UFV IFRN – Campus Santa Cruz.....	39
7.4 Descrição Detalhada do Sistema	40
8. MATERIAIS E MÉTODOS	45
8.1 Análise Técnica do Gerador Fotovoltaico.....	45

8.1.1	Produtividade do Sistema (Y_f).....	45
8.1.2	Produtividade de Referência (Y_R).....	46
8.1.3	Rendimento Global do Sistema (<i>Performance Ratio – PR</i>).....	47
8.2	Análise Econômica.....	48
8.2.1	Estudo das Faturas de Energia em 2016 e 2017	48
8.2.2	Variação na Tarifa Energética.....	49
8.2.3	Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Taxa Mínima de Atratividade (TMA), <i>Payback</i> Descontado (PBD).	51
9.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	53
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

LISTA DE FIGURAS

Figure 1: Matriz Elétrica Brasileira. FONTE: EPE, 2016. Disponível em <www.mme.org.br>	13
Figure 2: Emprego em Energia renovável por setor. FONTE: IRENA, 2017.	15
Figure 3: Evolução da potência instalada em MW até maio de 2017. FONTE: Nota Técnica 0056/2017-SRD/ANEEL. Disponível em www.aneel.gov.br/geracao-distribuida	16
Figure 4: Número de instalações por Estado até maio de 2017. FONTE: Nota Técnica 0056/2017-SRD/ANEEL. Disponível em www.aneel.gov.br/geracao-distribuida	16
Figure 5: Mesorregiões do Rio Grande do Norte. (Fonte: http://www.baixarmapas.com.br/mapa-de-mesorregioes-do-rio-grande-do-norte).....	17
Figure 6: Foto área do campus do IFRN/SC. FONTE: Portal IFRN.....	18
Figure 7: Mapa potencial solar no mundo. FONTE: Miranda (Adaptado)	20
Figure 8: Mapa potencial solar brasileiro. FONTE: Miranda (Adaptado)	20
Figure 9 - Esquema de uma usina fotovoltaica. FONTE: CRESESB, 2014.	21
Figure 10 - Potencia percentual da participação das diversas fontes na matriz elétrica brasileira. FONTE: ANEEL/BIG, 2017.....	22
Figure 11 - Exemplo esquemático medidor bidirecional. FONTE: CRESESB, 2014.	27
Figure 12 - Exemplo esquemático com dois medidores. FONTE: CRESESB, 2014.....	28
Figure 13: Desenho esquemático do modelo de medição instantâneo. FONTE: CRESESB, 2014.	28
Figure 14 - VPL em função da TIR. FONTE: SAMANEZ, 2002.	35
Figure 15 – Vista superior do local de instalação da UFV IFRN – Santa Cruz. FONTE: Memorial descritivo do projeto.	37
Figure 16- Vista superior da área de instalação indicando a disposição de instalação dos módulos. FONTE: memorial descritivo do projeto.....	37
Figure 17 - Esquema de princípio de um sistema fotovoltaico sobre telhado conectado à rede elétrica. FONTE: Memorial Descritivo do projeto.	38
Figure 18 - Esquema de instalação da planta fotovoltaica. FONTE: Memorial descritivo.....	40
Figure 19 - Inversor ABB - TRIO 20.0 TL - OUTD 400. FONTE: Fabricante.....	41
Figure 20 - Exemplo de modelo de estrutura metálica. FONTE: Memorial descritivo do projeto	43
Figure 21 - Modelo de placa de advertência. FONTE: Memorial descritivo do projeto.....	44
Figure 22: Radiação média mensal por dia em Florânia/RN no plano Horizontal. FONTE: SUNDATA.....	45
Figure 23 - Dados para cálculo do PBS, PBD, TIR e VPL. FONTE: Autor.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Capacidade Elétrica Instalada (MW) entre 2012 e 2015.....	14
Tabela 2: Resumo dos Leilões de Energia de Reserva.....	23
Tabela 3: Potencial de energia instalado em vários países.....	26
Tabela 4 - Características Técnicas do painel fotovoltaico. FONTE: Fabricante	41
Tabela 5 - Características Técnicas do Inversor.....	42
Tabela 6 - Especificação do cabeamento utilizado.	44
Tabela 7 - Tabela 7 - Produção energética em 2017. (FONTE: Aurora Vision).....	45
Tabela 8 -Irradiação Solar Diária Mensal. FONTE: SunData.....	46
Tabela 9 -Média mensal de irradiação e produtividade de referência. FONTE: SunData.	47
Tabela 10 -Rendimento Global do Sistema. FONTE: Autor.	47
Tabela 11: Resumo da Análise Técnica. FONTE: Autor.....	48
Tabela 12 - Total Pago à concessionária nos anos de 2016 e 2017.....	48
Tabela 13 -Dados tarifários entre os anos de 2009 e 2017. FONTE: ANEEL.....	49
Tabela 14 - Ajuste no preço tarifário nos próximos 25 anos.FONTE: Autor.	49
Tabela 15 -Geração mensal em kWh (média e valores medidos). FONTE: Autor.....	51
Tabela 16 - Resumo da análise econômica. FONTE: Autor	52

RESUMO

Informações advindas de empresas de pesquisa nacionais mostram que a matriz elétrica brasileira é composta quase em sua totalidade da energia hidrelétrica, em torno de 65%. No entanto há uma necessidade urgente na diversificação da nossa matriz de forma que haja uma maior segurança para o consumidor em períodos com escassez de chuva e, além disso, que essas variações na geração de energia elétrica se adaptem às discussões atuais referentes à baixa emissão de carbono além de garantir uma maior preservação ambiental. Nesse contexto, surge a energia solar fotovoltaica que, além de possuir um grande potencial na produção de eletricidade oriunda de um recurso inesgotável – o sol - ainda é uma fonte energética que contribui imensamente para a economia do país devido ao seu elevado índice de empregabilidade, com pouco mais de oito milhões de empregos gerados no mundo somente no ano de 2016. Apesar de ainda representar a menor parcela na participação da matriz energética elétrica nacional, a energia solar fotovoltaica começa a mostrar sinais de força e potencial em crescimento no cenário nacional desde a resolução 482 de 2012, atualizada pela norma 687 de 2015 que, juntas, incentivam e criam oportunidades mais acessíveis para o consumidor/gerador de pequeno porte. Com base nos conceitos de mini e micro geração distribuída, contidos nas normas supracitadas, o Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) foi a primeira instituição de ensino pública no Brasil a aderir ao sistema de compensação energética regulamentado pela ANEEL e hoje já conta com 14 usinas em operação onde quatro encontram-se em projeto de ampliação e outras sete encontram-se em fase de instalação. Uma dessas usinas situa-se no campus da cidade de Santa Cruz localizada na mesorregião do agreste potiguar. A mesma possui um sistema de micro geração fotovoltaica conectada à rede com potência nominal de instalação de 84kWp e será tema de discussão nesse trabalho. Essa dissertação terá como objetivo uma análise técnica (através das análises da produtividade do sistema, produtividade de referência, desempenho global - performance ratio) e econômica (análise pelo método *payback* simples e descontado, Valor Presente Líquido – VPL e a Taxa Interna de Retorno - TIR) do micro gerador fotovoltaico com a finalidade de verificar o funcionamento atual do sistema e compara-lo com outros sistemas. Além de verificar a viabilidade econômica da instalação dentro do período de vida útil dos componentes do sistema fornecido pela empresa responsável pela instalação que é de 25 anos.

Palavras-Chave: Energia Fotovoltaica; geração distribuída; Análise técnica; Análise econômica.

ABSTRACT

According to national research companies, the Brazilian electrical matrix is almost totally composed by hydroelectric energy, around 65%. However, it is necessary to change our matrix in a way that makes it more secure for the consumers in periods of draught. Moreover, these variations in the electric power generation have to be adapted to the discussions about low carbon emissions and environmental preservation. In this context, the photovoltaic solar energy drawn with an inexhaustible generation fount – the sun - and great potential in producing electrical energy. Moreover, the photovoltaic solar energy plays a huge contribution to the Brazilian economy due to its high employability index, with more than eight million jobs created in the world in the year of 2016 alone. Despite representing the smallest participation in the national electrical matrix, the photovoltaic solar energy starts to show signs of power and potential in the national scenario since the resolution 482 of 2012, updated by the norm 687 of 2015 that, together, encourage and create opportunities more accessible to the small consumer/generator. According the concepts about mini and micro distributed generation, contained in the norms already cited, the Federal Institute of Rio Grande do Norte (IFRN) was the first Brazilian public institution of teaching to adhere to the system of electrical energy compensation of the ANEEL and today it counts with 14 plants in operation which four are in extension phase and other seven are in installation phase. One of these plants is located at the Santa Cruz Campus. This plant has a photovoltaic micro generation connected to the grid with installation nominal power of 84kWp and will be the subject of discussion of this master thesis. The target of this master thesis is to perform a technical analysis (through the analyses of system productivity, reference productivity, global performance – performance ration) and economic analysis (simple and discounted payback, liquid present value – VPL and intern return index – TIR) of the photovoltaic micro generator in order to verify the actual operation system condition and compare it with other systems. In addition, this thesis will also verify the economic viability of the installation inside the 25 years' life period of the system components.

Keywords: Photovoltaic Energy; Shared Generation; technical analyses; economic analyses.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de uma sociedade está intimamente ligado com a capacidade de produção e geração de energia em uma nação. (DE LIMA; 2017) afirma que o fornecimento de energia para casas e edifícios, agricultura, transporte, serviços e indústria de maneira sustentável e eficiente garante recursos para as gerações futuras, ao mesmo tempo em que é um desafio para a humanidade.

Com a crescente discussão a respeito dos efeitos que as emissões de gases de efeito estufa (gerados principalmente pela queima de combustíveis fósseis) causam no ambiente, muitos países estão dedicando tempo na reformulação das suas políticas energéticas nacionais visando produzir energia com baixa emissão de carbono e, principalmente, a partir de fontes renováveis (ADARAMOLA, 2015).

O Brasil possui uma matriz energética altamente dependente dos combustíveis fósseis e seus derivados, energia térmica e uma pequena parcela da energia nuclear.

Já quando se trata da matriz energética elétrica, os dados do Balanço Energético Nacional (BEN) divulgado anualmente pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em parceria com o Ministério de Minas e Energia (MME) mostram que essa matriz é composta principalmente de energia hidrelétrica. Esta assumiu boa parte na totalidade de geração em 2016 - em torno de 64%. (MME/EPE, 2014, 2016).

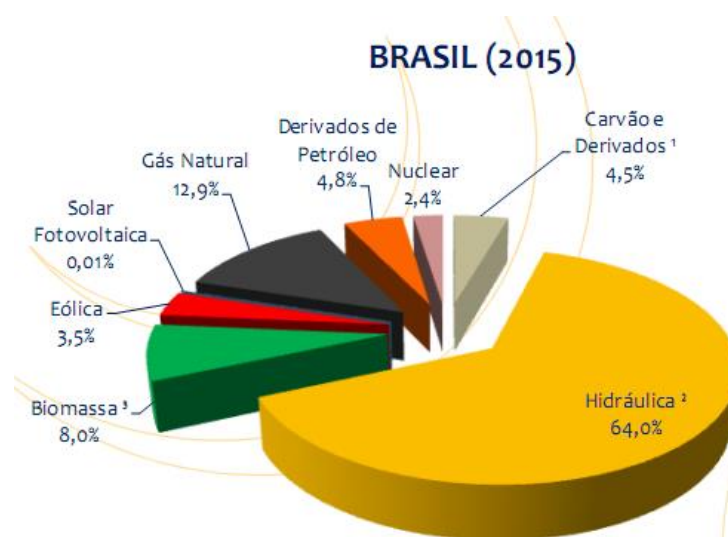


Figure 1: Matriz Elétrica Brasileira. FONTE: EPE, 2016. Disponível em <www.mme.org.br>

No entanto, a implantação e manutenção de usinas hidrelétricas vão de encontro ao que se debate no mundo em relação à preservação ambiental uma vez que necessitam de uma disponibilidade elevada de água, além de destruir a FAUNA e FLORA no local da instalação de sua instalação. Portanto, deve-se pensar em fontes energéticas alternativas que sejam ecologicamente sustentáveis (WWF-BRASIL, 2015).

A tabela abaixo mostra que há uma crescente oferta na capacidade instalada (Em MW) de energia renovável no Brasil entre os anos de 2012 e 2015 segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEM). A tabela 1 mostra que houve entre 2014 e 2015 um aumento de 56,2% e 42,3% na capacidade instalada de energia eólica e solar, respectivamente. Enquanto na energia hidrelétrica esse aumento foi apenas de 2,8%.

Tabela 1: Capacidade Elétrica Instalada (MW) entre 2012 e 2015.

