

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROPOSTA DE PROJETO DE GRADUAÇÃO**



GABRIEL PONATH RODRIGUES

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE ENERGIA
RENOVÁVEL PARA ALIMENTAÇÃO DE DATA CENTER**

VITÓRIA
2022

GABRIEL PONATH RODRIGUES

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE ENERGIA RENOVÁVEL
PARA ALIMENTAÇÃO DE DATA CENTER**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Gabriel Ponath Rodrigues**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. Maxwell E. Monteiro

VITÓRIA
2022

GABRIEL PONATH RODRIGUES

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE ENERGIA RENOVÁVEL
PARA ALIMENTAÇÃO DE DATA CENTER**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Gabriel Ponath Rodrigues**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

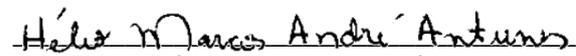
Aprovada em 21 de março de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Maxwell E. Monteiro
Instituto Federal do Espírito Santo
Coorientador



Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Eng. Thiago Sales Rocha
Eklos Engenharia
Examinador

Aos meus pais, minha avó querida e a minha então namorada e futura esposa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus que incondicionalmente me capacitou ao longo de toda a jornada do curso. Agradeço aos meus pais pelo carinho, incentivo e amor sempre presente em minha vida.

Agradeço a minha avó por sempre acreditar e me ajudar financeiramente em meus estudos, sem você talvez eu não chegasse onde estou. Uma vez Isaac Newton disse “*Se cheguei até aqui foi porque me apoiei no ombro dos gigantes*”, você pai, mãe e avó são os gigantes que me proporcionaram chegar até aqui.

Agradeço também a minha namorada pelo apoio, carinho e amor de sempre. Tê-la ao meu lado faz o meu mundo ficar mais feliz, me faz sonhar e acreditar que é possível. Agradeço aos meus amigos por compartilhar tantos momentos bons e ruins ao longo dessa jornada.

Agradeço ao professor Walbermark por aceitar ser meu orientador, pela atenção e disponibilidade de sempre. Por fim, agradeço a Universidade Federal do Espírito Santo e a todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia Elétrica por contribuírem na minha formação tanto pessoal quanto profissional.

RESUMO

O data center é parte fundamental para o funcionamento de todas as aplicações que usam a internet, processando grande volume de dados e direcionando o envio dos mesmos. A concentração de grandes centrais de uso exclusivo para processamento de dados e a crescente demanda por estes serviços têm levando este modelo centralizado ao questionamento devido a sua ineficácia em vários aspectos. Desta forma, neste trabalho faz-se uma pesquisa sobre a viabilidade da criação de pequenos data centers autossustentáveis energeticamente, utilizando o conceito do data center *in a box* aliado a tecnologia *immersion cooling*. O intuito é dimensionar um sistema de geração de energia renovável para suprir totalmente a demanda da carga dimensionada do data center, analisando a viabilidade do uso de geração eólica e solar.

Palavras-chave: Data Center. Energias renováveis. Eficiência energética. Autossuficiência energética. Dimensionamento de carga.

ABSTRACT

The data center is a fundamental part for the operation of all applications that use the internet, processing large volumes of data and directing their sending. The concentration of large centers for exclusive use for data processing and the growing demand for these services have led to questioning this centralized model due to its ineffectiveness in several aspects. Thus, in this work, a research is carried out on the feasibility of creating small energy self-sustaining data centers, using the concept of the boxed data center combined with immersion cooling technology. The aim is to dimension a renewable energy generation system to fully supply the demand of the dimensioned load of the data center, analyzing the feasibility of using wind and solar generation.

