

Dimensionamento De Um Sistema Fotovoltaico Em Uma Instituição De Ensino Superior No Interior Do Rio Grande Do Norte

1st Thiago de Carvalho Rêgo
Departamento de Engenharia e
Tecnologia
Universidade Federal Rural do
Semiárido
Mossoró, Brasil
thiago.rego@alunos.ufersa.edu.br

2nd André Pedro Fernandes Neto
Departamento de Engenharia e
Ciências Ambientais
Universidade Federal Rural do
Semiárido)
Mossoró, Brasil
andrepedro@ufersa.edu.br

Resumo — Em meio ao crescimento do significativo da comercialização da energia gerada por processo fotovoltaico, somado ao benefício de ser uma fonte renovável e de baixo custo de manutenção, apontam-se os princípios das definições mais relevantes do tema abordado e o processo técnico para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Diante das seguidas secas na região nordeste, trouxe a piora da crise energética no Brasil, uma vez que as usinas hidrelétricas são encarregadas de aproximadamente 65% da produção de energia. Deste modo, a recessão energética nacional vem penalizando pequenos e médios consumidores, em um contexto em que os custos aumentam significativamente. Como saída para tal problema, as energias renováveis conquista cada vez mais um espaço na atual conjuntura do país. Confirmando esta afirmativa, a geração de energia solar avançou aproximadamente 66% no ano de 2022. Deste modo, este artigo tem como objetivo direcionar quem procura formas relevantes para reduzir custos com energia elétrica partindo para aquisição de sistemas fotovoltaicos conectados a rede (SFCR). Serão abordados de forma detalhada os principais critérios para um dimensionamento confiável e eficiente de um SFCR. Com o objetivo de realização de um real dimensionamento, será apresentado um SFCR capaz de atender 100% da demanda de um Campus pertencente a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN), localizado na cidade de Mossoró, Rio Grande do Norte.

Palavras-chave — *Eficiência Energética. Sistema Fotovoltaico. Energias Renováveis.*

I. INTRODUÇÃO

Diante da necessidade de energia como suprimento para garantir as demandas da sociedade, o homem busca otimizar seus recursos, garantindo assim a longevidade e sustentabilidade. Conforme a tecnologia avança, produtos capazes de gerar este tipo de energia, apresentam preços menores, tornando-se mais acessível à população, de forma que estudiosos e consumidores melhoram e projetam produtos mais eficientes.

Segundo a [1], o ano de 2021 foi considerado o pior período de escassez hídrica do País, neste mesmo ano a geração hídrica, fonte principal na produção de energia, reduziu -8,6% comparado ao ano de 2020 de acordo com [2].

Desta forma, a instalação de um sistema fotovoltaico contribui para uma redução considerável das despesas na

instituição pública, contribuindo ainda com o meio ambiente ao gerar energia limpa, renovável e sem emissão de poluentes.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como principal alvo contextualizar o trabalho, aprofundando no princípio a notoriedade da energia para o homem, buscando apresentar as fases do desenvolvimento da tecnologia de captação da energia solar.

Para [3], o consumismo é simplesmente a ação de consumir produtos ou serviços, normalmente sem consciência. As questões de impacto ambiental surgiram após a Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente e Desenvolvimento, a Eco – 92. Sociedade e empresários iniciaram uma reflexão sobre as responsabilidades no impacto negativo contra o meio ambiente.

A forma de consumo sustentável é abundantemente debatida na aplicabilidade dos recursos naturais pela sociedade, em particular a energia elétrica. Fundamental para funcionamento de diversos equipamentos eletrônicos, iluminação pública, produção industrial, transporte, e diversas aplicações.

Para [4], a fonte de energia primária mais farta no mundo é o próprio sol e salvo a energia nuclear, as outras diversas fontes, independentemente de sua característica, são maneiras indiretas de energia solar. Levando em consideração uma energia renovável, as usinas de geração de usinas solares consistem no fenômeno fotovoltaico, capaz de transformar a irradiação solar espontaneamente em eletricidade. Conforme [5] fala, que os sistemas de Microgeração (potência instalada menor ou igual a 75 kW) e Minigeração (potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual 5MW exceto hidráulica, onde o limite é de 3 MW) fotovoltaica é ainda introdutório perante o potencial de recursos solares disponíveis no país.

Com os cortes fiscais no orçamento público do Brasil nos últimos anos e diante da racionalização de energia nos últimos anos devido à escassez hídrica, gera uma necessidade de investimento do poder público em fontes alternativas e renováveis de energia trazendo, também a economia de recursos, expansão do emprego desta tecnologia.

O referido capítulo disponibiliza conhecimento para que os cálculos e ponderações apresentadas para o

dimensionamento do SFCR seja compreendido de forma clara, como também um balanço financeiro do sistema.

A. Radiação Solar

Fornecido pelo Sol, a energia na forma de radiação é a essência da vida no planeta. A fusão que ocorre no centro da estrela solar, converte núcleos de hidrogênio em núcleos de hélio. No decorrer do processo, uma fração desta massa é convertida em energia. Diante disto, o Sol é um grande reator de fusão.

Como existe uma distância considerável entre o Sol e o planeta Terra, uma pequena parte da radiação solar proferida atinge a superfície terrestre. A radiação oferecida equivale a um valor de energia de $1 \times 10^{18} \text{ kWh}$ por ano.

Afirma [6], que uma parcela muito pequena dessa radiação pode chegar a tocar na superfície da terra, essa radiação solar leva aproximadamente uma hora para chegar ao planeta ($4,3 \times 10^{20} \text{ J}$) pode ser superior que todo o consumo de energia durante o período de um ano, aproximadamente ($4,1 \times 10^{20} \text{ J}$). Portanto, para satisfazer a demanda energética da humanidade bastava 0,01% desta energia.

Mostrado na figura 1, toda a distribuição de energia solar no planeta onde a legenda mostra que os pontos em vermelha mais escura são as regiões com maior potencial de produção.

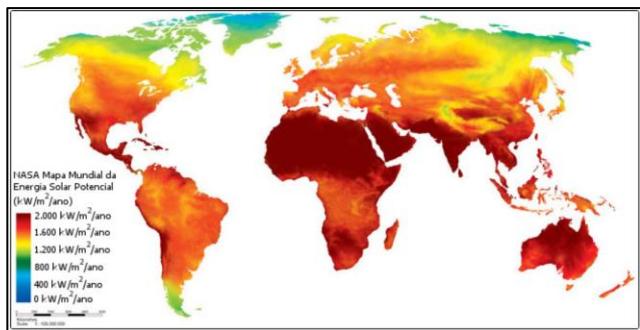


Fig. 1 - Mapa Mundial da Energia Solar Potencial [7].

A relação geométrica entre sol e a terra influenciam na quantidade e intensidade de energia solar irradiada na superfície da terra, onde essa variação ocorre a fatores como: data, estação do ano, latitude e longitude do ponto, posicionamento do sol e hora do dia.

Importante ressaltar que os movimentos de rotação e translação bem como a trajetória elíptica ao redor do sol e sua inclinação entre os eixos, influenciam diretamente nos parâmetros aplicados a geração fotovoltaica. Essas condições podem ser vistas na figura 2.