Fonte	2012	2013	2014	2015	Δ13/12	Δ15/14
Hidrelétrica	84.294	86.018	89.193	91.650	2,0%	2,8%
Térmica	32.778	36.528	37.827	39.564	11,4%	4,6%
Nuclear	2.007	1.990	1.990	1.990	-0,8%	0,0%
Eólica	1.894 ¹	2.207 ¹	4.888	7.663	16,5%	56,2%
Solar	-	-	15	21	-	42,3%
Capacidade Disponível	120.973	126.743	133.914	140.858	4,8%	

¹ Dados de energia solar inclusos nesse ano.

Fonte: MME/EPE. Balanço Energético Nacional 2014: ano base 2013 e 2016 com base em 2015. Disponível em www.mme.gov.br

Além das fontes energéticas renováveis serem ecologicamente sustentáveis, estudos realizados pela Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA) mostram como essas fontes energéticas contribuem para um aumento significativo na economia do país devido ao alto índice de empregabilidade.

Segundo (IRENA, 2017) só em 2016 houve um acréscimo de 2,8% nos empregos nas energias renováveis (8,3 milhões de empregados) em relação ao ano de 2015, excluindo a energia hidrelétrica. O Brasil juntamente com a China, Estados Unidos, Índia, Japão e a Alemanha foram os principais responsáveis por esse aumento.

A energia solar fotovoltaica foi o setor que mais empregou – cerca de 3,1 milhões de empregos gerados. Um aumento de 12% em relação ao ano de 2015. A China, os Estados Unidos e a Índia foram os maiores empregadores do setor.

A figura 2 ilustra os dados dos empregos oriundos da energia renovável em suas mais diferentes formas.

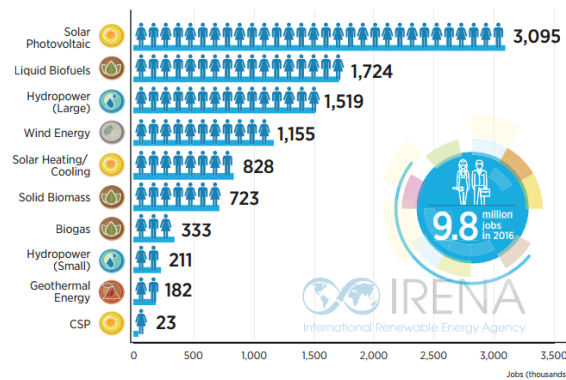


Figure 2: Emprego em Energia renovável por setor. FONTE: IRENA, 2017.

Apesar de ainda representar a menor parcela na participação da matriz energética elétrica nacional, a energia solar fotovoltaica começa a mostrar sinais de força e potencial em crescimento no país desde a resolução 482/2012 (ANEEL, 2012). Esta resolução permite que edifícios comerciais e residenciais produzam a sua própria energia a partir de fontes renováveis, fornecendo o excedente de produção para a rede de distribuição local.

Com algumas modificações e válida desde 1 de março de 2016, a norma 687/15 cria novas regras com o objetivo de reduzir custos e o tempo na implantação da usina, além de aumentar o número de consumidores que podem aderir ao sistema (ANEEL, 2015). Além de permitir o uso de qualquer fonte renovável também impõe limites na geração, sendo denominada “microgeração distribuída” a central geradora com potência instalada de até 75KW, e “minigeração distribuída” para as centrais que operam entre 75KW e 5MW, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Outro ponto importante de se destacar nessa norma é que quando há uma geração energética superior ao consumo, o consumidor ganha créditos energéticos que poderão ser abatidos nas faturas seguintes, respeitando o limite do prazo de validade que antes era de 36 meses e passou para 60 meses.

Após a validação dessas normas técnicas houve um aumento significativo nas instalações de micro e minigeradores distribuídos. A figura 3 ilustra a evolução da potência instalada em Megawatt até abril de 2017.

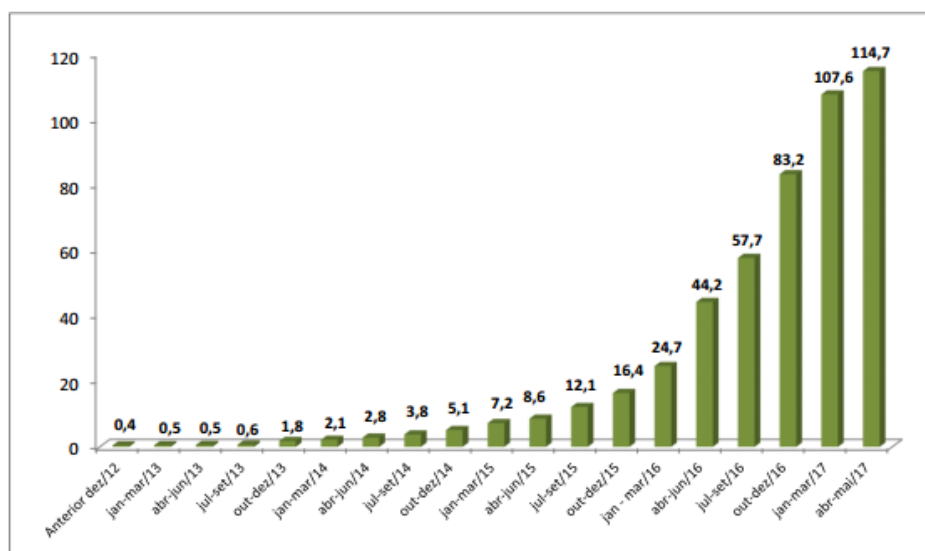


Figure 3: Evolução da potência instalada em MW até maio de 2017. FONTE: Nota Técnica 0056/2017-SRD/ANEEL. Disponível em www.aneel.gov.br/geracao-distribuida

A figura 4 ilustra quantidade de sistemas de energia distribuída por Estado, indicando a liderança do Estado de Minas Gerais no setor. O Rio Grande do Norte é o 14º Estado em quantidade de sistemas instalados, empatado com o Estado de Goiás, com um total de 176 unidades instaladas. Com pouco mais de 10 mil instalações, o país possui, segundo a Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR), em torno de 80MW de potências instalados, o suficiente para gerar energia elétrica para mais de 45 mil residências.

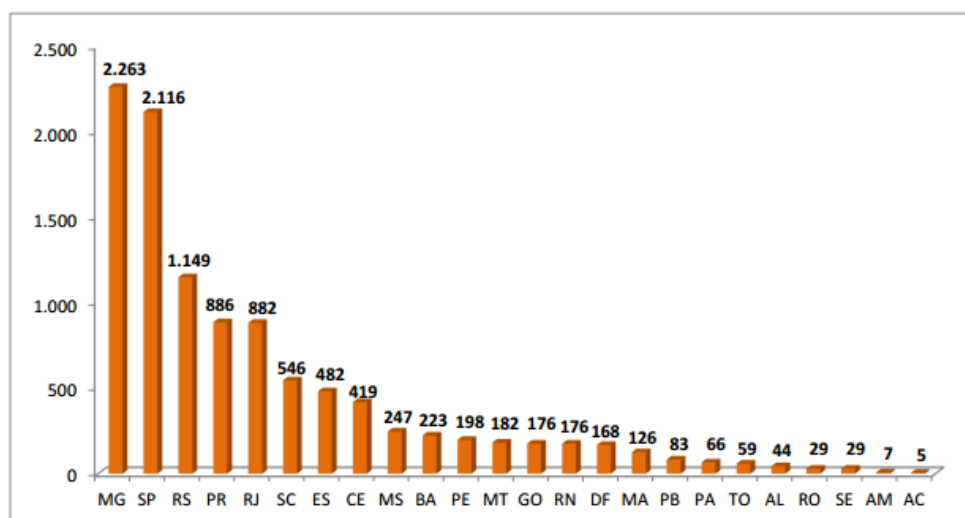


Figure 4: Número de instalações por Estado até maio de 2017. FONTE: Nota Técnica 0056/2017-SRD/ANEEL. Disponível em www.aneel.gov.br/geracao-distribuida

Situado na região Nordeste do Brasil, o Estado do Rio Grande do Norte (RN) destaca-se pelo seu alto índice de radiação solar. O Estado é dividido em quatro mesorregiões: Oeste potiguar, Central Potiguar, Agreste Potiguar e Leste Potiguar e estão definidas na figura 5:

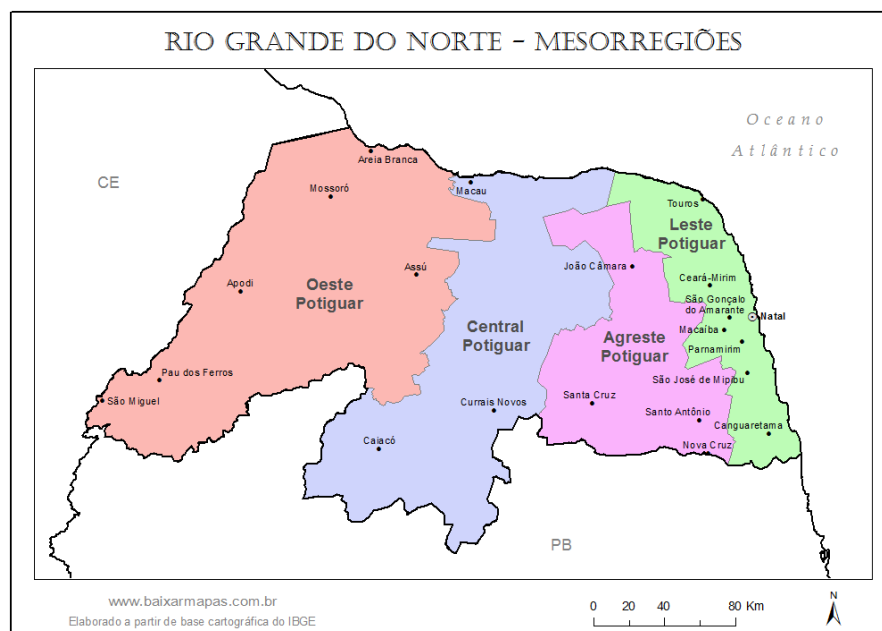


Figure 5: Mesorregiões do Rio Grande do Norte. (Fonte: <http://www.baixarmapas.com.br/mapa-de-mesorregioes-do-rio-grande-do-norte>)

De acordo com dados do Centro de Estratégias em Recursos Naturais e Energia (CERNE), em 2013 o Estado contava apenas com 56 kW em potência instalada de energia solar fotovoltaica, oriundos de 4 unidades consumidoras. Em 2017 já são cerca de 170 unidades consumidoras instaladas e um potencial de 2219 kW de potência instalada.

Um grande passo para o aumento significativo nesses números foi à adesão, por parte do Estado, ao convênio ICMS 16/2015 do Conselho Nacional de Política Fazendária (Confaz) que isenta o pagamento de tributo estadual (ICMS) sobre o excedente de energia elétrica gerada por sistema de geração distribuída. A partir desta isenção o consumidor que produz sua própria energia pagará apenas a energia que recebe da rede elétrica descontada a eletricidade que ele produzir.

O Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) visando contribuir para um desenvolvimento energético sustentável e buscando diminuir custos na tarifa energética, instalou no ano de 2013 o seu primeiro gerador fotovoltaico, sendo a primeira instituição de ensino pública no Brasil a aderir ao sistema de compensação energética regulamentado pela ANEEL. Hoje já conta com 14 usinas em operação onde 4 encontram-se em projeto de ampliação e outras 7 encontram-se em fase de instalação. Estima-se que até o final de 2018 haja uma redução de 30% na energia elétrica consumida no IFRN.

Situada na mesorregião do agreste potiguar caracterizada por estar exposta durante longos períodos do ano a uma elevada radiação solar, a cidade de Santa Cruz sedia um campus do IFRN e sobre ele foi inserido um gerador solar fotovoltaico com capacidade de 84,8 kWp, ocupando uma área de aproximadamente 480m².



Figure 6: Foto área do campus do IFRN/SC. FONTE: Portal IFRN

Observando a necessidade na matriz elétrica nacional por fontes renováveis de energia e as políticas de incentivo ao uso deste tipo de energia, este trabalho analisará aspectos técnicos e econômicos do projeto da instalação do gerador fotovoltaico do campus do IFRN em Santa Cruz a partir da coleta de dados de consumo e geração elétricos obtidos pela Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN) e por dados coletados nos seus inversores, respectivamente. Os dados serão analisados por um período de 6 meses do ano de 2016 (sem gerador fotovoltaico) e 6 meses do ano de 2017 (com o gerador fotovoltaico em operação), e posteriormente serão comparados entre si. Será feita uma projeção de custos financeiros no período citado para fazer uma comparação com a projeção econômica.