Keywords: Data Center. Renewable energy. Energy efficiency. Energy self-sufficiency. Load sizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arranjo comum dos sistemas presentes no Data Center	18
Figura 2 – Esquemático elétrico de data center tier I	19
Figura 3 – Esquema de corredores na sala de computadores	20
Figura 4 – Consumo médio por setores	21
Figura 5 – Sala de computadores resfriada a ar	23
Figura 6 – Sala de computadores resfriada a liquido.....	23
Figura 7 – Matriz energética do BRICS	24
Figura 8 – Geração solar fotovoltaica mundial em GW	24
Figura 9 – Potencial de geração solar no Brasil	25
Figura 10 – Payback médio por estado de instalações de geração solar	26
Figura 11 – Arranjos de painéis fotovoltaicos em paralelo	27
Figura 12 – Arranjos de painéis fotovoltaicos em série	27
Figura 13 – Curva I-V e P-V característica dos painéis fotovoltaicos	28
Figura 14 – Curva I-V com efeito da variação de temperatura e irradiância	28
Figura 15 – Potencial de geração de energia eólica no Brasil	29
Figura 16 – Distribuição de probabilidade de Weibull.....	30
Figura 17 – Turbina de eixo vertical	31
Figura 18 – Turbina de eixo horizontal	31
Figura 19 – Sistema off-grid de geração eólica.....	32
Figura 20 – Sistema híbrido de geração de energia.....	32
Figura 21 – Sistema on-grid de geração de energia.....	33
Figura 22 – Consumo de energia por setor estimado do data center	35
Figura 23 – Smartpod X	35
Figura 24 – Rosa dos ventos.....	45
Figura 25 – Geração de energia por turbina variando a altura	46
Figura 26 – Panorama energético do sistema	49
Figura 27 – PUE e DCiE em relação a energia gerada pelo sistema solar	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros térmicos operacionais	20
Tabela 2 – Parâmetros da carga crítica	34
Tabela 3 – Parâmetros do Smartpod X	36
Tabela 4 – Gasto de energia por setor usando o smartpod X	36
Tabela 5 – Carga total em kWh	36
Tabela 6 – Irradiância mensal	37
Tabela 7 – Paineis fotovoltaicos	37
Tabela 8 – Geração estimada por painel	38
Tabela 9 – Parâmetros elétricos do painel corrigidos pela temperatura	38
Tabela 10 – Inversores	39
Tabela 11 – Parâmetros calculados do inversor	40
Tabela 12 – Kit de fixação	41
Tabela 13 – Dimensionamento dos cabos	41
Tabela 14 – Circuito	42
Tabela 15 – Dimensionamento da proteção	42
Tabela 16 – Custos do Serviço de Integração	42
Tabela 17 – Terraplanagem	43
Tabela 18 – Orçamento final fotovoltaico	44
Tabela 19 – Dados para a estimação da geração eólica	44
Tabela 20 – Turbinas eólicas	45
Tabela 21 – Dados de frequência dos ventos	45
Tabela 22 – Geração eólica para altura igual a 20m	47
Tabela 23 – Geração eólica para altura igual a 30m	47
Tabela 24 – Geração eólica para altura igual a 40m	47
Tabela 25 – Geração eólica para altura igual a 50m	47
Tabela 26 – Geração eólica e solar diária	47
Tabela 27 – Geração eólica turbina NE-20K e solar	48
Tabela 28 – Geração eólica turbina NE-30K e solar	48
Tabela 29 – Geração eólica turbina XTL-50K e solar	48
Tabela 30 – Panorama energético do sistema	49
Tabela 31 – Orçamento Final	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATS	<i>Automatic Transfer Switch</i>
BRICS	Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CPID	Centro de Pesquisa, Inovação e Conhecimento
CRESESB	Centro de Referência para as energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
DCiE	<i>Data Center Infrastructure Effectiveness</i>
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surto
FDI	Fator de Dimensionamento do Inversor
GW	Gigawatt
kWh	Quilowatt-hora
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NBR	Norma Brasileira
PDU	<i>Power Distribution Unit</i>
PUE	<i>Power Usage Effectiveness</i>
TI	Tecnologia da Informação
TWh	Terawatt-hora
UPS	<i>Uninterruptable Power Supply</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área (m ²)
C	Velocidade característica de Weibull
Canual	Carga anual (kWh/ano)
C _d	Carga diária (kWh/dia)
C _{TI}	Carga dos equipamentos de TI (kW)
C _{Total}	Carga total da infraestrutura (kW)
E	Energia gerada (W)
E _p	Energia gerada pelo painel fotovoltaico (kWh/dia)
f(v)	Frequência de ventos
F _c	Fator de correção (%)
γ	Coeficiente de temperatura (%)
I	Corrente elétrica (A)
I'	Corrente corrigida (A)
I _{I máx}	Corrente contínua máxima na entrada do inversor (A)
I _n	Corrente nominal (A)
IR	Irradiação média (kWh/m ² /dia)
I _{SC}	Corrente de curto circuito (A)
K	Fator de forma de Weibull
K1	Fator de correção de agrupamento
K2	Fator de correção de temperatura
N	Número de painéis fotovoltaicos
N _{ms}	Número de módulos em série ao inversor
N _p	Número de módulos em paralelo ao inversor
N _{turbina}	Número de turbinas eólicas
P _{FV}	Potência do sistema fotovoltaico (W)
P _{kWh}	Potência gerada pelo sistema eólico (kWh)
P _{máx}	Potência máxima na entrada do inversor (W)
P _{n CA}	Potência nominal em corrente alternada do inversor (W)
P _w	Potência gerada pelo sistema eólico (W)
T _{NOCT}	Temperatura em condições nominais de operação (°C)
T _{STC}	Temperatura em condições padrão de teste (°C)
V	Velocidade média dos ventos (m/s)