Fig. 2 – Esquema do movimento da Terra ao longo do ano [8].

B. Ângulos geométricos solares

Para tirar o melhor aproveitamento da energia solar, é essencial ter conhecimento das relações geométricas, descritas por certos ângulos, diante disto, a figura 3 mostra a relação de ângulos entre a projeção dos raios solares e a superfície da terra.

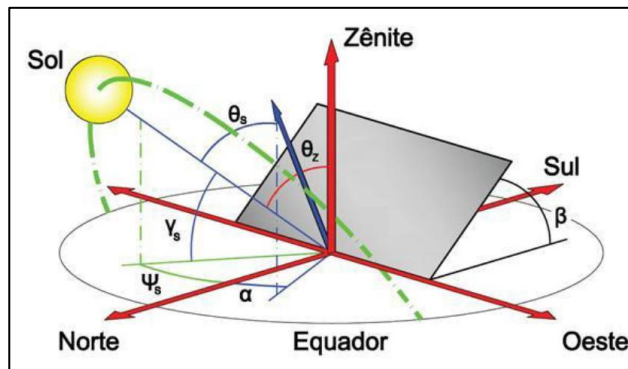


Figura 3 - Ângulos geométricos para tecnologia solar [9].

É possível perceber a declinação solar, essa angulação está entre o plano do equador e a eclíptica, como mostra a figura 4. Essa angulação varia entre $-23,5^\circ$ e $23,5^\circ$, onde a melhor angulação para um SF é aquela que permite captar o maior valor de energia.

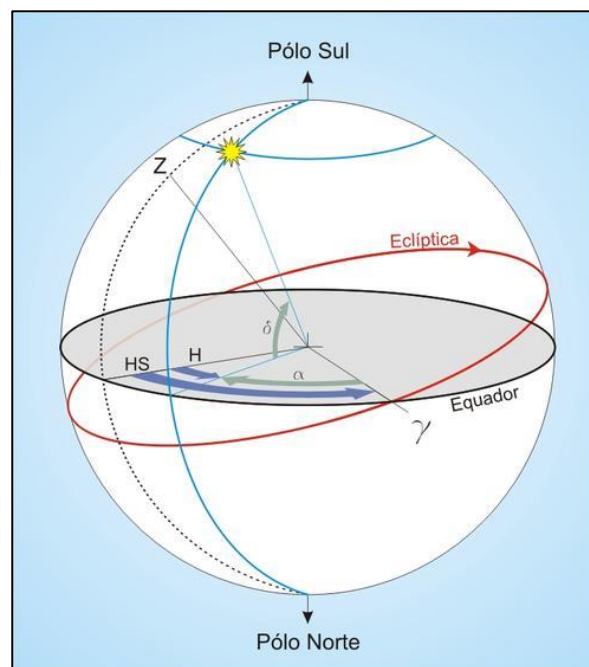


Fig. 4 – Plano do equador celeste [10].

É possível encontrar esse valor com uma precisão considerável através da equação 1.

$$\delta = [A - B\cos(\Omega) + C\sin(\Omega) - D\cos(2\Omega) + E\sin(2\Omega) - F\cos(3\Omega) + G\sin(3\Omega)] \frac{1}{\pi} \quad (1)$$

Onde o valor de Ω é dado em radianos pela equação 2.

$$\Omega = \frac{2\pi \cdot (d_n - 1)}{365 \text{ dias}} \quad (2)$$

d_n representa o dia juliano do ano, e deve ser menor que 365.

As constantes da equação 1 possuem os seguintes valores:

$$\begin{aligned} A &= 0,0066918 & D &= 0,0067580 & G &= 0,0014800 \\ B &= 0,399912 & E &= 0,000907 \\ C &= 0,070257 & F &= 0,002697 \end{aligned}$$

A altitude solar (α_s), é o valor entre a linha da radiação solar na horizontal e o posicionamento solar. Quando $\alpha = 0^\circ$ significa que a posição do sol está na horizontal, por outro lado, um valor de $\alpha = 90^\circ$, o sol se posiciona em cima da superfície. O valor de α_s pode ser calculado pela equação 3.

$$\sin(\alpha_s) = \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (3)$$

Onde ϕ representa a latitude em graus onde será instalada as placas fotovoltaicas.

Representando a distância angular a posição mais alta do sol no dia e posição do mesmo em um determinado momento é conhecido como ângulo horário (ω). Devido ao movimento rotacional da terra, que ocorre a cada 24 horas, a cada hora o ângulo horário altera 15° e se desloca 360° no período de um dia inteiro. Logo, é determinado um ângulo de 0° ao meio dia solar, vale lembrar que, antes de atravessar o meridional local existem valores negativos e após encontrasse valores positivos. A equação 4 mostra como se deve calcular esse ângulo.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)) \quad (4)$$

Para encontrar o valor do ângulo zenital (θ_z), utilize-se a equação 5.

$$\cos(\theta_z) = \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (5)$$

Para [6], o cálculo da radiação incidente sobre uma placa solar horizontal, se faz necessário definir outros três ângulos, o ângulo de inclinação da superfície (β), ângulo azimute de superfície (ψ), capaz de definir o ângulo entre o coletor solar e o eixo norte-sul, para onde a face do módulo estará posicionada e o ângulo de incidência solar (γ), que pode ser medido a distância entre a linha do raio solar e a linha do horizonte.

Devesse considerar o melhor ângulo de inclinação de superfície, aquele capaz de fazer com que o sistema capture a maior quantidade de energia fornecida pelo sol, possível de ser calculada pela equação 6.

$$\beta = 3,7 + 0,69 \cdot \phi \quad (6)$$

Entretanto, não é recomendado inclinações abaixo de 10° , pois o amontoamento de impurezas dificulta a limpeza das placas solares pela ação das chuvas [6].

Segundo [11], as placas solares devem ser orientadas para o ponto azimutal, ideal que esse ângulo de superfície seja igual a zero, apontado para o hemisfério sul. De modo que, as placas sejam instaladas com a face voltada para o norte, possibilitando o recebimento da energia solar por todo o dia.

C. Irradiação solar

Define-se como irradiação solar, o momento em que a energia se propaga sem a utilização de um meio material. Sua medição é dada pela potência dividido por unidade de área (W/m^2). Um outro conceito importante é a radiação solar, esse valor de energia captado do sol em uma determinada área e

em um período, é medido em Joules por metro quadrado (J/m^2), onde Joules pode ser representado por potência vezes o tempo (Wh), logo essa energia captada do sol pode ser representada por (Wh/m^2).

A terra recebe uma intensidade de radiação de aproximadamente 1367 W/m^2 . Contudo, a localização geográfica, condições atmosféricas e o período do ano, influencia na quantidade de radiação que chega ao solo em um plano horizontal. A Irradiância solar ao nível do solo diminui à medida que a camada atmosférica a ser atravessada se torna mais espessa. Essa espessura é quantificada pelo coeficiente conhecido como Massa de Ar (AM), que pode ser determinada pela equação 7.

$$AM = \left(\frac{1}{\cos(\theta_z)} \right) \quad (7)$$

A equação mostra que a massa do ar igual a 1, o sol se apresenta no Zênite, este valor sofre alteração conforme o valor angular que está entre o feixe solar e a linha vertical. Deve-se considerar o ângulo de curvatura da Terra para ângulos zenitais maiores que 60° .