Também será realizada uma coleta de dados da radiação solar local por igual período a fim de simular uma projeção de geração ideal da energia e comparar com a geração real de acordo com o projeto. Assim, haverá possibilidade de identificar possíveis erros na instalação e/ou dimensionamento dos componentes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um estudo comparativo técnico e econômico na energia gasta pelo *campus* do IFRN/Santa Cruz antes e depois da instalação e operação da usina solar fotovoltaica por um período de um ano (6 meses antes e 6 meses depois). Além de poder comparar dados reais com ideais na produção energética.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Fazer uma análise econômica a partir da comparação de consumo e geração energética entre os anos de 2016 e 2017 no *campus* do IFRN/Santa Cruz;
- Realizar uma análise técnica comparando dados técnicos de geração *geração ideal x geração real*;
- Buscar possíveis erros de projeto e propor eventuais melhorias no mesmo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Potencial da Energia Fotovoltaica

A matriz elétrica brasileira é composta em sua grande maioria por fontes renováveis, tendo a energia hidrelétrica como a sua principal fonte. No entanto, a necessidade de diversificar essa matriz inserindo fontes renováveis é o que vem incentivando os pesquisadores e empresários a investir, por exemplo, em energia eólica e solar fotovoltaica.

Devido ao seu vasto território e os altos índices anuais de irradiação solar, o Brasil dispara como um forte potencial gerador de energia solar, principalmente fotovoltaica. De acordo com dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) o país já conta com 77,6 MW instalados em geração fotovoltaica distribuída além de possuir um potencial, levando em conta apenas os telhados residenciais, de 169GW, sem contar com os edifícios comerciais e industriais. Esses dados mostram como a importância nesse tipo de fonte renovável deve ser visto com um olhar mais otimista nos próximos anos.

As figuras 7 e 8 ilustram o potencial solar brasileiro em relação ao resto do mundo e individualmente (MIRANDA, 2016)

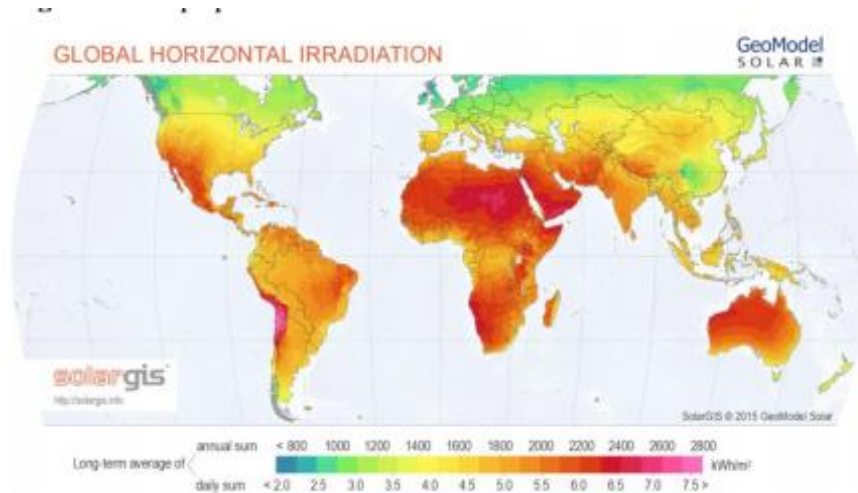


Figure 7: Mapa potencial solar no mundo. FONTE: Miranda (Adaptado)

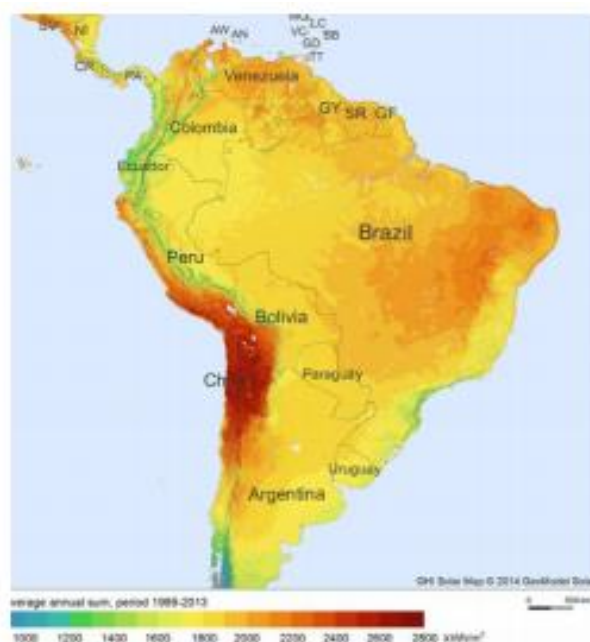


Figure 8: Mapa potencial solar brasileiro. FONTE: Miranda (Adaptado)

Ainda segundo a ABSOLAR, a energia solar fotovoltaica teve uma tímida participação na matriz elétrica em 2016, em torno de 0,02% mas há uma previsão de crescimento para os anos de 2024 e 2030 de 4% e 8% respectivamente.

De acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), além da geração distribuída, já se encontra em operação várias usinas fotovoltaicas espalhadas por todo território nacional, contabilizando um total de 23,7 MW de potência fiscalizada. O Estado da Bahia é onde se concentra o maior número de investimentos.

Apesar dos números otimistas apresentados e dos avanços tecnológicos na confecção de sistemas fotovoltaicos, grandes ainda são as barreiras que favorecem a maior penetração dessa tecnologia no País. O custo dos equipamentos ainda é o principal fator que vai contra o avanço nas instalações. Aliado a isso, o país ainda não possui uma linha de crédito convidativa e ainda faltam maiores inventivos fiscais e regulatórios por parte do governo para incentivar a geração de energia pelos próprios consumidores.

A geração de energia fotovoltaica pode ser dividida basicamente em usina fotovoltaica ou geração centralizada e geração distribuída. A seguir serão descritos detalhadamente os dois sistemas e suas capacidades instaladas espalhadas mundo a fora.

2.1.1 A Energia Fotovoltaica Centralizada – Usinas Fotovoltaicas (UFVs)

Usinas Fotovoltaicas (UFV) são ditas quando grandes áreas são recobertas com painéis solares, que convertem a luz do sol em energia. Essa energia gerada é inserida na rede geralmente através de tensão média 13,8 ou 34,5 kV por meio das linhas de transmissão.

A figura 9 ilustra o esquema de uma UFV utilizando-se de um transformador que eleva a tensão até o nível de distribuição utilizado.

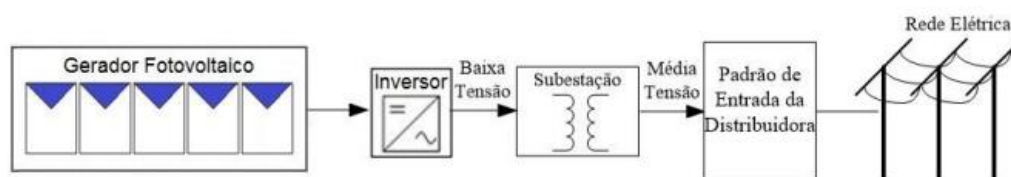


Figure 9 - Esquema de uma usina fotovoltaica. FONTE: CRESESB, 2014.

Usinas Fotovoltaicas no Brasil

De acordo com (CRESESB, 2014) a primeira UFV implantada no Brasil foi no município de Tauá/CE, distante 360km de Fortaleza. Entrou em operação em julho de 2011 e na época a potência instalada era de 1 MW distribuídos em 4.680 módulos e 9 inversores.

Dados adquiridos no Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL até 18 de junho de 2017 afirmam que o Brasil possui 45 UFV em operação totalizando 23,7 MW de potência fiscalizada e 27,76 MW de potência outorgada. Há ainda 38 empreendimentos em construção e com 1 GW de potência outorgada.

A figura 10 ilustra a matriz elétrica nacional, mostrando a energia hídrica com enorme participação em relação as demais. É importante salientar que mesmo com os

avanços nas implantações de UFV a energia solar ainda é pouco utilizada na nossa matriz.

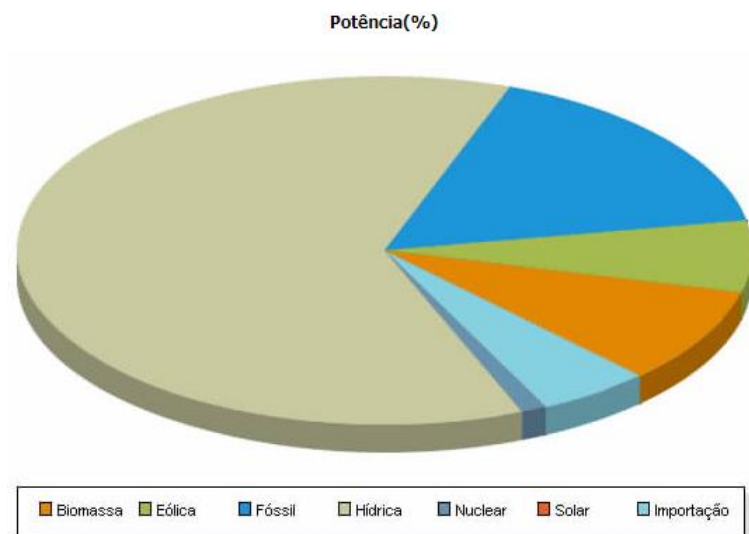


Figure 10 - Potencia percentual da participação das diversas fontes na matriz elétrica brasileira. FONTE: ANEEL/BIG, 2017.

Para viabilizar a inserção das usinas fotovoltaicas na matriz elétrica brasileiro é necessário haver leilões públicos de energia denominados por Leilão de Energia de Reserva (LER).

De acordo com (ALENCAR e URBANETZ, 2015) o primeiro leilão de empreendimentos fotovoltaicos foi realizado no ano de 2013 no Estado de Pernambuco dentro do programa “Pernambuco Sustentável” onde 05 empreendimentos foram contemplados e habilitados a produzir um total de 23 MW a um preço médio de R\$ 228,63 MWh.

Em 2014 foi realizado o primeiro leilão no âmbito federal, o LER 2014. Neste certame foram contemplados 31 projetos para produzirem um total de 889,7 MW a um preço de R\$ 215,2/MWh.

O 1º LER/15 foi realizado em 28 de agosto de 2015, e teve suas diretrizes definidas pela portaria nº 69 do MME. Contou com 30 projetos contemplados num total de 833,8 MW a um preço médio de 301,79/MWh. O aumento de 40,3% em relação ao preço médio da energia contratada em 2014, segundo (EPE, 2015), justifica-se pela valorização cambial e pelos ajustes de financiamento para os projetos.

O 2º LER/15 foi definido pela portaria nº70 do MME que define que os projetos contratados deverão iniciar a operação em 1º de novembro de 2018, terão um prazo de suprimento de 20 anos, os projetos deverão ser totalmente dedicados ao Contrato de Energia de Reserva e terão preços anualmente reajustados pelo IPCA.

No 2º LER/15 foram contemplados 33 projetos totalizando 1115,9 MW a um preço médio de 297,75/MWh, uma redução de 1% em relação ao preço médio contratado no 1º LER/15.

Em 2016 houve o 2º LER/16 voltado para as energias eólica e solar. Já haviam sido cadastrados 393 empreendimentos na área da energia solar com uma capacidade de 12.458 MW e 799 projetos na eólica, somando 33.225 MW em capacidade instalada. No entanto, por meio de uma nota técnica, a EPE cancelou o 2º LER/16 alegando a crise econômica nacional além de uma sobreoferta no sistema. Também foi informado que há a possibilidade de descontratar projetos que ainda não entraram em operação comercial, reduzindo assim o volume da sobreoferta.

A tabela 2 mostra de forma resumida os resultados obtidos nos Leilões de Energia de Reserva:

Tabela 2: Resumo dos Leilões de Energia de Reserva

Leilão	Quantidade de Projetos Contemplados	Capacidade de Instalação (MW)	Preço médio da energia produzida (R\$/MWh)
1º LER/14	31	889,7	215,2
1º LER/15	30	833,8	301,79
2º LER/15	33	1115,9	297,75
1º Ler/16	Cancelado	Cancelado	cancelado

Fonte: Autor adaptado de EPE

2.1.2 O Mercado Global da Energia Solar FV

O (REN, 2017) compila as informações dos dados de energia renovável em todo o mundo. O relatório publicado em 2017 que toma o ano de 2016 como ano base, exalta um aumento de 9% na produção de energias renováveis em todo o planeta em relação ao ano de 2015. Só a energia fotovoltaica teve um aumento de 47% em capacidade instalada, o que significa um aumento de 75 GW, fazendo o montante mundial dessa energia saltar para 303 GW. Na eólica, no mesmo período, houve um aumento de 12% na produção de energia, um equivalente a 55 GW, totalizando 487 GW.

Ainda segundo o REN 2017 as principais nações produtoras de energia fotovoltaica são: China, Estados Unidos, Japão, Índia, Reino Unido, Alemanha, Coreia, Austrália, Filipinas e Chile. Em 2016 a China, maior produtora mundial, teve um incremento de 46% na produção em relação a 2015.