$V_I \text{ máx}$	Tensão máxima na entrada do Inversor (V)
$V_{m,T \text{ máx}}$	Tensão do painel no ponto de máxima potência e temperatura máxima (V)
$V_{m,T \text{ min}}$	Tensão do painel no ponto de máxima potência e temperatura mínima (V)
$V_{MPPT,max}$	Tensão máxima de operação no MPPT do Inversor (V)
$V_{MPPT,min}$	Tensão mínima de operação no MPPT do Inversor (V)
V_{min}	Tensão mínima de operação (V)
V_n	Tensão nominal (V)
$V_{OC,Tmin}$	Tensão de circuito aberto do módulo operando em temperatura mínima (V)
η	Rendimento (%)
ρ	Densidade do ar (kg/m^3)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	JUSTIFICATIVA	15
3	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	16
3.1	Objetivo geral	16
3.2	Objetivos específicos	16
4	REFERENCIAL TEÓRICO	17
4.1	Definição	17
4.2	Infraestrutura	17
4.2.1	Instalações elétricas.....	18
4.2.2	Sistema de climatização	20
4.3	Indicadores de eficiência energética	21
4.4	Consumo energético por setores	21
4.5	Data center <i>in a box</i>	22
4.6	Energias renováveis	23
4.7	Energia solar	25
4.7.1	Painéis fotovoltaicos	26
4.7.1.1	Característica elétrica dos módulos fotovoltaicos	27
4.8	Energia eólica	29
4.8.1	Curva de Weibull	29
4.8.2	Turbinas eólicas	30
4.8.2.1	Eixo vertical.....	30
4.8.2.2	Eixo horizontal	31
4.9	Configurações da geração distribuída	32
5	ESTUDO DE CASO	34
5.1	Dimensionamento da carga do data center	34
5.1.1	Data center refrigerado a ar	34
5.1.2	Data center refrigerado a líquido	35
5.2	Escolha do local	36
5.3	Dimensionamento do sistema solar	37
5.3.1	Levantamento de dados.....	37

5.3.2	Cálculo da geração de energia	37
5.3.3	Dimensionamento do inversor	38
5.3.3.1	Tensão de entrada	39
5.3.3.2	Faixa de operação do MPPT	39
5.3.3.3	Corrente máxima do inversor	39
5.3.3.4	Fator de dimensionamento do inversor	40
5.3.3.5	Determinando a quantidade de inversores	40
5.3.4	Dimensionamento de cabos e demais acessórios	40
5.3.4.1	Kit de fixação.....	40
5.3.4.2	Dimensionamento dos cabos	41
5.3.5	Dimensionamento da proteção do sistema	42
5.3.6	Demais custos	42
5.3.7	Orçamento final do projeto fotovoltaico	44
5.4	Sistema de geração eólica	44
5.4.1	Levantamento de dados.....	44
5.3.6	Estimando a geração de energia.....	46
5.5	Análise do potencial de geração de energia	47
5.6	Eficiência energética do sistema	48
5.7	Orçamento Final	51
6	CONCLUSÃO	52
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de energia se torna a cada ano uma realidade desafiadora para todos os países. Lidar com questões relacionadas a energias renováveis e eficiência energética nunca foi tão necessário. Um dos setores que demanda de um uso significativo de energia são as aplicações que utilizam a internet em geral, pois permanecem ligadas todos os dias e não contem como prioridade a eficiência energética.