Por consequência dos fatores apresentados, a irradiância máxima que pode alcançar a superfície da terra é aproximadamente 1000 W/m^2 [5].

Ao plotar a variação da irradiância em um dia médio em um gráfico, é possível identificar as horas em que a irradiância atinge um valor próximo ou igual a 1000 W/m^2 .

Esses valores possuem uma importância significativa, pois em determinados horários, os painéis fotovoltaicos estarão em sua máxima potência de geração por um período de sol. A imagem mostra as horas de pico do sol, esse horário está entre as 10h00 e 15h00.

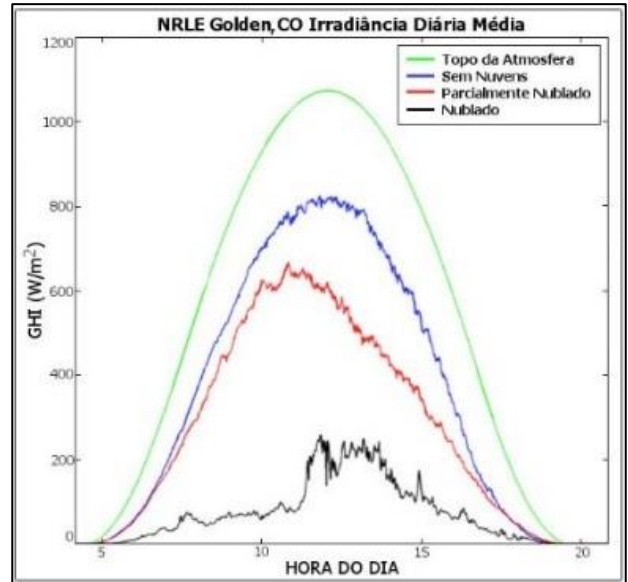


Fig. 5 – Gráfico das horas de pico [12].

D. Instrumentos de medição

Capazes de medir a radiação solar e uma área definida e em condições específicas, os instrumentos de medição devem ser posicionados em um plano inclinado ou em superfícies horizontais. A função é de capturar medições da radiação global ou da radiação direta e difusa. A soma destas, é

possível obter a radiação global. AS ferramentas de medição mais comuns são:

Heliógrafo: mensura o tempo de isolamento, mostrando a quantidade de horas de brilho solar em um intervalo de tempo.



Fig. 6 – Heliógrafo [13].

Actinógrafo: determina a radiação solar global ou a componente difusa.



Fig. 7 – Actinógrafo [14].

Piranômetro Fotovoltaico: Sua função é medir a radiação solar em um plano horizontal, capaz de observar mínimas flutuações de radiação. Internamente possui um sensor formado uma minicélula fotovoltaica. São os mais usados na atualidade.



Fig. 8 – Piranômetro [15].

E. Células fotovoltaicas

A região conhecida como *bandgap* ou *gap*, separa as duas bandas, também conhecida como banda proibida, é representada por E_g , capaz de atingir até 3 eV (elétrons volts), distinguindo estes materiais dos materiais conhecidos como isolantes, em que a banda proibida passa esse valor. Isso pode ser mostrado na figura 9.

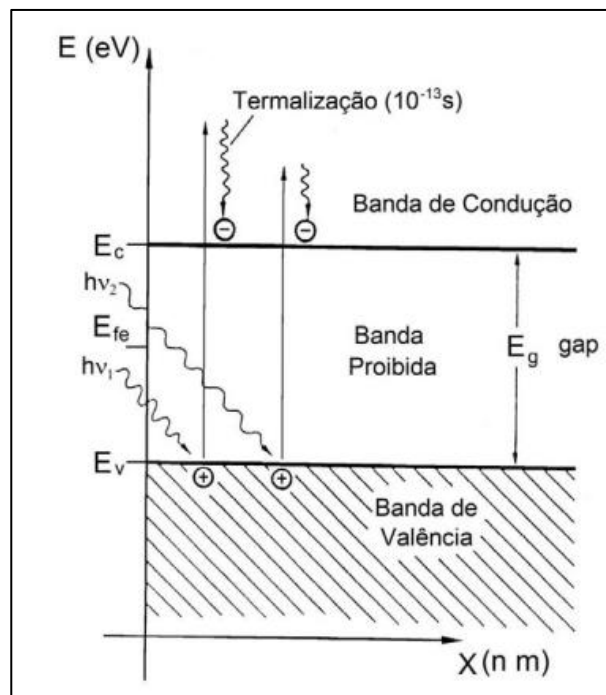


Fig. 9 – Fonte adaptada de [16].

Estes equipamentos são capazes de transformar a luz solar em eletricidade. Tal fenômeno exige a existência de um material semiconductor que, na presença da radiação, tem a capacidade de aumentar a condição energética dos seus elétrons. Os materiais mais utilizados são os semicondutores, no modelo de junção P-N. Apresentando baixa concentração de elétrons o material possui tal característica, ao contrário do N, que apresenta uma abundante concentração de elétrons. A figura 10 apresenta o funcionamento das células.

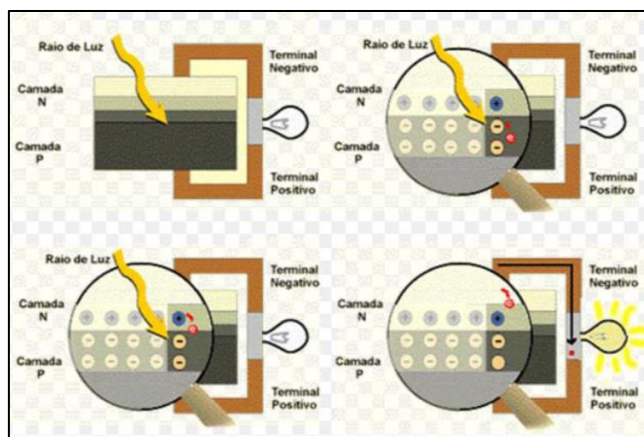


Fig. 10 - Ilustração do efeito fotovoltaico na junção P-N de uma célula ligada a um circuito elétrico [17].

Existem três principais tipos de células fotovoltaicas, a de silício monocristalino e silício policristalino e filmes finos ou

silício amorfo. De posse dessas informações, é importante definir as características básicas de cada uma das células.

As células que possuem um rendimento elétrico bastante elevado, são as de silício monocristalino, porém, sua fabricação possui um custo de produção elevado, pois, é necessário matéria prima em estado muito puro, por este motivo, é empregado um consumo de energia elevado para a produzir o material.

Constituídas de inúmeros cristais em contato entre si, de forma desalinhada, as células de silício policristalino possuem um custo de produção reduzido, comparado as células de silício monocristalino. Entretanto, devido as imperfeições dos cristais, seu rendimento é inferior.