Informações pertinentes a cinco dos principais países produtores de energia fotovoltaica estão elencados abaixo, mostrando como ocorre a expansão no sistema FV nesses locais.

- **Alemanha**

De acordo com (WEIDA, 2016), a Alemanha passou por um período de transição em sua matriz energética, no qual tenta eliminar a geração de energia nuclear e em troca, incentivar a produção de energia elétrica limpa e sustentável, devido a isso vem se tornando um dos principais países produtores de energia solar fotovoltaica no mundo. Essa substituição de tecnologia obrigou empresários ligados à energia nuclear a migrarem para tecnologias renováveis (CHERP et al., 2017).

De acordo com (SCHAFFER; BRUN, 2015) nos anos 2000 o governo alemão criou um programa intitulado 100.000 telhados, o qual incentivava, através de subsídios, os consumidores alemães a gerarem sua própria energia através da energia fotovoltaica. No ano de 1991 havia pouco mais de 1100MWp instalados após os programas de incentivos do governo, a Alemanha teve, no ano de 2012, um total de 32.600 MWp instalados.

Em 2016 houve um total de 1200 MW de instalações solares aproximadamente de acordo com o relatório elaborado pela Mercom Capital Group nesse mesmo ano.

Entre 2015 e 2016 a Alemanha aumentou em 1,5 GW o seu potencial de produção, um valor abaixo do esperado para o crescimento anual de acordo com a Lei de Energias Renováveis (EEG), que prevê um aumento de 2,5 GW por ano. Ao final de 2016 o país contava com um total de 41,3 GW instalados.

O IEA aponta que até o ano de 2020 a Alemanha atingirá um total de 51,8 GW.

- **Chile**

O governo Chileno também se mostra interessado em aumentar a participação das energias renováveis em sua matriz elétrica. Em (ESCOBAR et al., 2014) encontra-se referência a um novo regulamento nacional o qual estabelece que a quota de energia proveniente de fontes renováveis deverá atingir 20% até 2025.

Para (PARRADO et al., 2016) o Chile não é um país produtor de combustível fóssil e, como esse ainda é o mais barato na matriz elétrica mundial, precisa exportá-lo para tornar o preço da energia economicamente viável para os chilenos. No entanto, é necessário aderir a fontes energéticas independentes para que o país possa viabilizar uma matriz segura e confiável, além de diversificar a geração. Em 2010 o Chile se uniu a Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e se comprometeu a ajudar nas medidas contra a degradação climática no planeta, incorporando metas para reduzir a emissão de gases do efeito estufa. Segundo (GR?GEDA et al., 2016) em 2008 o país publicou a lei 20.257 que incentiva a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis.

O Chile possuía até julho de 2014, 184MW instalados e em operação de energia solar, correspondente a 10,8% do total da energia renovável não convencional do país segundo (GR?GEDA et al., 2016). Porém, nesse mesmo ano já havia um total de 448 MW em construção, 5809MW aprovados e 4155MW sob qualificação.

Em 2016, foi o maior produtor da América Latina graças a indústria de mineração em constante crescimento. Em 2016 houve um acréscimo de 0,7 GW em sua matriz elétrica, totalizando 1,6 GW.

- **China**

Devido aos incentivos governamentais o desenvolvimento na tecnologia fotovoltaica teve um aumento considerável nos últimos anos. Para (HUANG et al., 2016) a China influenciou a economia FV global devido aos baixos preços e elevada oferta da mão-de-obra qualificada. Aliado a isso, nota-se um aumento significativo na eficiência dos produtos fotovoltaicos chineses, o que abriu os olhos dos importadores globais para produtos da indústria FV.

Por ser um dos países mais populosos do mundo e em aumento populacional crescente, a demanda energética da China é uma das maiores do mundo. Aliado a isso o país possui recursos solares em abundância, cerca de dois terços do território nacional recebe até 2000h de sol por ano (ZHAO et al., 2013).

Com os dois fatores supracitados o governo chinês investiu fortemente em políticas de incentivo tanto a produção de energia solar fotovoltaica quanto na produção de insumos da fabricação dessa indústria. De acordo com (DIN?ER, 2011) o governo chinês pretende chegar em 2050 a 1000GW em potência instalada com energia fotovoltaica.

Dados do IEA referentes a 2016 mostram a China como o maior produtor de energia fotovoltaica mundial, em um total de 34,5 GW instalados em 2016. Segundo o (REN, 2017) esse aumento corresponde a 126% em relação ao total instalado no ano de 2015, atingindo em 2016 um total de 77,4 GW. .

- **EUA**

A principal fonte de geração de energia elétrica dos Estados Unidos, ainda é oriunda dos derivados dos combustíveis fósseis. De acordo com informações obtidas pelo site que administra as informações de energia americana (EIA – *Energy Information Administration*) no ano de 2016 os EUA produziram, no total, 4079 milhões de MWh, sendo 609 milhões de MWh (15% do total) oriundos de fonte solar segundo dados compilados por (TRAN; SMITH, 2017).

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA) em 2014 a produção de eletricidade por recursos renováveis teve os seguintes números 22 GWh de energia solar fotovoltaica, 281 GWh de energia hidráulica e 183 GWh de energia eólica.

Dados do REN 2017 apontam os Estados Unidos como segundo país que mais investiu em energia solar fotovoltaica no ano de 2016 totalizando um incremento de 20% em suas instalações, ficando pela primeira vez na maior geração de fontes alternativas do país. Esse incremento equivale a 14,8 GW somados ao sistema que chegou, no fim do mesmo ano a um total de 40,9 GW instalados.

- **Índia**

A Índia, segundo (MANJU; SAGAR, 2017), é o sétimo país que mais produz energia no mundo e é o quarto país que mais consome energia, perdendo apenas para China, EUA e Rússia.

O carvão é o principal combustível fóssil do país e atende cerca de 55% das necessidades energéticas da Índia. Ainda de acordo com (MANJU; SAGAR, 2017) 73% da energia total consumida na Índia advém do carvão e petróleo. As energias renováveis aparecem na seguinte composição: 22% de biomassa e resíduos, 3% de hidrelétricas e 1% de outras fontes de energia renováveis. Por não produzir petróleo suficiente, o país se vê na necessidade de importar derivados de petróleo de outros países.

Por possuir uma irradiação solar favorável a geração de energia fotovoltaica o Instituto Nacional de Energia Solar da Índia determinou um potencial solar em torno de 750 GW, utilizando-se apenas 3% da área favorável à instalações de usinas solares.

Um relatório elaborado pela *Mercom Capital Group*, em 2016 foi instalado na Índia algo em torno de 4,1 GW, um aumento em mais de 2 GW em relação a 2015, de acordo com o relatório REN 2017. O total de energia produzida em 2016 chegou a 9,1 GW.

Embora haja um potencial para mais de 20 GW a ser explorado e incentivos governamentais favoráveis para atingir essa capacidade, as condições técnicas (conexão e restrição de rede, por exemplo) do país são fortes barreiras que impedem o avanço dessa tecnologia e criam barreiras para atingir o objetivo de 40GW instalados até 2020.

A tabela 3 mostra o resumo do potencial instalado em 5 dos principais países produtores globais e no Brasil.

Tabela 3: Potencial de energia instalado em vários países.

País	Potencial Instalado até 2016 (GW)
China	77,4
Alemanha	41,3
EUA	40,9
Índia	9,1
Chile	1,6
Brasil	0,27

Fonte: REN21, 2017

Para o (REN, 2017) só no ano de 2016 foram instalados 75 GW de energia fotovoltaica no mundo inteiro, totalizando 303 GW. Isso equivale a um total de 31.000 painéis solares instalados por hora no planeta.

2.2 Geração Fotovoltaica Distribuída

Nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) não há necessidade de uso de baterias e, portanto, a energia produzida pode ser consumida diretamente pela carga local ou injetada diretamente na rede elétrica convencional e ser consumida por outras unidades consumidoras conectadas ao sistema de produção.

A fim de quantificar o total de energia elétrica produzida e o custo na redução, existem dois tipos de medição da energia considerados pela resolução 482/2012 (visto mais adiante), são eles:

2.2.1 Medição Bidirecional de Registros Independentes

Nesse tipo de medição, a energia consumida e a energia injetada na rede de distribuição são registradas separadamente pelo medidor bidirecional (ou por dois medidores medindo separadamente o sentido da energia). A cada instante o registro de um dos sentidos será realizado.

Nas figuras 11 e 12 podemos ver a medição com um medidor bidirecional e com dois medidores em separado, respectivamente:

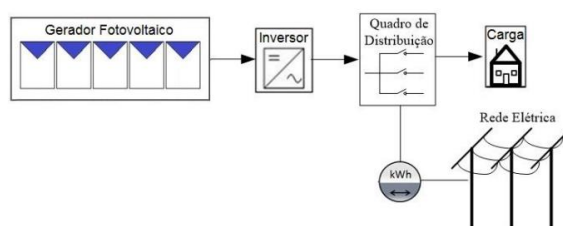


Figure 11 - Exemplo esquemático medidor bidirecional. FONTE: CRESESB, 2014.

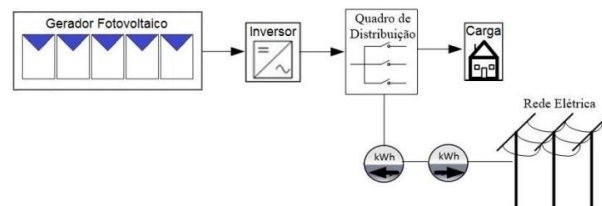


Figure 12 - Exemplo esquemático com dois medidores. FONTE: CRESEB, 2014

2.2.2 Medições Simultâneas

Quando deseja-se ter informações mais precisas sobre o consumo de energia e a produção do sistema fotovoltaico, deve-se adotar esse sistema de medição. É o caso do IFRN/SC, onde a medição da energia gerada pelo sistema fotovoltaico é independente da medição da energia consumida.

Na condição de medição simultânea, toda energia gerada e consumida são medidas, porém os cálculos do balanço energético final são realizados posteriormente, pela distribuidora. Esse tipo de medição também é previsto na regulamentação 482/12.

A figura 13 ilustra um exemplo esquemático dessa medição

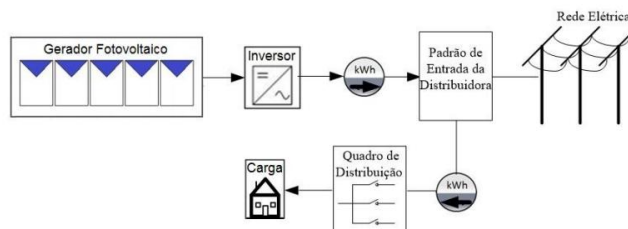


Figure 13: Desenho esquemático do modelo de medição instantâneo. FONTE: CRESEB, 2014.

3. Resolução 482/2012 e as alterações pela Resolução 687/2015

No Brasil, os sistemas fotovoltaicos enquadrados como sistemas de micro e minigeração, foram regulamentados pela resolução da ANEEL n° 482/2012 e posteriormente alterada pela resolução n° 687/2015 da mesma agência. Estas resoluções estabelecem condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e também ao sistema de compensação de energia elétrica, seguindo os Procedimentos de Distribuição (PRODIST), módulo 3 e às normas de acesso da distribuidora local, nesse caso, a COSERN. As principais definições das resoluções supracitadas encontram-se elencadas abaixo:

- ✓ **Microgeração distribuída:** Central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75kW e que utilize cogeração qualificada.
- ✓ **Minigeração distribuída:** Central geradora de energia elétrica com potência instalada superior a 75kW e menor ou igual a 3MW para fontes hídricas ou igual a 5MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.
- ✓ **Sistema de Compensação de Energia Elétrica:** Sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com micro ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa.
- ✓ **Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras:** Caracterizado pela utilização de energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização a utilização de vias públicas e/ou propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento.
- ✓ **Geração Compartilhada:** Caracterizada pela reunião de consumidores dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com micro ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada.

Ainda de acordo com a resolução citada, o sistema de compensação de energia elétrica obedece aos seguintes critérios:

- ✓ Para fins de compensação, a energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora será cedido a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 60 (sessenta) meses.
- ✓ Deve ser cobrado, no mínimo, o valor referente ao custo de disponibilidade para o consumidor do grupo B, ou da demanda contratada do consumidor do grupo A.
- ✓ Caso a unidade consumidora com micro e minigeração distribuída, o faturamento deve considerar a energia consumida, deduzidos a energia

injetada e eventual crédito de energia acumulado em ciclos de faturamento anteriores, por posto tarifário, quando for o caso, sobre os quais deverão incidir todas as componentes tarifárias em R\$/MWh.

4. Estrutura Tarifária – Resolução 414 da ANEEL

A resolução nº 414 da ANEEL estabelece condições gerais de fornecimento de energia elétrica além de estabelecer direitos e deveres dos consumidores e das distribuidoras de energia elétrica. Entrou em vigor em 15 de setembro de 2010 em substituição a resolução nº 456/2000.