Um data center é composto basicamente por uma série de equipamentos que são fundamentais para o funcionamento da internet, enviando informações e armazenando dados a qualquer momento dos usuários conectados. Por exercer uma função vital, suas instalações permanecem ligadas vinte e quatro horas por dia durante todos os dias do ano, para evitar a perda de dados e oferecendo uma alta disponibilidade a rede.

Os fatores mencionados acima pesam para o lado do consumo de energia. Conforme um relatório do laboratório *Lawrence Berkeley* emitido em conjunto com o governo dos Estados Unidos, em 2007 somente os data centers nos Estados Unidos consumiram 61 bilhões de kWh de energia, custando um total de 4,5 bilhões de dólares. Em 2010 o consumo energético para esse fim representou 2% de toda a energia consumida no país (SHEHABI, A., SMITH, S., SARTOR, D., BROWN, R., HERRLIN, M., KOOMEY, J., ET AL.).

Ano após ano com o surgimento de novas tecnologias como *big data*, internet das coisas e inteligência artificial foi necessário obter maior poder de processamento de dados. E em 2020, segundo o relatório publicado pela empresa *NyDIG*, o consumo energético de data centers a nível global foi de aproximadamente 204 TWh (ROSS STEVENS, NIC CARTER).

Para atender a crescente demanda e aumentar a eficiência energética desses sistemas surgiu o conceito de data centers *in a box*. São basicamente pequenos módulos que possuem sistema de refrigeração e podem abrigar os equipamentos de TI. Esta solução traz a capacidade de descentralizar o armazenamento de dados, podendo aumentar a capacidade do sistema e diminuir a latência no envio dados.

2 JUSTIFICATIVA

A descentralização dos setores de data center é algo que pode ser favorável em vários aspectos, porém como um todo a carga energética demandada ainda continua sendo igual a centralizada. O ponto principal é que distribuído em várias unidades, tem-se cargas menores espalhadas geograficamente.

Esses pequenos módulos espalhados e com cargas menores viabilizam, a princípio, o uso de micro usinas distribuídas de geração de energia renovável. Tornando possível, através desta geração, que exista uma diminuição significativa do consumo energético primário dos data centers como um todo.

Todos estes recursos aliados a métricas de eficiência energética podem mudar um cenário preocupante. O significativo crescimento inesperado da demanda por novos centros de processamento de dados e do consumo de energia por parte dos mesmos pode ter seus efeitos mitigados por essa estratégia apresentada.

Sendo assim, esse trabalho se atém no dimensionamento de carga para uma pequena central de processamento de dados. Depois de obtida todas as informações referentes à carga, é feito um projeto usando fontes renováveis de energia com foco em encontrar a solução com o menor custo.

3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o uso de fontes renováveis de energia para alimentar pequenos data centers, analisando a viabilidade da carga se tornar autossustentável energeticamente.

3.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram estipulados os objetivos a seguir:

- Realizar um estudo da estrutura física de um data center;
- Definir métricas para avaliação da eficiência energética em data center;
- Avaliar o consumo energético por setores de um data center;
- Estabelecer as vantagens do modelo data center *in a box* proposto;
- Efetuar um orçamento final com todos os custos econômicos da implementação do data center e do sistema de geração de energia.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Definição

Basicamente o data center é o local responsável por processar, armazenar e enviar a informação digital. Todos esses procedimentos são essenciais para o funcionamento do que hoje conhecemos como internet e para a maioria dos negócios atuais. Cada equipamento de TI que faz parte desta infraestrutura desempenha uma função:

- *Servers*: equipamentos que processam dados;
- *Storage*: equipamentos que armazenam dados;
- *Network*: equipamentos que se comunicam com a internet para enviar os dados processados.