De posse das informações do material utilizado na fabricação das células, Figura 11, é importante verificar, além da diferença de preço entre os dois tipos de células, o fator do coeficiente térmico da célula. Este fator que, para cada grau acima do padrão de operação da célula, existe uma perda da capacidade de geração de energia elétrica, em outras palavras, a célula perde seu desempenho conforme a temperatura solar aumenta. [18].

O tipo monocristalino sofrem mais em seu rendimento diante do aumento da temperatura, quando equiparado com as de policristalino. Isso ocorre devido as células monocristalinas possuírem uma tonalidade mais escura, proporcionando uma maior absorção do calor. Portanto, sua temperatura de operação precisa ser maior, ocasionando uma diminuição do seu rendimento, comparado as policristalinas.

Diante destas informações, fatores como disponibilidade capital, localização, limitações da área para a instalação e design do projeto, influenciam na escolha da célula para o sistema fotovoltaico.

Buscando diminuição de custo e uma mínima perda devido ao efeito térmico, as células de silício policristalino entregam um melhor custo-benefício para a IES, considerando que a região onde a Universidade está instalada está próximo a linha do Equador, entregando um clima quente durante todo o ano.

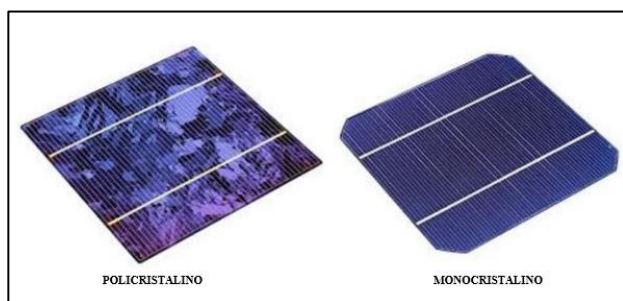


Fig. 11 – Células de silício monocristalino e policristalino [19].

F. Módulos fotovoltaicos (MF)

Conectados em série, agrupados, laminados e embalados em meio a folhas de plástico e vidro, o MF, Figura 12, é construído para que as suas células fiquem protegidas, apenas em contato com a luz solar. O conjunto de suporte é construído para garantir a rigidez e facilidade de manuseio e instalação. O módulo possui uma caixa para guardar as conexões responsáveis pela transmissão da energia elétrica bem como interligá-lo a outros módulos.

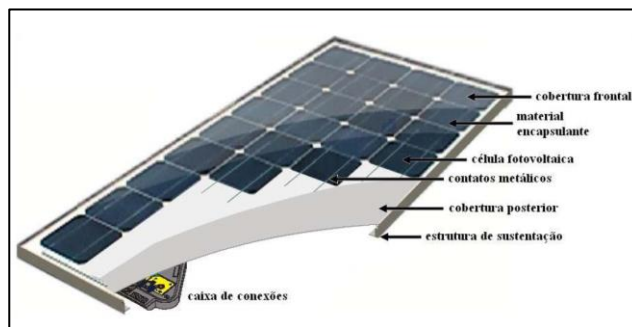


Fig. 12 – Parte de um módulo fotovoltaico [20].

G. Propriedades elétricas dos módulos.

Os módulos fotovoltaicos possuem nas suas características elétricas as seguintes definições [5].

- Corrente de máxima potência (I_{MP}): Valor em amperes quando o dispositivo alcança a máxima transferência de potência;
 - Tensão em máxima potência (V_{MP}): Valor em volts quando o dispositivo alcança a máxima transferência de potência;
 - Potência nominal (P_N): Significa a potência máxima que um modulo pode entregar em condições padrões para testes. Em outras palavras, é o valor da potência na região de máxima potência, como mostra a Figura 13. A equação 8 determina o valor da potência nominal.
- $$P_N = I_{MP} \cdot V_{MP} \quad (8)$$
- Tensão em circuito aberto (V_{OC}): Valor de tensão máxima nos terminais do módulo sem a presença da carga.
 - Corrente em curto circuito (I_{CC}): Corrente máxima medida em que um circuito externo sem resistência se acopla ao módulo.
 - Eficiência (η_m): Quociente entre potência gerada e a irradiância incidente sobre o módulo.

H. Curva de Corrente $\times$ Tensão

A representatividade que caracteriza as saídas de um dispositivo fotovoltaico, seja ele, célula, modulo ou o sistema, é representado pela curva $V - I$. A curva disponibiliza a maioria das medições descritas anteriormente, A Figura 13 mostra explicitamente essas propriedades.

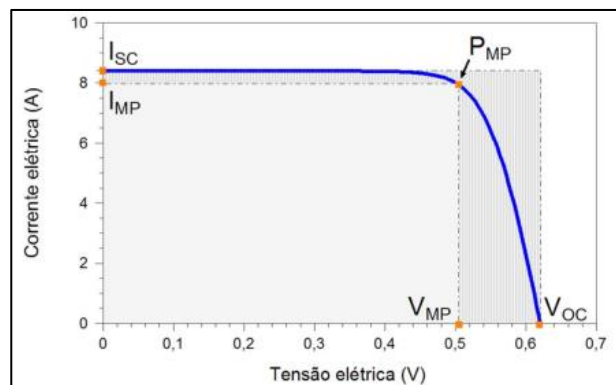


Fig. 13 – Gráfico de Tensão $\times$ Corrente [21].

Vale lembrar que a corrente gerada nos dispositivos depende diretamente da temperatura de operação e a intensidade da luminosidade que toca as placas. Na Figura 14 e 15 apresentam a variação de tensão e corrente em relação a temperatura de operação e irradiância solar.

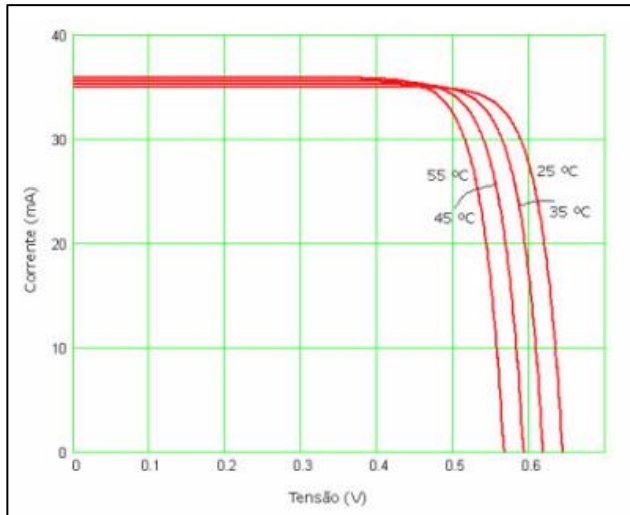


Fig. 14 – Variação de corrente e tensão de um MF em função da temperatura de operação [22].

Pode-se notar que conforme a temperatura aumenta, as tensões nos terminais diminuem, enquanto a corrente se mantém estável. Para [6], a redução de tensão de operação de um MF reduz em média 0,5% para cada grau Celsius acima das condições de teste.