Algumas definições precisam ser consideradas para melhor entendimento da cobrança tarifária.

- ✓ **Demanda Contratada:** Demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela distribuidora e que deve ser integralmente paga, seja ou não utilizada. Expressa em kW.
- ✓ **Demanda Medida:** Maior demanda de potência ativa, verificada por medição, integralizada no intervalo de 15 minutos durante o período de faturamento.
- ✓ **Modalidade Tarifária:** Conjunto de tarifas aplicáveis.
- ✓ **Grupo A:** Unidades Consumidoras (UCs) com fornecimento de tensão maior ou igual a 2,3 kV ou subterrâneas. (Tarifa Binômia)
 - **Subgrupo A1:** para o nível de tensão maior ou igual a 230 kV;
 - **Subgrupo A2:** para o nível de tensão de 88 a 138 kV;
 - **Subgrupo A3:** para nível de tensão de 69 kV;
 - **Subgrupo A3a:** Para nível de tensão de 30 a 44 kV;
 - **Subgrupo A4:** para nível de tensão de 2,3 a 25kV
 - **Subgrupo AS:** para sistema subterrâneo
- ✓ **Grupo B:** Unidades consumidoras com fornecimento de tensão inferior a 2,3 kV (Tarifa monômia).
 - **Subgrupo B1:** residencial e residencial baixa renda;
 - **Subgrupo B2:** rural e cooperativa de eletrificação rural;
 - **Subgrupo B3:** demais classes;
 - **Subgrupo B4:** Iluminação pública.

4.1 Estrutura Tarifária – Definição global

É um conjunto de tarifas aplicáveis ao consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência, de acordo com a modalidade de fornecimento. O valor da tarifa como as regras de cobrança entre os consumidores dos grupos A e B são diferenciadas.

A tarifa binômia pertencente aos consumidores do grupo A, o consumidor pagará pelo consumo e pela demanda que deverá ser contratada e servirá de referência na hora da cobrança. Essa demanda é medida diariamente num intervalo de 15 minutos, totalizando 4 medições por hora e 96 por dia. O valor considerado como demanda de referência será o maior valor registrado dentro do período de faturamento.

Caso a demanda máxima seja inferior a demanda contratada, o valor faturado será apenas a demanda contratada multiplicada pela tarifa. No entanto, se a demanda registrada seja maior que a contratada, a cobrança será feita multiplicando a demanda registrada pela tarifa, se o valor medido não superar em 5% o valor contratado.

Caso o valor de consumo registrado seja superior a 5% do valor da demanda contratada, haverá uma cobrança diferenciada que, em resumo, será 3 vezes mais do que o valor pago apenas pela demanda contratada.

4.1.1 Caracterização do IFRN como consumidor

O IFRN/SC está inserido no grupo A e subgrupo A4 (Classe comercial, industrial ou poder público) cuja tensão de fornecimento é de 13,8 kV, sob uma corrente trifásica alternada com frequência de 60Hz. A estrutura tarifária adotada foi a horossazonal verde, na qual aplica-se tarifas diferenciadas de consumo de energia em horário de ponta e fora de ponta e de demanda de potência contratada de 265kW.

Para as horas do dia são estabelecidos dois postos tarifários: horário de ponta, compreendido entre 17:30h às 20:30h nos dias úteis. E o horário fora de ponta, que são as demais horas dos dias úteis e as 24 horas dos sábados, domingos e feriados nacionais.

5. Análise Técnica

Nesse tópico será estimado o quanto de energia elétrica o sistema fotovoltaico irá gerar e o desempenho desse gerador de acordo com os conceitos obtidos em (MARION et al., 2005), a saber:

- Produtividade do Sistema
- Produtividade de Referência (recurso de irradiação solar)
- Desempenho Global do Sistema (Performance Ratio)

Para aplicar a metodologia proposta foi necessário fazer coletas de informações tais como: irradiação solar diária no plano do gerador, potência instantânea (energia entregue em um período de tempo determinado), potência nominal instalada e irradiação de referência considerada em 1000 W/m² por 24h.

Os ensaios foram realizados no campus do IFRN localizado na cidade de Santa Cruz situada no Agreste potiguar e com latitude de 6° 13'46" Sul e longitude 36° 01'22" Oeste e uma altitude de 236m.

A irradiação solar diária no plano do gerador foi coletada com base no programa *SunData*, um programa destinado a calcular a radiação solar media em qualquer lugar do país, a partir das suas coordenadas geográficas. Uma ferramenta fornecida pela CRESESB a fim de oferecer um suporte de dimensionamento para módulos fotovoltaicos

A energia gerada foi coletada a partir de dados fornecidos pelo software *The Aurora Vision*® que é ligado diretamente aos inversores e coleta o quanto de energia é produzida.

Os conceitos apresentados a seguir foram feitos de acordo com (MARION et al., 2005) e compilados por (NAKABAYASHI, 2015).

5.1 Produtividade do Sistema (Yf)

A produtividade do sistema também conhecida por (final yeld) Yf é a relação da energia gerada pelo sistema em um determinado período de tempo e a potência nominal do gerador fotovoltaico. Ou seja, fornece a produção de energia diária (kWh) por unidade de potência instalada (kWp) de acordo com a equação 1:

$$Yf = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t)dt}{P_0} = \frac{E}{P_0} \quad \text{Equação 1}$$

Onde, Pt é a potência instantânea na saída do sistema, P0 é a potência nominal da unidade geradora e E é a energia entregue ao sistema entre os período de tempo (t2 – t1). A unidade de medida é dada em kWh/kW, ou seja, representa a produção de energia (kWh) por cada unidade de potência (kW). É fundamental para comparar diferentes sistemas.

5.2 Produtividade de Referência (YR)

A razão da irradiância solar medida no plano do gerador pela irradiância de referência (1000 W/m²) é chamada de Produtividade de Referência (YR). Ela é definida matematicamente a partir da equação 2:

$$Y_R = \frac{\int_{t_1}^{t_2} H dt}{H_{ref}} \quad \text{Equação 2.}$$

$H(t)$ representa a irradiância solar incidente no plano do gerador (kW/m^2) e H_{ref} é a irradiância considerada em $1000 \text{ W}/\text{m}^2$.

De acordo com (NAKABAYASHI, 2015) YR representa o número de horas equivalentes de irradiância igual a $1000 \text{ W}/\text{m}^2$. Diz ainda que esta grandeza é uma função do local, orientação e inclinação do módulo e das condições do tempo nos momentos de medição.

Pode-se afirmar que o YR representa o número, em horas por dia, que a irradiância de referência ($1000 \text{ W}/\text{m}^2$) deveria incidir sobre o gerador para se obter a energia produzida sob condições reais.

5.3 Rendimento Global do Sistema (Performance Ratio – PR)

O rendimento global que é a relação entre a produtividade do sistema e a produtividade de referência. De acordo com (MARION et al., 2005) se os valores do PR variar entre 0,6 e 0,8 indicam um bom rendimento do sistema.

Esse índice já normaliza os efeitos das perdas do sistema: Temperatura na superfície do painel, sombreamento e falhas na captação de dados.

Matematicamente pode ser definido pela equação 3:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_R} \quad \text{Equação 3.}$$

6. Análise Econômica

6.1 Matemática Financeira – Critérios de avaliação de investimentos.

Ao realizar um investimento, deseja-se ter noção da sua capacidade de gerar fluxo de caixa futuro, ou seja, na capacidade de gerar renda a partir de um investimento. Entretanto, ao realizar um investimento de valor elevado é necessário que o investidor tenha conhecimento da capacidade que o seu investimento terá para gerar uma renda econômica.

As alternativas de investimento podem ser comparadas somente se as consequências monetárias forem medidas em um ponto comum no tempo. Sabendo que o capital

investido terá um retorno variando-se o fluxo de caixa com o tempo, os critérios de avaliação devem levar em conta a atualização ou os descontos desse fluxo. De acordo com o estudo de (SAMANEZ, 2002), existem dois métodos que descontam fluxo de caixa, são eles: Valor Presente Líquido (VPL) e o da Taxa Interna de Retorno (TIR). Além desses dois, outros métodos são utilizados concomitantemente aos dois citados anteriormente, a fim de analisar o tempo total em que o total investido será recuperado considerando e não considerando o valor do dinheiro no tempo, esses métodos são o pay-back ou *pay-back* descontado, respectivamente. Os métodos citados serão abordados a seguir.

6.2 Valor Presente Líquido – VPL

O método do Valor Presente Líquido – VPL, tem como finalidade quantificar em termos de valor presente o impacto dos eventos futuros associados a um investimento. Com ele é possível medir o valor presente dos fluxos de caixa gerados pelo projeto ao longo de toda vida útil do mesmo. Esse critério pode ser verificado a partir da equação 4 abaixo:

$$\text{VPL} = -I + \sum_{t=1}^n \frac{\text{FC}_t}{(1+K)^t} \quad \text{Equação 4.}$$

Onde:

VPL = é o valor presente líquido;

I = investimento inicial;

FC_t = fluxo de caixa no t-ésimo período;

K = taxa de atratividade do projeto.

t= é o período

A regra decisória a ser aplicada é dada da seguinte maneira: caso o VPL seja positivo, há viabilidade econômica na execução do projeto no período de tempo estabelecido pelo empreendedor.

O objetivo do VPL é encontrar projetos ou alternativas de investimentos que valham mais para os investidores dos que o que lhes custam, ou seja, projetos com VPL positivo.

6.3 Taxa Interna de Retorno – TIR

De acordo com a definição de (SAMANEZ, 2002), TIR é a taxa esperada de retorno do investimento na qual faz com que o VPL seja igual a zero. Diferente da VPL, a TIR tem como finalidade uma análise relativa do projeto. Matematicamente falando, a TIR é uma taxa hipotética de desconto que anula o VPL, ou seja, o valor de i que substitui K na equação 1, de forma que $i > K$.

A figura 14 ilustra o VPL em função da taxa de desconto. Nele, a TIR é dada pela interceptação da curva que representa o polinômio do VPL com o eixo das abscissas, ou seja, o ponto em que o VPL é zero:

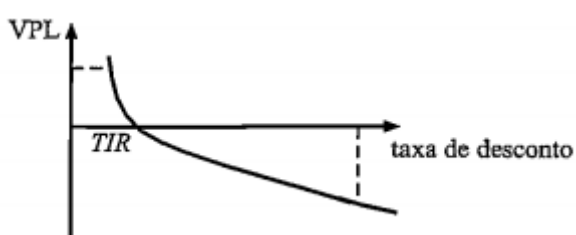


Figure 14 - VPL em função da TIR. FONTE: SAMANEZ, 2002.

A regra decisória a ser seguida pelo método TIR é de que o empreendimento será viável se a TIR exceder o custo de oportunidade do capital, ou seja, quando a taxa de retorno do capital excede a taxa de atratividade exigida.

6.4 PayBack Simples – PBS

De forma simplificada, o método do PayBack simples é o tempo necessário para que o investimento inicial seja recuperado. É um método que não leva em conta o valor do dinheiro no tempo.

Ao utilizar esse método, faz-se uma comparação entre o tempo calculado para a recuperação do investimento e o prazo máximo tolerado pelo investidor para recuperação do mesmo.

O critério do PBS determina que se o prazo de recuperação do investimento for inferior ao prazo máximo estabelecido o projeto será aceito; caso contrário, o projeto será rejeitado.

6.5 PayBack Descontado – PBD

A diferença do PBD para o PBS é que no PBD leva-se em conta o valor do dinheiro no tempo. Assim sendo, o PBD é o tempo de recuperação do investimento, remunerado pela taxa de juro que representa a Taxa Mínima de Atratividade (TMA).

Segundo (NAKABAYASHI, 2015) cada uma das técnicas apresentadas acima apresentam limitações. O método VPL não dá a noção do quanto cada unidade investida retornará, por exemplo, dois projetos com investimentos de R\$ 1.000,00 e R\$ 100.000,00 respectivamente, podem apresentar o mesmo VPL, entretanto o valor do investimento para o segundo caso seja 100 vezes maior. O método do TIR, pode se tornar complicado em casos que o fluxo de caixa apresente várias inversões de ganhos – ora positivos, ora negativos. Por último, o método do tempo de retorno, ou *payback*, embora possa dar uma noção da atratividade do investimento de maneira simples e compreensível, apresenta limitações quanto à rentabilidade.

O intuito deste trabalho é unir as 3 informações acima de forma que possa deixar claro que as 3 juntas podem auxiliar o investidor na hora de tomar sua decisão sobre investir ou não em energia fotovoltaica distribuída.