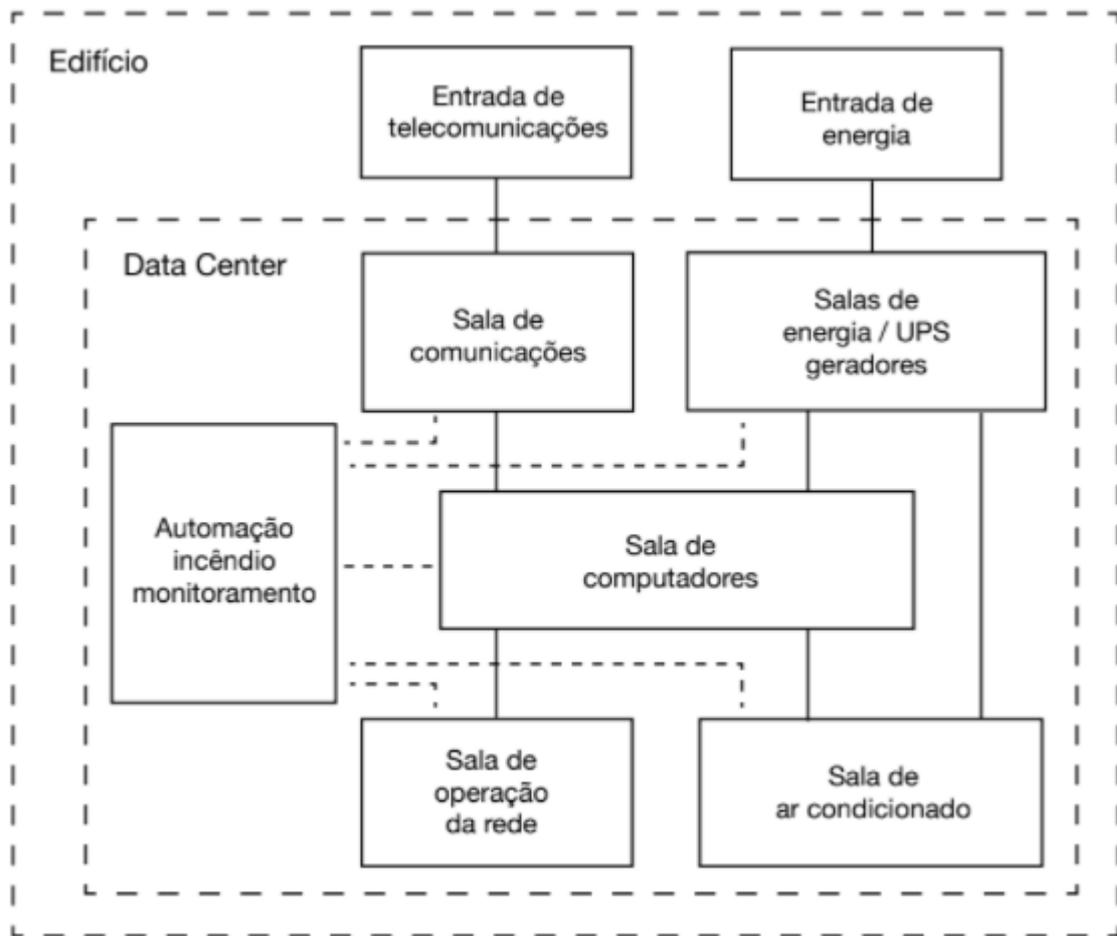
4.2 Infraestrutura

Pelo caráter de extrema importância, as instalações físicas do data center são projetadas para suportar falhas, contendo sistemas de redundância para estender a disponibilidade do todo. Abaixo destaca-se os quatro sistemas principais que compõem a infraestrutura física comum a maioria dos data centers:

- *Servidores*: corresponde a todos os equipamentos de TI, caracterizado pela sala de computadores.
- *Climatização*: responsável pela refrigeração das cargas crítica, representado pela sala de ar condicionado.
- *Elétrico*: responsável por todas as ligações elétricas, representado pela entrada de energia, ups, geradores, telecomunicações e demais.
- *Automação e segurança*: responsável pelo suporte a falhas e segurança.

Na Figura 1 visualiza-se o arranjo físico comum na maioria destes sistemas.