As células fotovoltaicas possuem temperatura maior que a do ambiente, pois sofrem aumento de temperatura ao receberem radiação solar, devido ao efeito fotovoltaico. A diferença de temperatura entre placa e o ambiente onde elas estão instaladas é dada pela equação 9.

$$\Delta t = 0,034 \cdot G - 4 \quad (9)$$

Onde:

G é a irradiância W/m².

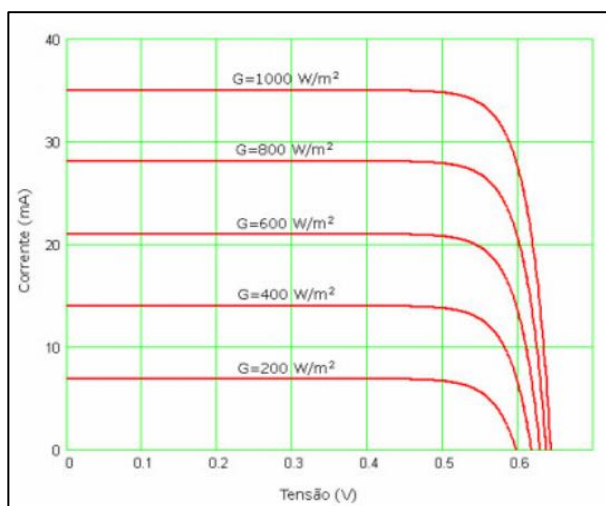


Fig. 15 – Variação da corrente e tensão de uma MF em função da irradiância solar [22].

Analisando a Figura 15, é possível observar o valor da tensão possui uma pequena variação para mais, ao mesmo tempo que a corrente aumenta substancialmente. Tal fato

ocorre porque o fóton energizado, carrega um elétron. Logo, a quantidade de fótons depende da intensidade da irradiância, como o aumento da mesma, ocorre um aumento da corrente elétrica gerada [11].

I. Associação das Células e Módulos Fotovoltaicos

As variações dos arranjos para associar as placas fotovoltaicas se dividem em duas, o modelo em série e o paralelo, para que seja possível alcançar o valor de tensão e corrente pretendido. Esses arranjos são formados por um agrupamento de módulos ligados eletricamente em modelos em série ou paralelo, fornecendo uma saída singular de tensão e corrente. Para esclarecer a diferença entre os arranjos, é necessário analisar as figuras 16 e 17, onde, o esboço dos arranjos facilita a compreensão de como cada modelo entrega as grandezas na saída.

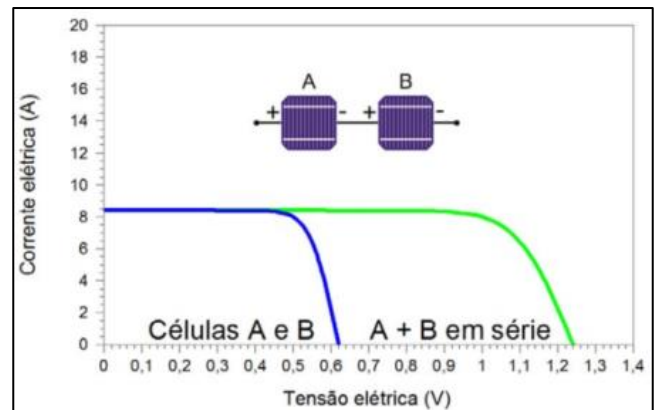


Fig. 16 - Curvas I-V de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectadas em série [21].

Neste tipo de arranjo, onde o terminal positivo de um dispositivo é conectado ao terminal negativo, neste caso, as tensões são somadas. A equação para o arranjo em série é dada pela equação 10:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (10)$$

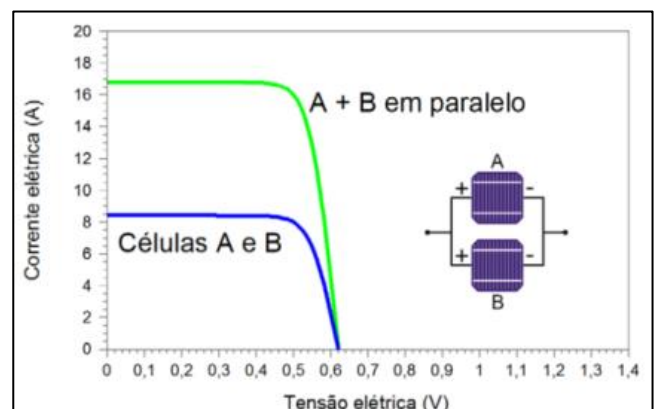


Fig. 17 - Curvas I-V de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectadas em paralelo [21].

Já nesse tipo de arranjo, os terminais positivos são ligados entre si, da mesma maneira ocorre com os terminais negativos ocasionando o somatório das correntes. Diante da ilustração é possível deduzir a equação para o arranjo em paralelo.

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (11)$$

Nessas condições, caso os dispositivos possuam diferentes valores de corrente de curto-circuito, existirá uma limitação baseada no menor valor de corrente. Contudo, este tipo de associação com módulos de correntes desiguais, não é recomendada, devido ao risco de ocorrer superaquecimento.

J. Sistema fotovoltaico (SF)

Definir-se como sistema fotovoltaico (SF) com a finalidade de gerar energia elétrica, como um aglomerado de equipamentos integrado, capaz de converter energia solar em eletricidade.

Dependendo de conexão de saída, o sistema pode ser classificado como:

- *On-grid*: Sistema conectado à rede elétrica da concessionária;
- *Off-grid*: Sistema conectado a um banco de baterias.

Conforme a [1], os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), são classificados da seguinte maneira:

- Microgeração: potência instalada até 100kW;
- Minigeração: potência instalada entre 100kW e 1MW;
- Usinas de eletricidade: potência acima de 1MW.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Materiais

Para a realização da análise de viabilidade técnica da usina fotovoltaica na Instituição de Ensino Superior de Mossoró, utilizou-se do software Excel produzido pela empresa Microsoft, além disso, foi utilizado para a captura da localização geográfica da instituição o software Google Earth, uma vez que, a Universidade não dispõe de um drone para sobrevoar a região onde a usina poderá ser instalada.

A análise orçamentaria dos itens que compõem o sistema fotovoltaico, foi realizado através de pesquisa de preço por meio do portal dos fornecedores mais próximos da cidade onde a IE está localizada.

B. Métodos (Análise de Dados)

- Parâmetros de dimensionamento

Rendimento do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR);

Para todo sistema que apresentem características não ideais, possuem perdas que podem ser provenientes do comprimento do cabo, tipo do material utilizado na fabricação do condutor, temperatura do ambiente, possíveis sombreamentos que os módulos podem sofrer, irradiação solar, entre outros, e para que se obtenha um maior rendimento do sistema, obteve-se as perdas do SFCR, considerando o rendimento conforme a Equação (12).

$$\eta = \frac{(100 - P_c)}{100} \cdot \frac{(100 - S)}{100} \cdot \frac{(100 - T)}{100} \cdot \frac{(100 - I)}{100} \quad (12)$$

P_c - Perdas nos cabos CA e CC de 1% a 2%;

S - Sombreamento nos módulos de 1% a 8%;

T - Temperatura de 7% a 18%;

I - Inversor de 2% a 5%.