7. Descrição do sistema de Microgeração Fotovoltaica Conectada à rede elétrica com potência de 84 kW em Santa Cruz/RN.

7.1 Objetivo do Projeto

Objetivo do projeto O objetivo deste projeto é a instalação de uma unidade de microgeração de energia solar fotovoltaica conectada à rede elétrica com potência instalada de 80 kW (considerando os dados de placa de cada gerador individual a 25°C e 1000 W/m²), cuja finalidade é a geração de energia elétrica e injeção do excedente de energia, quando houver, na rede de Baixa Tensão da concessionária distribuidora de energia por meio do transformador exclusivo da unidade consumidora, caracterizando o sistema de compensação de energia elétrica previsto na Resolução Normativa REN nº 687 da ANEEL.

A instalação será realizada no telhado do IFRN (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – Campus Santa Cruz), município de Santa Cruz, Rio Grande do Norte, com as seguintes coordenadas geográficas (centro da instalação): latitude 6°13'41.85" SUL e longitude 36°1'36.82" OESTE.

7.2 Localização do Sistema Fotovoltaico

A Figura 15 ilustra a vista superior da área da instalação que foi realizada em solo, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte em Santa Cruz. As mesas foram montadas em telhas de fibrocimento com 3° de inclinação

e orientadas para o Noroeste com desvio azimutal de 55° e para Sudeste com desvio azimutal de 125° .



Figure 15 – Vista superior do local de instalação da UFV IFRN – Santa Cruz. FONTE: Memorial descritivo do projeto.

A instalação irá ocupar aproximadamente 544 m^2 da área total dos telhados no Campus Santa Cruz do IFRN. As áreas serão cobertas pelos módulos fotovoltaicos, que estarão distribuídos em 2 arranjos: sendo ambos os arranjos com 160 módulos, como indicado na Figura 12 um total de 320 módulos no sistema.



Figure 16- Vista superior da área de instalação indicando a disposição de instalação dos módulos. FONTE: memorial descritivo do projeto.

Um sistema fotovoltaico montado sobre o telhado é constituído pelos seguintes elementos: o sistema de geração fotovoltaica (módulos fotovoltaicos), os cabos de conexão, o inversor (ou inversores se mais de um) e o medidor bidirecional (ou dois medidores unidirecionais como previsto no item 7.1.1 da seção 3.7, do módulo 3 do PRODIST: um para aferir a energia elétrica ativa consumida e outro para a gerada), ver Figura 13.

A medição normalmente é feita por medidores bidirecionais (com opção de utilização de dois unidirecionais) e, portanto, este item deve seguir as orientações da COSERN. O sistema de geração fotovoltaica é composto por diversos alinhamentos de “mesas” de módulos, onde cada “mesa” é composta por diversos módulos fotovoltaicos que por sua vez são compostos de diversas células fotovoltaicas (as células fotovoltaicas captam a luz do sol, fonte primária de energia, transformando a energia luminosa em energia elétrica). Os módulos fotovoltaicos são montados sobre suportes ou trilhos (“rails”) com inclinação fixa e que por sua vez são fixados sobre o telhado de forma adequada.

Os cabos provenientes dos diversos conjuntos de mesas se conectam entre si por intermédio de uma caixa de combinação ou diretamente ao inversor, dependendo do número de fileiras ou “strings”, por meio de cabos de corrente contínua.



Por meio de cabos a corrente contínua dos módulos fotovoltaicos (1) chega ao inversor onde é convertida em corrente alternada (2) e o excedente ao consumo é injetado na rede pública (5) mensurado pelo medidor bidirecional (3).

Observação: Dependendo do número de strings em paralelo pode ser necessário o uso de "caixas de combinação" entre os módulos e o inversor.

Figure 17 - Esquema de princípio de um sistema fotovoltaico sobre telhado conectado à rede elétrica. FONTE: Memorial Descritivo do projeto.

Os inversores transformam a corrente contínua em corrente alternada. A eletricidade produzida é consumida localmente, já que cada inversor está conectado via um disjuntor termomagnético ao Quadro de Distribuição Geral de Baixa Tensão do local da instalação, sendo a energia excedente, caso exista, injetada na rede elétrica por meio do ponto de entrega de energia da distribuidora (passando pelo padrão de entrada).

Quanto ao funcionamento do sistema fotovoltaico, durante as horas diurnas a mesma irá gerar energia elétrica em uma quantidade quase proporcional à irradiância

disponível no plano dos módulos fotovoltaicos. A energia gerada pelos módulos fotovoltaicos, em corrente contínua, é fornecida à carga local ou injetada na rede de forma sincronizada à rede elétrica através dos inversores. Durante as noites o inversor deixa de operar e se mantém em estado de “stand-by” com o objetivo de minimizar o auto-consumo do sistema. Quando o sol aparece e o sistema é capaz de gerar energia suficiente, a unidade de controle e regulação inicia a supervisão da tensão e da frequência da rede, começando o processo de geração se os valores estão corretos. A operação dos inversores é completamente automática. O conjunto de proteções de conexão de cada um dos inversores não permite que o mesmo funcione de forma ilhada, ou seja, em caso de falha da rede elétrica a UFV deixaria de funcionar. Esta medida é para a proteção tanto dos equipamentos quanto das pessoas que possam estar a operar a rede, sejam usuários ou, eventualmente, técnicos de manutenção da mesma.

7.3 Descrição Geral da UFV IFRN – Campus Santa Cruz

A Usina Fotovoltaica (UFV) sobre telhado a ser instalada tem como função gerar energia elétrica de origem renovável. Esta energia produzida será parcialmente injetada na rede da concessionária distribuidora de energia da localidade (COSERN). O sistema fotovoltaico em questão será composto pelos seguintes elementos que terão suas características técnicas detalhadas em seguida:

- Módulos Fotovoltaicos;
- String-boxes;
- Equipamentos Conversores de Energia (inversores)
- Estruturas metálicas fixas de suporte para os módulos fotovoltaicos;
- Condutores elétricos: cabos CC, CA e para aterramento;
- Dispositivos de proteção da instalação: Disjuntores termomagnéticos, dispositivos de proteção contra surtos (DPSs), fusíveis e seccionadoras.

O sistema fotovoltaico com potência instalada de 80 kW será composto por quatro arranjos. Sendo dois arranjos de 160 módulos constituídos de dezesseis strings de 20 módulos, conectadas em oito string-boxes de duas entradas e uma saída, que por sua vez serão conectadas nos quatro MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) dos inversores de 20kW como mostra o esquema abaixo da figura

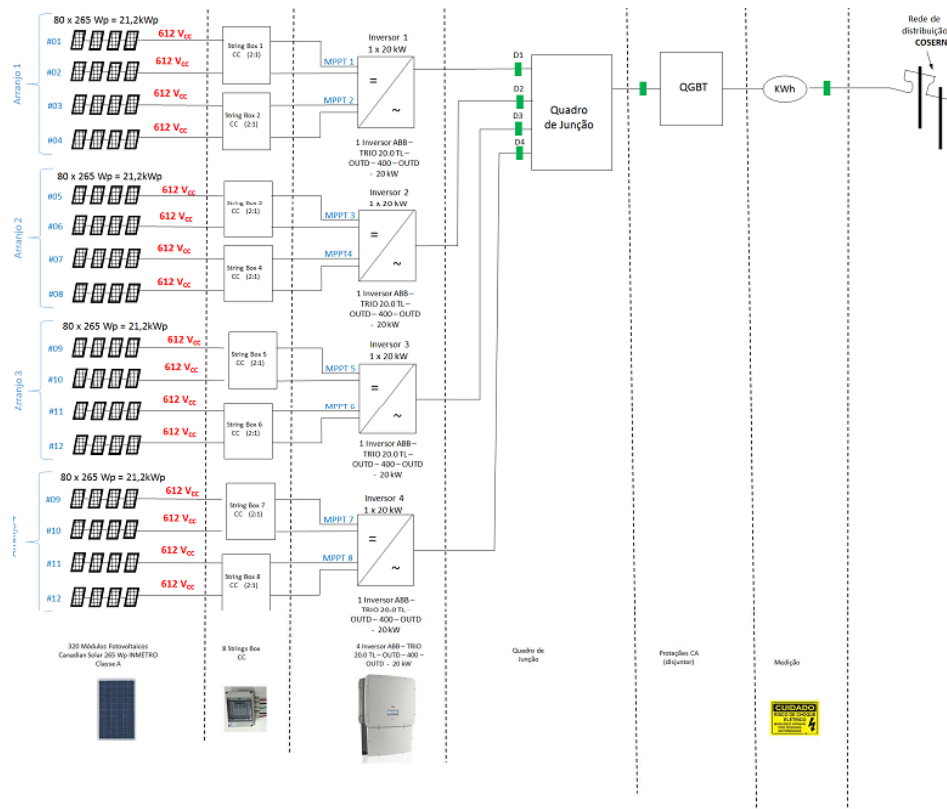


Figure 18 - Esquema de instalação da planta fotovoltaica. FONTE: Memorial descritivo.

Os módulos fotovoltaicos foram instalados sobre estruturas metálicas fixas montadas sobre o telhado na forma de “trilhos”, com a mesma inclinação do telhado, que é de 3°. Tais estruturas foram calculadas para resistir a cargas de vento e suportar as condições meteorológicas adversas, minimizando a manutenção. Os acessórios de suporte serão feitos em alumínio e aço galvanizado, em que serão fixados nas vigas já existentes no telhado.

7.4 Descrição Detalhada do Sistema

Os módulos fotovoltaicos do sistema de geração serão montados sobre estrutura metálica fixa, orientada para o Noroeste (desvio azimutal de 115°) com inclinação de 3°, e orientada para o Sudoeste (desvio azimutal de 305°).

A descrição a seguir foi retirada de memorial descritivo do projeto obtido junto à administração do IFRN do campus de Santa Cruz.

- **Módulos Fotovoltaicos**

O Módulo Fotovoltaico fabricado pela Canadian Solar apresenta elevada eficiência, baixo custo e classificação “A” pelo INMETRO. Além disso, é certificado por várias instituições internacionais, seguindo os tradicionais e rigorosos padrões europeus e americanos. Ele é constituído de células de silício policristalinas protegidas por um

vidro antirreflexo texturizado o que resulta em uma cor azul uniforme aumentando a absorção da luz em todas as condições de clima.

A garantia terá duração de 25 anos, nos quais 5 anos cobrem o material e mão de obra. Além disso, garante uma produção de 90% após 10 anos e 80% após 20 anos. Os módulos são resistentes à corrosão causadas pela chuva, água e poluição atmosférica, além de suportar variações bruscas de temperatura e granizo. A tabela 4 informa as características técnicas dos painéis.

Tabela 4 - Características Técnicas do painel fotovoltaico. FONTE: Fabricante

Características Técnicas	
Potencia Nominal	265Wp
Tensão de Máxima Potência (Vmpp)	30,6V
Corrente de Máxima Potência (Impp)	8,66 A
Comprimento	1,638 m
Largura	0,982 m
Área do módulo	1,608 m ²
Corrente de Curto-Circuito (Icc)	9,23 A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	37,7 V
Coefficiente de Temperatura (Voc)	- 0,31%/°C
Coefficiente de Temperatura (Isc)	+0,053 % / °C
Coefficiente de Temperatura da potência	- 0,41 % / °C
Coefficiente de Eficiência	16,47%
Peso	18 Kg

- **Inversor**

O inversor utilizado foi um inversor trifásico, indicado para todas as tecnologias de células fotovoltaicas. A figura 19 ilustra o tipo do inversor utilizado. A tabela 5 trás as características técnicas do inversor.



Figure 19 - Inversor ABB - TRIO 20.0 TL - OUTD 400. FONTE: Fabricante.

Tabela 5 - Características Técnicas do Inversor.

DADOS DO INVERSOR	
DADOS DE ENTRADA	
Potência Nominal CC	20000 W
Tensão Máxima CC	1000 V
Faixa de Tensão do MPPT	440 – 800 Vcc
Corrente Máxima de Entrada	30 A
Número de entradas de Strings FV/MPPT	4
Número de MPPTs	2
CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA	
<ul style="list-style-type: none"> • Proteção contra inversão de polaridade • Monitoração de falta de aterramento • Chave de desconexão CC integral (opcional) • Fusíveis para as entradas CC (opcional) 	
<ul style="list-style-type: none"> • Configuração para aterramento do positivo ou negativo em flutuação. 	
DADOS DE SAÍDA	
Potência de Saída Nominal	20 kW
Corrente Máxima CA	33 A
Tensão de Saída de Rede	380 Vca
Frequência de Rede	60 Hz (+/- 3%)
Fator de Potência	> 0.995, adj. +/- 0.8
DADOS DE EMPENHO	
Eficiência Máxima	98,2%
Eficiência Californiana (CEC)	97,5%
Eficiência Europeia (EU)	98,0%
Potência no modo noturno	1 W
DADOS MECÂNICOS	
Grau de proteção	NEMA 4X
Dimensões	1061 mm x 702 mm x 292mm
Peso	71,0kg

- **Módulos Concentradores (String Box)**

Foram usadas 8 string-boxes interligando as strings e os inversores, a fim de minimizar perdas e visando segurança. Serão usados 8 string-boxes (2 entradas – 1 saída) distribuídas da seguinte maneira:

- Quatro inversor de 20kW
 - Oito fileiras de 20 módulos ligadas em duas String-boxes de duas entradas e uma saída, ligada nos MPPTs de cada inversor.