Figura 1 – Arranjo comum dos sistemas presentes no Data Center

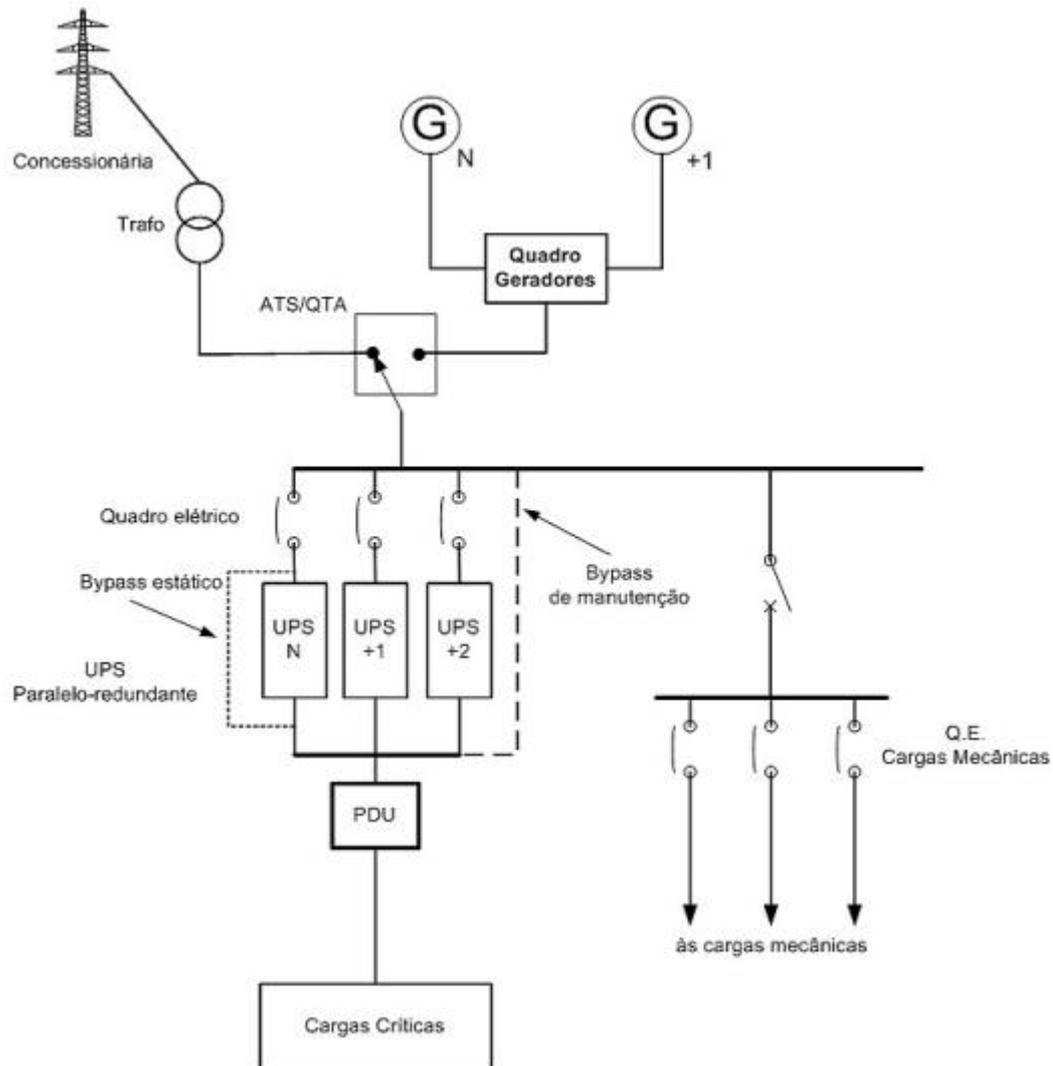


Fonte: ABNT NBR 16665:2019.

4.2.1 Instalações elétricas

Dado o grande consumo de energia dos equipamentos de TI presentes no data center, o sistema elétrico é de vital importância para o funcionamento de toda a estrutura. Na Figura 2, mostra-se uma representação em esquemático elétrico comum a esse tipo de instalação. Destacar-se-á o funcionamento do sistema elétrico como um todo e depois comentar sobre os equipamentos mais importantes nesse processo.

Figura 2 – Esquemático elétrico de data center *tier I*



Fonte: MARIN (2016).

A energia da concessionária passa primeiro pelo ATS que funciona como uma chave entre os dois circuitos de fornecimento de energia, ligando o circuito de geradores caso aconteça falta de energia pelo lado da concessionária.

As cargas mecânicas e demais cargas são alimentadas através de uma barra simples, visto não ter necessidade de alimentação contínua dessas cargas devido a falta de energia.

Em casos de falha de energia por parte da concessionária, até que a comutação do ATS aconteça e que o gerador possa suprir a carga crítica, o UPS garante o fornecimento de energia às cargas críticas do sistema.