η - Rendimento (Eficiência) do Sistema Fotovoltaico conectado à rede;

Considerando os seguintes valores:

P_c – 1,8%;

S – 6,5%;

T – 14,5%;

I – 5%.

O valor do rendimento encontrado foi de:

$$\eta = 0,7449 \text{ ou } \eta = 74,49\%$$

O valor do rendimento considerado no projeto foi de 75% de eficiência.

Irradiação Solar Média (ISRM) no Município de Mossoró – RN;

O levantamento de dados de Irradiação Solar Diária por m² (I_s) foram obtidos através do portal da CRESESB, inserindo os dados de latitude e longitude capturados pelo software Google Earth. A ISRM em um plano horizontal de Mossoró, que será considerado, é o de menor valor entre os meses do ano, portanto, esse valor poderá ser encontrado na tabela 1:

TABELA I. IRRADIAÇÃO SOLAR NO PLANO HORIZONTAL

Município	Mossoró	Mossoró	Mossoró
UF	RN	RN	RN
País	BRASIL	BRASIL	BRASIL
Latitude [°]	5,201° S	5,201° S	5,201° S
Longitude [°]	37,349° O	37,349° O	37,349° O
Distância[km]	4,1	7,1	11,1
Janeiro	5,85	5,8	5,79
Fevereiro	5,86	5,77	5,81
Março	5,93	5,84	5,86
Abril	5,56	5,55	5,62
Mai	5,26	5,25	5,31
Junho	4,93	4,90	4,95
Julho	5,21	5,18	5,28
Agosto	5,86	5,85	5,91
Setembro	6,24	6,25	6,31
Outubro	6,39	6,38	6,46
Novembro	6,45	6,39	6,45
Dezembro	6,08	5,95	5,99
Média	5,80	5,76	5,81
Delta	1,52	1,5	1,51

Logo o valor utilizado de I_s corresponde ao menor valor do mês de junho, que será de:

$$I_s = 4,90 \text{ kWh/m}^2$$

• Consumo Médio Diário;

A IES atualmente conta com 44 unidades consumidoras, distribuídas por várias cidades no Estado, porém, a UC em análise é a do Campus Central, onde concentra o maior número de docentes e discentes de toda a universidade. Para o

cálculo da média de consumo diário, foi coletado dados no setor de engenharia e obras, onde a responsável pela elétrica, informou através de faturas fornecida pela concessionária, o consumo mensal, conforme mostra a tabela 2.

TABELA II. CONSUMO MENSAL/2022.

mês	Na ponta [kWh]	Fora da ponta [kWh]	Total [kWh]
fevereiro	4.689,97	56.666,40	61.356,37
abril	3.948,08	53.256,00	57.204,08
maio	12.795,13	98.926,80	111.721,93
junho	14.643,63	100.749,60	115.393,23
julho	8.754,14	79.413,60	88.167,74
agosto	14.486,47	89.955,60	104.442,07
setembro	16.548,17	100.170,00	116.718,17
Média			93.571,94

- Parâmetros do sistema fotovoltaico conectado à rede

Os parâmetros calculados para encontrar a potência da inversora, quantidade de placas a serem instaladas e a área que deverá atender a usina.

- A potência do Inversor

O valor da potência de pico do inversor, é dada pela equação 13, considerando o consumo diário, irradiação solar da região e o rendimento dos módulos.

$$P_{pp} = \frac{Média}{30} \cdot \frac{1}{I_s \cdot \eta} \quad (13)$$

$$P_{pp} = 848,73 \text{ kW}$$

De posse do valor de pico da inversora é possível encontrar o equipamento que mais se adequa ao sistema, portanto, conforme a tabela 3, os valores da inversora serão informados.

TABELA III. PRINCIPAIS INFORMAÇÕES DO INVERSOR SELECIONADO.

INVERSOR Solis-110K-5G-PRO	
ENTRADA	
Modelo	110K
Potência máxima de entrada	165 kW
Tensão máx de entrada	1000 V
Tensão nominal	600 V
Tensão de partida	180 V
Intervalo de tensão MPPT	160 - 1000 V
Corrente máx de entrada	36 A / 32 A / 36 A / 32 A / 36 A / 32 A / 36 A / 32 A
Corrente máx de curto-circuito	8*50 A
MPPTs / Número de Entradas	8/16
SAÍDA	
Potência nominal de saída	110 kW
Potência nominal de saída a 40°C	110 kW
Potência máx de saída aparente	121 kVA
Potência máx de saída	121 kW
Potência máx de saída a 40°C	121 kW
Tensão nominal da rede	3/N/PE, 220 V / 380 V
Frequência nominal da rede	60 Hz
Corrente nominal de saída da rede	167.1 A
Corrente máx de saída	183.8 A
Fator de potência	> 0,99 (0,8 inicial - 0,8 atrasado)
Harmônicas (THDi)	<3%

Fonte: Elaborado pelo autor. Dados publicados pela SOLIS.

A quantidade de inversores pode ser calculada pela equação 14.

$$Quant. Inv. = \left(\frac{P_{pp} \text{ da inversora}}{Pot \text{ máxima de ent}} \right) \quad (14)$$

Portanto, será utilizado 6 (seis) inversores de 165 kW pico.

- Definição dos módulos fotovoltaicos

Para [23], após calcular a energia que um módulo pode produzir e de posse do valor da energia que se almeja alcançar no dia, é possível determinar a quantidade de placas para atender o sistema fotovoltaico.

A potência do módulo fotovoltaico escolhida foi de 665 Watts pico, de acordo com informações encontradas no datasheet do fabricante, portanto, o número de placas é calculado na equação 15.

$$N^{\circ} \text{ placas} = \left(\frac{P_{pp} \text{ da inversora}}{Pot. Placa} \right) \quad (15)$$

A quantidade de placas será de 1276 unidade. Sabendo disso, para cada inversor teremos a quantidade de placas para cada inversor através da equação 16.

$$Placas \text{ por inv.} = \left(\frac{N^{\circ} \text{ placas}}{Quant. Inv.} \right) \quad (16)$$

O resultado é de aproximadamente 213 placas por inversora. Conforme a tabela 4, as configurações do módulo são apresentadas. Devesse levar em consideração a distribuição das placas para atender as inversoras. Mais adiante, será necessário esboçar uma imagem para melhor compreensão da distribuição.

TABELA IV: PRINCIPAIS INFORMAÇÕES DO MÓDULO FOTOVOLTAICO ESCOLHIDO.

MÓDULO FOTOVOLTAICOS	
PERFORMACE ELÉTRICA	
Potência	665W
Tensão de circuito aberto	46.18
Corrente de Curto-Circuito	18.31A
Tensão de Máxima Potência	38.21V
Corrente de Máxima Potência	17.04A
Eficiência do Módulo	21.41%
PARÂMETROS MECÂNICOS	
Peso	35kg
Dimensions	2384mm*1303mm*35mm
Dimensões da Célula	210*210mm
Quantidade de Células	66*2 pcs
Tensão Máxima do Sistema	1500V
Estrutura	Liga de alumínio
Cabo	4mm2 , Landscape: N 1500mm/P 1500mm Portrait: N 280mm/P 280mm
Conector	MC4 compatível

Fonte: Dados coletados pelo autor.