Embora não seja obrigatória a utilização de DPSs, é recomendada a utilização destes dispositivos.

Os inversores ABB modelo TRIO 20.0 TL – OUTD – 400 são dotados de DPSs tanto na entrada CC como na saída CA. Além disso, eles são dotados na entrada CC de uma chave seccionadora, de grande utilidade para seccionar o lado CC, em caso de manutenção.

- **Estrutura Metálica**

A estrutura metálica foi projetada para uma melhor disposição dos módulos, garantindo durabilidade e resistência quanto a fenômenos naturais, como chuvas fortes e ventos. O material utilizado é alumínio e aço galvanizado seguindo as recomendações do que já é utilizado no mercado, com a finalidade de se obter tempo de vida semelhante ao dos módulos.

A figura 15 ilustra um modelo de estrutura metálica para arranjos montados sobre o telhado.



Figure 20 - Exemplo de modelo de estrutura metálica. FONTE: Memorial descritivo do projeto

- **Conectores CC**

Para a conexão entre a fileira de módulos e a entrada CC do inversor foram utilizados conectores do tipo MC4. Estes conectores tipo MC4 foram concebidos especificamente para utilização com sistemas fotovoltaicos. Os módulos fotovoltaicos Canadian Solar já saem de fábrica com um cabo e conectores MC4, assim como a entrada CC do inversor já é preparada para este tipo de conector que melhora a qualidade da instalação, facilita a conexão entre módulos e apresentam melhor durabilidade quando expostos as condições climáticas típicas de sistemas fotovoltaicos.

- **Condutores CC e CA**

Os módulos fotovoltaicos das oito mesas serão ligados em série por meio de cabos CC formando strings que estarão conectadas aos inversores trifásicos de

20 kW. A especificação dos cabos CC e CA é determinada pelo critério da capacidade de condução de corrente e pela queda de tensão, considerando a maior distância de cada trecho. A queda de tensão admissível do lado CC e CA, segundo especificações do edital, é de 2%. Assim sendo, para estas condições e para as condições de operação do sistema em condições de teste padrão, obtém-se a especificação dos cabos CC e CA descritos na Tabela 6:

Tabela 6 - Especificação do cabeamento utilizado.

ESPECIFICAÇÃO DO CABEAMENTO UTILIZADO	
POSIÇÃO DOS CABEAMENTOS CC/CA	BITOLA DOS CABOS
Módulos – inversores	4 mm ²
Inversores – quadro de junção	10 mm ²
Transformador - QGBT	70 mm ²

- **Aterramento**

Todos os módulos assim como as estruturas metálicas foram propriamente aterrados, com a conexão feita junto ao terra da instalação.

- **Medidor Bidirecional**

Foi utilizado um medidor bidirecional certificado pelo INMETRO e homologado pela COSERN, que foi instalado no momento da vistoria.

- **Placa de Sinalização**

Foi instalada uma placa de sinalização conforme consta na norma da COSERN, no poste de derivação do ramal de ligação em média tensão e na caixa que abrigará o medidor de energia mencionado acima.



Figure 21 - Modelo de placa de advertência. FONTE: Memorial descritivo do projeto.

8. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a coleta dos dados analisados a fim de se obter a análise técnica e econômica do gerador fotovoltaico do campus do IFRN/SC.

8.1 Análise Técnica do Gerador Fotovoltaico

8.1.1 Produtividade do Sistema (Yf)

Para analisar a produtividade do sistema foi preciso verificar, através do software Aurora Vision a geração de energia no período compreendido entre maio e setembro de 2017. Os dados encontram-se disponíveis na tabela 8.

Além disso, foi necessário fazer uma estimativa de geração para os meses em que não foram coletados os dados pelo software (janeiro, fevereiro, março e abril – ausência do gerador – e dezembro: período em que foi realizada a defesa dessa dissertação). As estimativas feitas foram a partir do histórico de irradiação local disponibilizado pelo *sundata* com base na cidade de Florânia/RN. A figura 22 ilustra a curva da radiação média mensal em kWh/m².dia:

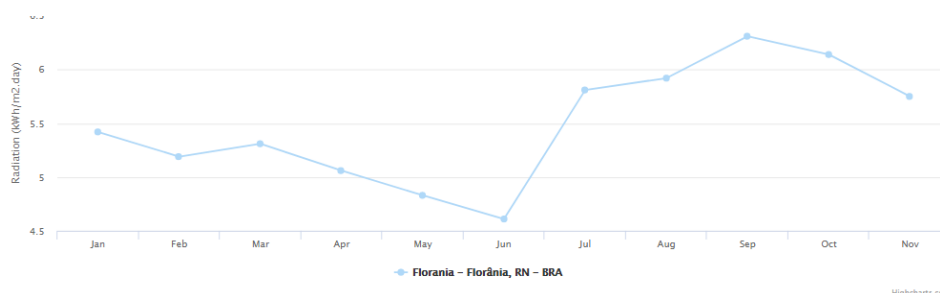


Figure 22: Radiação média mensal por dia em Florânia/RN no plano Horizontal. FONTE: SUNDATA

Sabendo que a potência instalada é de 83,4 kW, foi inserido o valor da produtividade do sistema na terceira coluna da mesma tabela.

Tabela 7 - Tabela 7 - Produção energética em 2017. (FONTE: Aurora Vision).

Mês	Produção (MWh)	Produtividade do Sistema (Yf)
Maio	4,81	57,67
Junho	7,79	93,40
Julho	3,00	35,97
Agosto	6,31	75,66
Setembro	10,81	129,6
Outubro	5,46	65
Novembro	10,63	127,46
Média	6,97	83,61
Desvio	2,94	35,28
Padrão		

8.1.2 Produtividade de Referência (Y_R)

Para encontrar os valores da produtividade de referência foi necessário utilizar a base de dados disponível no software SunData o qual fornece a irradiação solar média mensal em um ponto qualquer do país, a partir das coordenadas geográficas do mesmo. Caso a cidade de interesse não esteja listada nas cidades disponíveis, o próprio programa seleciona pelo menos três cidades com a localidade mais próxima do local desejado. Nele são fornecidos valores de irradiação solar, em kWh/m².dia no plano horizontal, correspondentes às diárias médias mensais para os 12 meses do ano.

Inserindo as coordenadas geográficas da cidade de Santa Cruz/RN, obtidas no site www.geografos.com.br, que são: Latitude – 06°13'46" sul e Longitude – 36°01'22" Oeste, obteve-se os seguintes valores aproximados para a irradiação no plano horizontal para a cidade de Florânia/RN que foi a localização mais próxima coletada, com uma distância em linha reta de 107 Km.

Tabela 8 -Irradiação Solar Diária Mensal. FONTE: SunData.

Mês	(kWh/m ² .dia)
Jan	5,64
Fev	5,58
Mar	5,5
Abr	5,14
Mai	5,17
Jun	4,75
Jul	4,94
Ago	5,89
Set	6,00
Out	6,53
Nov	6,47
Dez	6,00
Media	5,63

A tabela 9 apresenta a média mensal da irradiação solar, ou seja, o produto dos dados da tabela 8 pela quantidade de dias de cada mês (para o mês de fevereiro foram adotados 28 dias). Além disso, ela apresenta valores da Produtividade de Referência mensal.

De acordo com (NAKABAYASHI, 2015), a irradiância de referência é tida por 1000W/m² ou 1kW/m².

Tabela 9 -Média mensal de irradiação e produtividade de referência. FONTE: SunData.

Média mensal de irradiação e produtividade de referência		
Mês	Media Mensal (kWh/m ²)	Produtividade de Referência
Mai	159,34	159,34
Jun	142,5	142,5
Jul	153,14	153,14
Ago	182,59	182,59
Set	180,00	180,00
Out	202,43	202,43
Nov	194,1	194,1
Dez	186	186
Média	170,0	175,01
Desvio Padrão	21,04	21,04

8.1.3 Rendimento Global do Sistema (*Performance Ratio – PR*)

Para encontrar o Rendimento Global do Sistema (PR) nos meses de operação do gerador em análise, dividiu-se os itens da terceira coluna da tabela 8 (Produtividade do Sistema – Yf) pelos itens da terceira coluna da tabela 10 (Produtividade de Referência - YR) de acordo com a equação 3. Os resultados estão dispostos na tabela 10.

Tabela 10 -Rendimento Global do Sistema. FONTE: Autor.

Mês	PR
Mai	0,36
Jun	0,66
Jul	0,23
Ago	0,41
Set	0,72
Out	0,32
Nov	0,66
Media	0,48
Desvio	0,19

Um resumo da médias dos valores obtidos é dada na tabela 11:

Tabela 11: Resumo da Análise Técnica. FONTE: Autor

Resumo dos Dados Técnicos		
Y_f	Y_R	PR
83,61	175,01	0,48

8.2 Análise Econômica

Antes de iniciar, de fato, com a análise da economia do gerador fotovoltaico, foi preciso fazer um levantamento das faturas energéticas dos anos de 2016 e 2017 para tomar como base o valor pago, mensalmente, pelo IFRN/SC à concessionária. A partir desses dados torna-se possível uma melhor comparação custo/benefício local a ser discutida mais adiante.

8.2.1 Estudo das Faturas de Energia em 2016 e 2017

Os dados fornecidos nesse tópico foram obtidos junto ao departamento do financeiro do IFRN/SC e consta do valor total pago pelo IFRN no período citado incluindo multas, excesso de demanda, consumo reativo, consumo ativo de ponta, fora de ponta, etc.

Não foi possível obter os valores pagos em novembro e dezembro de 2017 devido a não existência da fatura no período da execução dessa dissertação.

Os meses de novembro e dezembro de 2016 não foram inseridos a fim de se obter uma melhor comparação entre os dois anos.

A tabela 12 permitirá enxergar melhor esses valores.

Tabela 12 - Total Pago à concessionária nos anos de 2016 e 2017.

Total Pago à concessionária nos anos de 2016 e 2017		
Mês	2016	2017
Jan	13.795,01	12.506,16
Fev	24.102,02	27.548,08
Mar	29.295,80	21.991,45
Abr	22.489,98	24.981,84
Mai	24.735,97	25.249,64
Jun	24.082,68	27.636,25
Jul	26.297,33	27.716,98
Ago	27.297,33	16.641,76
Set	23.844,93	24.507,24
Out	26.900	24.337,05
Nov	-	-
Dez	-	-
Total	215.543,90	233.116,45

8.2.2 Variação na Tarifa Energética

Para uma análise econômica mais precisa, foi necessário fazer um estudo do comportamento tarifário do subgrupo A4 (Demais classes – poder público) na tarifa horossazonal verde no período fora de ponta. Esses dados foram obtidos juntos a distribuidora local, COSERN.

Os valores obtidos foram referentes ao mês de agosto de cada ano com os acréscimos de PIS, COFINS e ICMS referentes ao período. A tabela 13 a seguir trás informações referentes ao preço tarifário (R\$/kWh) entre os anos de 2009 e 2017.

Tabela 13 -Dados tarifários entre os anos de 2009 e 2017. FONTE: ANEEL.

ANO	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
R\$/kWh	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,24	0,29	0,32	0,32
Variação %	-	0%	1,055%	0	1,052%	1,2%	1,208%	1,103%	0
Média de Variação %	0,8% a.a.								

Como o fabricante forneceu o tempo de vida do sistema de 25 anos, foi feita uma projeção tarifária até o ano de 2041 tomando 2017 o ano 1, aplicando uma taxa média de 0,8% no acréscimo anual da tarifa. A tabela 14 abaixo apresenta os valores dessa variação:

Tabela 14 - Ajuste no preço tarifário nos próximos 25 anos.FONTE: Autor.

Ano	R\$/kWh
2017	0,320
2018	0,346
2019	0,373
2020	0,403
2021	0,435
2022	0,470
2023	0,508
2024	0,548
2025	0,592
2026	0,640
2027	0,691
2028	0,746
2029	0,806
2030	0,870
2031	0,940
2032	1,015
2033	1,096

2034	1,184
2035	1,279
2036	1,381
2037	1,492
2038	1,611
2039	1,740
2040	1,879
2041	2,029

Para dar início a análise econômica, o primeiro passo é elaborar um fluxo de caixa, ou seja, o montante anual do quanto é economizado a partir da instalação da UFV. Para isso, é necessário fazer um acompanhamento da geração e quanto está sendo economizado mensalmente.