Após o UPS tem-se o quadro elétrico PDU que é um quadro de distribuição setorial para atender as cargas críticas, ele é usado a fim de reduzir a carga por ramo de distribuição.

4.2.2 Sistema de climatização

Devido a sensibilidade dos equipamentos tecnológicos presentes no data center a variação de temperatura, o sistema de refrigeração é de vital importância para o funcionamento normal destes. A carga térmica é dimensionada conforme a necessidade de toda a infraestrutura, sendo levados em conta os parâmetros de temperatura e umidade. Os parâmetros térmicos operacionais recomendados pela NBR 14565:2013 são:

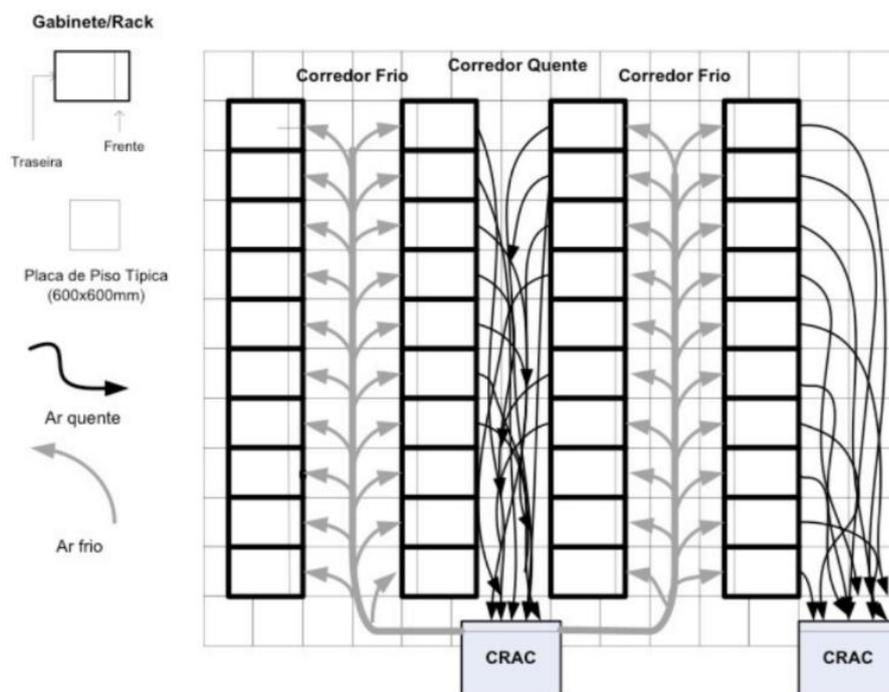
Tabela 1 – Parâmetros térmicos operacionais

Faixa de Temperatura Operacional	Taxa de Troca Máxima	Umidade	Ponto de Condensação Máximo
18 a 27°C	5° C/h	60%	15°C

Fonte: ABNT (2013).

Um recurso muito utilizado é o conceito de corredores frios e quentes para auxiliar na eficiência da troca de calor entre os equipamentos. Este corredor se localiza entre os gabinetes presentes na sala de computadores, o que auxilia a conformação dos fluxos de ar quente e frio nesses espaços. Na Figura 3 mostra-se uma imagem exemplificando melhor o conceito de troca de calor entre esses corredores.

Figura 3 – Esquema de corredores na sala de computadores



Fonte: MARIN (2016).

4.3 Indicadores de eficiência energética

As métricas de eficiência energética são fundamentais para avaliar a eficiência do uso energético em toda a instalação. As mais comuns são as listadas abaixo:

- PUE: definido pela equação (1).

$$PUE = \frac{C_{Total}}{C_{TI}} \quad (1)$$

- DCiE: definido pela equação (2).