Portando, como a inversora possui 16 entradas, a divisão será de do número de placas será conforme mostra a figura 18.

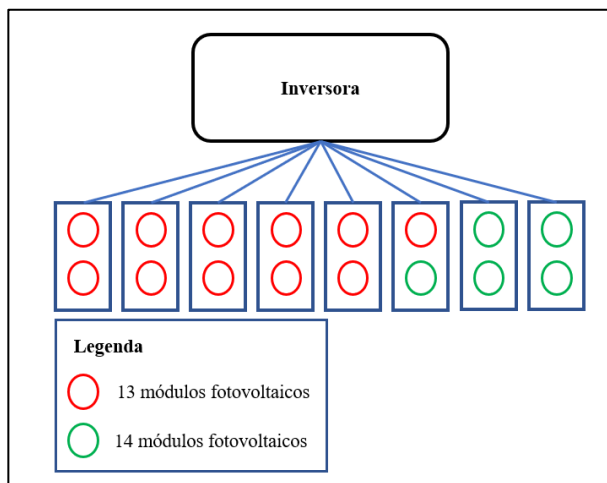


Fig. 18: Divisão de placas para cada inversora.

- Área ocupada

A dimensão de cada placa, é informado via datasheet do fabricante, para cada placa, a dimensão é de 2,384 metros de comprimento por 1,303 metros de largura, o sistema possui aproximadamente 1300 placas, conforme equação 17, é possível encontrar a área ocupada pelas placas.

$$\text{Área ocupada} = 2,384 \cdot 1,303 \cdot 1276 \quad (17)$$

$$\text{Área ocupada} = 4000 \text{ m}^2$$

Utilizando-se da ferramenta do Google, é possível analisar o melhor posicionamento para a instalação dos módulos fotovoltaicos, como mostra a figura 19, a instituição dispõe de uma área em que, não há construções prediais e que está próximo da BR 110.



Fig. 19 - Área da usina fotovoltaica.

C. Viabilidade do SFCR

- Valor presente Líquido VPL

Com auxílio do Microsoft Excel, levando em consideração a equação 18, após coleta de dados dos valores futuros, levando em consideração a inflação e taxa de desconto de 25% de ganho, calculando esses valores através da equação 18.

$$VPL = \sum_{n=1}^{n=N} \left(\frac{FC}{(1+i)^n} \right) \quad (18)$$

VPL - Valor Presente Líquido (R\$);

FC - Valor futuro (Valor economizado no período de 25 anos, tabela 6);

T - Momento em que o fluxo de caixa ocorreu;

i - taxa de desconto (25%).

- Payback

$$Pn = \sum_{n=1}^{n=25} (t \cdot Eg \cdot CP) \quad (19)$$

Pn - Payback (n varia de 1 a 25 anos);

n - tempo de duração (anos);

T - Tarifa da Distribuidora (ocorreu ajuste de inflação de 6% a.a);

Eg - Energia gerada (KWh);

CP - Custo do Projeto (R\$);

De posse das equações, é possível calcular o retorno investido no período de 2 anos e 3 meses, chegando a alcançar um desconto de aproximadamente 99%, onde será cobrado apenas o valor mínimo estabelecido pela concessionária. Conforme mostra a tabela 5.

TABELA V: TEMPO DE RETORNO.

Anos	Tarifa (R\$/kWh)	Economia anual	Payback
0	R\$ 0,85	R\$ 1.376.034,75	-R\$ 1.698.086,70
1	R\$ 0,91	R\$ 1.474.875,32	-R\$ 424.533,17
2	R\$ 0,98	R\$ 1.580.815,62	R\$ 929.606,97
3	R\$ 1,05	R\$ 1.694.365,60	R\$ 2.369.335,51
4	R\$ 1,12	R\$ 1.816.071,89	R\$ 3.899.956,76
5	R\$ 1,20	R\$ 1.946.520,33	R\$ 5.527.095,21
6	R\$ 1,29	R\$ 2.086.338,89	R\$ 7.256.714,12
7	R\$ 1,38	R\$ 2.236.200,61	R\$ 9.095.135,17
8	R\$ 1,48	R\$ 2.396.826,90	R\$ 11.049.059,17
9	R\$ 1,59	R\$ 2.568.990,97	R\$ 13.125.587,88
10	R\$ 1,70	R\$ 2.753.521,59	R\$ 15.329.247,04
11	R\$ 1,82	R\$ 2.951.307,05	R\$ 17.674.010,60
12	R\$ 1,95	R\$ 3.163.299,44	R\$ 20.165.326,26
13	R\$ 2,09	R\$ 3.390.519,23	R\$ 22.812.142,38
14	R\$ 2,24	R\$ 3.634.060,23	R\$ 25.623.936,31
15	R\$ 2,41	R\$ 3.895.094,78	R\$ 28.610.744,13
16	R\$ 2,58	R\$ 4.174.879,44	R\$ 31.783.192,10
17	R\$ 2,76	R\$ 4.474.761,02	R\$ 35.152.529,53
18	R\$ 2,96	R\$ 4.796.183,11	R\$ 38.730.663,50
19	R\$ 3,18	R\$ 5.140.692,94	R\$ 42.530.195,28
20	R\$ 3,40	R\$ 5.509.948,92	R\$ 46.564.458,56

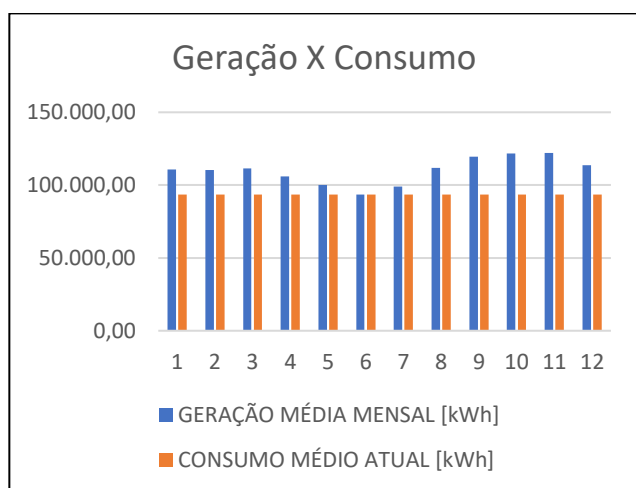
21	R\$ 3,65	R\$ 5.905.728,55	R\$ 50.847.559,66
22	R\$ 3,91	R\$ 6.329.937,03	R\$ 55.394.419,68
23	R\$ 4,19	R\$ 6.784.616,41	R\$ 60.220.818,72
24	R\$ 4,49	R\$ 7.271.955,40	R\$ 65.343.442,31
25	R\$ 4,81	R\$ 7.794.299,96	R\$ 70.779.929,95

RESULTADO E DISCURSSÃO

Partindo da análise dos dados coletados, levando em consideração um valor médio mensal da geração, posteriormente foi estudado no decorrer de 25 anos (tempo de vida útil estimado dos equipamentos, sem perder a sua eficiência), apresentado no gráfico 2, possuindo um *payback* de aproximadamente 2 anos e 3 meses, entregando uma economia de R\$ 70.779.929,95 ao final de 25 anos.