Vale salientar que só foi possível, devido ao curto tempo de operação da UFV/SC, obter dados referentes a sete meses do ano de 2017 (de maio a novembro). Para uma análise mais profunda, foi preciso adotar algumas premissas:

- Após captar a geração entre os meses de maio a novembro, fez-se uma média mensal de produção excluindo os meses de julho e outubro, haja vista que estes tiveram um comportamento anormal de geração, quando comparados com o trabalho de (ANTONIO et al., (2015) o qual fornece dados de irradiação e produção energética de uma UFV no Estado de Santa Catarina com características de instalação bem parecidas com a analisada neste trabalho.
- Com o valor da média obtido, adotou-se que a produção mensal no ano de 2017 nos meses em que não foram coletados os dados foi igual ao valor da média que foi de **8.070 kWh/mês**.
- A produção anual de 2017 foi igual a soma da produção mensal de acordo com o que foi supracitado, chegando a **89.160 kWh/ano**
- Tomando-se o ano de 2017 como base, o valor de produção da UFV/SC foi repetido até o ano de 2041.
- Para os anos seguintes, foi adotado um comportamento semelhante de irradiação e, portanto, calculado em cima dos valores obtidos no ano de 2017.
- Taxa Mínima de Atratividade (TMA) 6,7% a.a. (será dito mais adiante).
- Prazo de análise do investimento de 25 anos.
- Não foi levado em consideração a redução na produtividade do equipamento.

Partindo dessas premissas, obtivemos a tabela 15 a qual consta os valores médios mensais da geração no ano de 2017.

Tabela 15 -Geração mensal em kWh (média e valores medidos). FONTE: Autor.

Mês	Geração (kWh)
Jan	8.070
Fev	8.070
Mar	8.070
Abr	8.070
Mai	4.810
Jun	7.790
Jul	3.000
Ago	6.310
Set	10.810
Out	5.460
Nov	10.630
Dez	8.070
Total	89.160

A partir dessa estimativa total anual, pode-se iniciar a análise de retorno de investimento com base na geração (kWh) e no preço por kWh anual, sabendo que o investimento total dos custos dos equipamentos e instalação foi de R\$ 600.000,00 (valor fornecido pela diretoria do IFRN/Santa Cruz).

8.2.3 Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Taxa Mínima de Atratividade (TMA), *Payback* Descontado (PBD).

Antes de iniciar a análise, foi importante admitir uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) para o investimento, ou seja, a taxa mínima de juros na qual um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento, ou o máximo que se propõe a pagar quando deseja fazer um financiamento.

Para admitir essa TMA, foi adotado a remuneração atual da caderneta de poupança proposta pelo Banco Central (BC) que foi de 6,7% a.a.. Sabe-se que há outros investimentos onde a taxa de juros anual é mais atrativa, porém, utilizou-se a da caderneta de poupança por ser uma das mais populares e utilizada pelos brasileiros segundo o dados do BC.

Com a TMA estabelecida, a tabela foi montada considerando o método do *payback* descontado (PBD), que é o método que leva em conta o valor do dinheiro no tempo, de acordo com o item 6.1.4.

Com base no que foi analisado até agora, foi possível organizar os dados em uma planilha do excel com ajuda das equações de (1) a (4) e obter os dados que seguem na figura 23

Ano	índice	Investimento (R\$)	geração anual (kWh)	Preço anual Tarifa (R\$/kWh)	Economia/ano (R\$)	PBS (R\$)	Caixa Descontado (R\$)	PBD (R\$)
2017	1	-R\$ 600.000,00	89160	R\$ 0,32	R\$ 28.531,20	-R\$ 571.468,80	R\$ 26.739,64	-R\$ 573.260,36
2018	2		89160	R\$ 0,35	R\$ 30.849,36	-R\$ 540.619,44	R\$ 27.096,76	-R\$ 546.163,60
2019	3		89160	R\$ 0,37	R\$ 33.256,68	-R\$ 507.362,76	R\$ 27.376,99	-R\$ 518.786,61
2020	4		89160	R\$ 0,40	R\$ 35.931,48	-R\$ 471.431,28	R\$ 27.721,54	-R\$ 491.065,07
2021	5		89160	R\$ 0,44	R\$ 38.784,60	-R\$ 432.646,68	R\$ 28.043,82	-R\$ 463.021,25
2022	6		89160	R\$ 0,47	R\$ 41.905,20	-R\$ 390.741,48	R\$ 28.397,58	-R\$ 434.623,66
2023	7		89160	R\$ 0,51	R\$ 45.293,28	-R\$ 345.448,20	R\$ 28.766,22	-R\$ 405.857,44
2024	8		89160	R\$ 0,55	R\$ 48.859,68	-R\$ 296.588,52	R\$ 29.082,74	-R\$ 376.774,70
2025	9		89160	R\$ 0,59	R\$ 52.782,72	-R\$ 243.805,80	R\$ 29.445,03	-R\$ 347.329,67
2026	10		89160	R\$ 0,64	R\$ 57.062,40	-R\$ 186.743,40	R\$ 29.833,61	-R\$ 317.496,06
2027	11		89160	R\$ 0,69	R\$ 61.609,56	-R\$ 125.133,84	R\$ 30.188,36	-R\$ 287.307,70
2028	12		89160	R\$ 0,75	R\$ 66.513,36	-R\$ 58.620,48	R\$ 30.544,70	-R\$ 256.763,00
2029	13		89160	R\$ 0,81	R\$ 71.862,96	R\$ 13.242,48	R\$ 30.929,13	-R\$ 225.833,88
2030	14		89160	R\$ 0,87	R\$ 77.569,20	R\$ 90.811,68	R\$ 31.288,69	-R\$ 194.545,18
2031	15		89160	R\$ 0,94	R\$ 83.810,40	R\$ 174.622,08	R\$ 31.683,39	-R\$ 162.861,79
2032	16		89160	R\$ 1,02	R\$ 90.497,40	R\$ 265.119,48	R\$ 32.063,09	-R\$ 130.798,70
2033	17		89160	R\$ 1,10	R\$ 97.719,36	R\$ 362.838,84	R\$ 32.447,82	-R\$ 98.350,89
2034	18		89160	R\$ 1,18	R\$ 105.565,44	R\$ 468.404,28	R\$ 32.852,03	-R\$ 65.498,86
2035	19		89160	R\$ 1,28	R\$ 114.035,64	R\$ 582.439,92	R\$ 33.259,57	-R\$ 32.239,29
2036	20		89160	R\$ 1,38	R\$ 123.129,96	R\$ 705.569,88	R\$ 33.657,00	R\$ 1.417,71
2037	21		89160	R\$ 1,49	R\$ 133.026,72	R\$ 838.596,60	R\$ 34.078,94	R\$ 35.496,65
2038	22		89160	R\$ 1,61	R\$ 143.636,76	R\$ 982.233,36	R\$ 34.486,44	R\$ 69.983,09
2039	23		89160	R\$ 1,74	R\$ 155.138,40	R\$ 1.137.371,76	R\$ 34.909,02	R\$ 104.892,11
2040	24		89160	R\$ 1,88	R\$ 167.531,64	R\$ 1.304.903,40	R\$ 35.330,58	R\$ 140.222,69
2041	25		89160	R\$ 2,03	R\$ 180.905,64	R\$ 1.485.809,04	R\$ 35.755,40	R\$ 175.978,09
Valor Presente							R\$ 775.978,09	

Figure 23 - Dados para cálculo do PBS, PBD, TIR e VPL. FONTE: Autor.

A partir da tabela 16 chegamos aos seguintes resultados referentes ao tempo de retorno do investimento (PBS e PBD), Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Valor Presente Líquido (VPL)

Tabela 16 - Resumo da análise econômica. FONTE: Autor

<i>Payback Simples</i>	<i>Payback descontado</i>	VPL	TIR
13 anos e 9 meses	19 anos	R\$ 775.978,90	8,8% a.a.

9. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este capítulo será constituído com as conclusões que foram obtidas a partir da análise dos resultados técnicos e econômicos desse estudo além de sugestão para trabalhos futuros que venham a surgir a partir dele.

O capítulo será dividido em três partes: Conclusões das análises técnicas, conclusões das análises econômicas e sugestões para trabalhos futuros.

A primeira parte constará com as conclusões referentes a análise técnica do gerador fotovoltaico. O Rendimento Global do Sistema (PR) foi obtido a partir da Produtividade do Sistema (Yf) e da Produtividade de Referência (P_R) em 7 meses da análise, chegando a uma média de 0,48 com um desvio padrão de 0,19. Porém, como já fora citado anteriormente, ao excluir os resultados dos meses de julho e outubro, obteve-se uma média de 0,56 valor no qual se aproxima bastante do valor ideal compreendido entre 0,6 e 0,8 de acordo com (MARION et al., 2005).

A segunda parte diz respeito a análise econômica em relação aos itens estudados. Analisando apenas o *payback* simples, nota-se que o mesmo teve um período de 13 anos e 9 meses para que o valor investido retornasse. Já quando inserimos uma Taxa Mínima de Atratividade e fez-se com que o valor em reais fosse recalculado para o valor no presente ano através do cálculo do *payback* Descontado, o período de retornou aumentou em 6 anos, mostrando que o investimento só seria “pago” totalmente no ano de 2035.

Ainda em relação a análise econômica, obteve-se que o Valor Presente Líquido, ou seja, a soma dos ganhos anuais com o gerador fotovoltaico trazidos para o ano de 2017 (ano inicial do investimento) foi maior (R\$ 175.978,09 a mais) do que o investimento. Quando o valor do VPL foi relativizado por meio da Taxa Mínima de Atratividade (TIR), obteve-se um valor de 8,8% a.a. que foi superior a TMA dada pela caderneta de poupança de 6,7% a.a..

Esses conjuntos de índices econômicos: PBD menor do que o tempo da garantia do projeto (19 anos), o VPL maior do que zero e a TIR superior do que a TMA estabelecida, quando analisadas em conjunto, mostram que há uma viabilidade econômica na instalação de Usinas Fotovoltaicas – UFV’s.

É importante salientar que esse *payback* de 19 anos pôde ser válido pois trata-se de uma obra governamental onde a mesma é obtida através de licitação e seus preços, na maioria das vezes, são maiores do que os preços ofertados no mercado. No entanto, por tratar-se de uma obra em uma instituição de ensino onde os alunos podem vivenciar na prática conceitos de sustentabilidade e energia renovável, o preço final da obra as vezes é ínfimo em relação aos valores agregados na instituição como um todo.

Com relação aos trabalhos futuros fica como sugestão a elaboração de um software no qual possa unir na entrada todas as informações que eventual cliente venha a exigir e na saída retorne os valores que comprovem a viabilidade individual para cada cliente.

Além disso, fica como sugestão futura que outras premissas devem ser consideradas, tais como o comportamento tarifário com o passar dos anos através de um estudo mais preciso.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADARAMOLA, M. S. Techno-economic analysis of a 2.1kW rooftop photovoltaic-grid-tied system based on actual performance. **Energy Conversion and Management**, v. 101, p. 85–93, 2015.

ANDRADE DE ALENCAR, C.; URBANETZ JUNIOR, J. Usinas solares fotovoltaicas no Brasil: Panorama atual e perspectivas futuras. 2015.

ANEEL. Resolução nº 482 de 2012 da ANEEL. **Aneel**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2012.

ANTONIO, J.; UNOCHAPECÓ, D.; UNOCHAPECÓ, A. Z. Análise da viabilidade econômico-financeira da energia solar fotovoltaica em uma Instituição de Ensino Superior do Sul do Brasil. [s.d.].

CHERP, A. et al. Comparing electricity transitions: A historical analysis of nuclear, wind and solar power in Germany and Japan. **Energy Policy**, v. 101, p. 612–628, 2017.

CRESESB. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. 2014.

DE LIMA, L. C.; DE ARAÚJO FERREIRA, L.; DE LIMA MORAIS, F. H. B. Performance analysis of a grid connected photovoltaic system in northeastern Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 37, p. 79–85, 2017.

DIN?ER, F. The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 713–720, jan. 2011.

EPE. **Expansão da Geração. 1º Leilão de Energia de Reserva 2015**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leilão de Reserva \(2015\)/NT_EPE-DEE-NT-127_2015-r0_completo.pdf](http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leilão%20de%20Reserva%20(2015)/NT_EPE-DEE-NT-127_2015-r0_completo.pdf)>. Acesso em: 18 jun. 2017.

ESCOBAR, R. A. et al. Solar energy resource assessment in Chile: Satellite estimation and ground station measurements. **Renewable Energy**, v. 71, p. 324–332, nov. 2014.

GR?GEDA, M. et al. Review and multi-criteria assessment of solar energy projects in Chile. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 583–596, jun. 2016.

HUANG, P. et al. How China became a leader in solar PV: An innovation system analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 777–789, out. 2016.