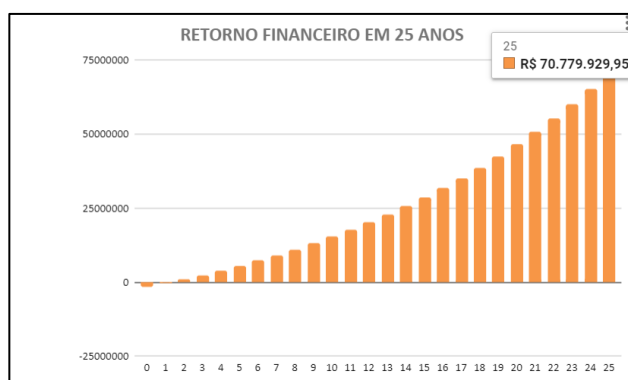
Para a análise do VPL, onde demonstra uma projeção do lucro, levando em conta a desvalorização da moeda nacional ou prováveis aumentos da inflação. É possível obter um lucro de R\$ 367.014,853 observando que esse valor encontrado, quando positivo, o investimento é satisfatório.

GRAFICO 1: GERAÇÃO VS CONSUMO CAMPUS CENTRAL.



Diante disto, o gráfico 1, mostra a comparação entre os valores de geração e consumo para cada mês do ano, é possível perceber que uma diminuição de geração nos meses de abril, maio junho e julho, por consequência da diminuição do índice de irradiação solar que toca nos MF, por este motivo, deve-se considerar a irradiação solar de cada mês e os meses com maior geração compensará essa geração enfraquecida em meses específicos.

GRAFICO 1: GERAÇÃO VS CONSUMO CAMPUS CENTRAL.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

O proposito do artigo fundava-se em uma análise de consumo energético da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte da cidade de Mossoró – RN e sugerir a viabilidade financeira com o intuito de reduzir despesas com energia. Os dados coletados na Superintendência de Obras, onde observou-se que o processo em que as faturas estavam anexadas, faltavam cinco meses, não foi possível encontrar esses valores, por este motivo foi considerado apenas sete meses para encontrar o consumo médio.

Baseou-se nos dados do *payback*, no período de dois anos, bem como o valor presente líquido, o que possibilita a viabilidade do investimento, embora o valor inicial seja considerado alto, mas com garantia de retorno no período estabelecido.

Deste modo, foi apresentado tecnicamente a efetividade de uma energia limpa para suprir as necessidades da IES, ademais de propiciar alta diversificação da Matriz Energética, promovendo a coletividade no emprego de energias renováveis.

Como uma opção viável para a administração da IES, aconselha-se uma pesquisa de viabilidade para os demais Campus Avançados e ou prédios administrativos que estão sob a responsabilidade da Administração Pública.

REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), "Retrospectiva ANEEL 2021," Brasília, Brasil, 2022. [Online]. Disponível: [inserir URL se disponível]. [Acesso em: 02 Fevereiro 2023].
- [2] Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2022). "Balanco Energético Nacional 2022" [Online]. Disponível: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>.
- [3] RJM Cortez, "Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica," Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013. [Online]. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~ee06279/docs/Dissertacao.pdf>. [Acesso em: 02 Março 2023].
- [4] F. M. Vichi and M. T. C. Mansor, "Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial," Quím. Nova, vol. 32, no. 3, pp. 757-767, 2009. [Online]. Available: <http://ref.scielo.org/4mfm4t>. [Acesso em: 02 Março 2023].
- [5] F. S. Santana, "Projeto de um sistema de geração fotovoltaica para a UFRJ," Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7462399>. [Acesso em: 05 Março 2023].
- [6] FOSTER, R; GHASSEMI, M; COSTA, A. Solar energy: renewable energy and environment. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [7] GEODESIGN RECURSO SOLAR: RADIACAO SOLAR. Consult. 2023-05-10. [Imagem]. Disponível: http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Sol_Rad_Basic_RS.html
- [8] (2012-03-28). Consult. 2023-03-16. [Imagem]. Disponível: <http://astro.if.ufrgs.br/tempo/mas.htm>
- [9] J. Tavares Pinho, *Sistemas Híbridos, Soluções Energéticas para a Amazônia*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.
- [10] (2012-03-28). Consult. 2023-03-17. [Imagem]. Disponível: <http://astro.if.ufrgs.br/tempo/mas.htm>

- [11] L. Gomes. "INTRODUÇÃO A SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTÁICA". Academia.edu - Share research. [https://www.academia.edu/39842505/INTRODUÇÃO A SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA](https://www.academia.edu/39842505/INTRODUÇÃO_A_SISTEMAS_DE_ENERGIA_SOLAR_FOTVOLTAICA) (consult. 2023-02-16).
- [12] GEODESIGN RECURSO SOLAR: RADIACAO SOLAR. Consult. 2023-02-25. [Imagem]. Disponível: http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Sol_Rad_Basic_RS.html
- [13] One moment, please... Consult. 2023-03-01. [Imagem]. Disponível: <https://www.guiaspraticas.com/estaciones-meteorologicas/heliografo>
- [14] Actinógrafo e Heliógrafo: dois instrumentos que medem grandezas relacionadas à luz solar. Consult. 2023-02-09. [Imagem]. Disponível: <https://meteoropole.com.br/2016/07/actinografo-e-heliografo-dois-instrumentos-que-medem-grandezas-relacionadas-a-luz-solar/>
- [15] GEODESIGN RECURSO SOLAR: PIRANOMETRO (DHI - GHI) - ESTAÇÃO SOLARIMETRICA. Consult. 2023-02-14. [Imagem]. Disponível: http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Pyranometer_RS.html
- [16] OLDENBURG. Photovoltaics Lectures. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. Eldorado Summer School, 1994.
- [17] CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. Consult. 2023-02-09. [Imagem]. Disponível: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321
- [18] "Solar Photovoltaic (PV) Roadmap for Singapore (A Summary)", junho de 2013, Solar Photovoltaic (PV) Roadmap for Singapore (A Summary), Singapore.
- [19] Silício mono ou policristalino: quem vence o duelo? Consult. 2023-02-22. [Imagem]. Disponível: <https://canalsolar.com.br/silicio-mono-ou-policristalino-quem-vence-o-duelo/>
- [20] MACEDO, C. LUIS E MACÊDO, N. WILSON; Curso Teórico Prático de Especialização a Nível Técnico Sobre Sistemas Fotovoltaicos – Eletrificação Predial e Bombeamento de Água – p.1-113; Alter do Chão, Santarém – Pará – 2010
- [21] J. T. Pinho and M. A. Galdino, "Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos," Rio de Janeiro: Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES), 2014.
- [22] C. Honsberg e S. Bowden, *Photovoltaics*. University of New South Wales Photovoltaics Centre, 1999.
- [23] M. G. Villalva, "Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações," 1st ed., São Paulo: Érica, 2012.