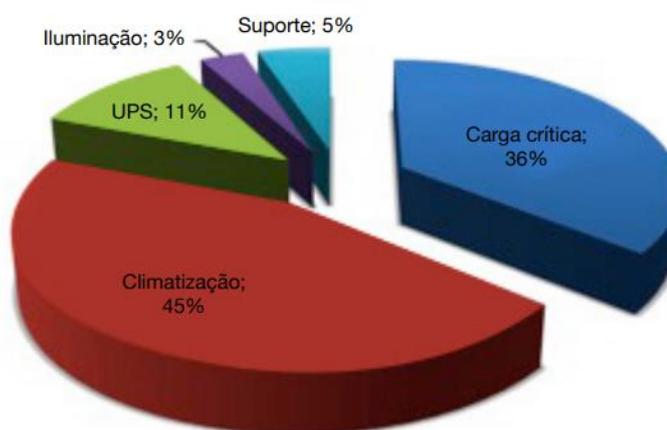
$$DCiE = \frac{C_{TI}}{C_{Total}} \quad (2)$$

Para fins de dimensionamento de carga da infraestrutura, o valor de PUE recomendado é de 1.8, o que implica em um DCiE médio aproximado de 55%. Como medida de eficiência energética o valor ideal de PUE é o mais próximo de um (MARIN).

4.4 Consumo energético por setores

A infraestrutura necessária para viabilizar a plena operação desses grandes empreendimentos é altamente custosa, exige custos desde o projeto até a manutenção de todos os sistemas. Um dos maiores problemas é o alto consumo de energia. Na Figura 4 destaca-se o gasto médio de data centers dividido por sistemas.

Figura 4 – Consumo médio por setores



Fonte: MARIN (2016).

Como pode ser observado o setor de refrigeração é o que necessita proporcionalmente de maior quantidade de energia. Isso acontece devido a imensa quantidade de computadores e equipamentos de TI na sala de servidores exigindo um nível de refrigeração intenso. Mesmo utilizando de recursos como pisos elevados e demais infraestruturas físicas para melhorar a troca de calor entre os equipamentos, essa ainda é a parte mais delicada do consumo de energia de todo o sistema.

Outro ponto é que devido a necessidade de deixar espaços entre os corredores dos racks, o espaço interno do data center é muito mal utilizado devido a temperatura e demais fatores. O que na prática deixa uma área útil muito pequena para a sala de computadores.

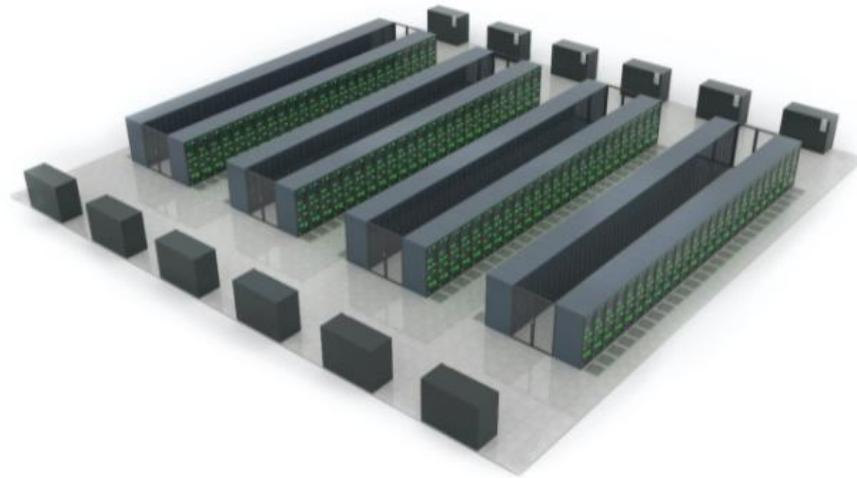
Além desses fatores citados, tem-se a latência. Em um mundo que busca sempre rapidez nas trocas de informações, ter locais específicos para o processamento da informação faz com que este processo sofra um atraso devido ao deslocamento dos dados.

4.5 Data center *in a box*

Trata-se de pequenas caixas ou módulos que contem sistemas de refrigeração e espaço para a alocação dos equipamentos de TI. Este conceito surgiu com o intuito de criar uma solução descentralizada, eficaz energeticamente e de fácil alocação física.

Desde então varias empresas tem se voltado a desenvolver tecnologias e modelos de módulos portáteis para processamento de dados. Nesta pesquisa optou-se pela escolha de Data Centers *in a box* que usam o chamado “*immersion cooling*”. Esta tecnologia utiliza líquidos para minimizar os efeitos do consumo energético da refrigeração, possibilitando a alocação dos equipamentos de TI bem próximos uns dos outros. Para exemplificar o modelo proposto e comparar suas diferenças frente ao tradicional, na Figura 5 tem-se uma sala de servidores refrigerada a ar e na Figura 6 uma sala refrigerada a líquido.

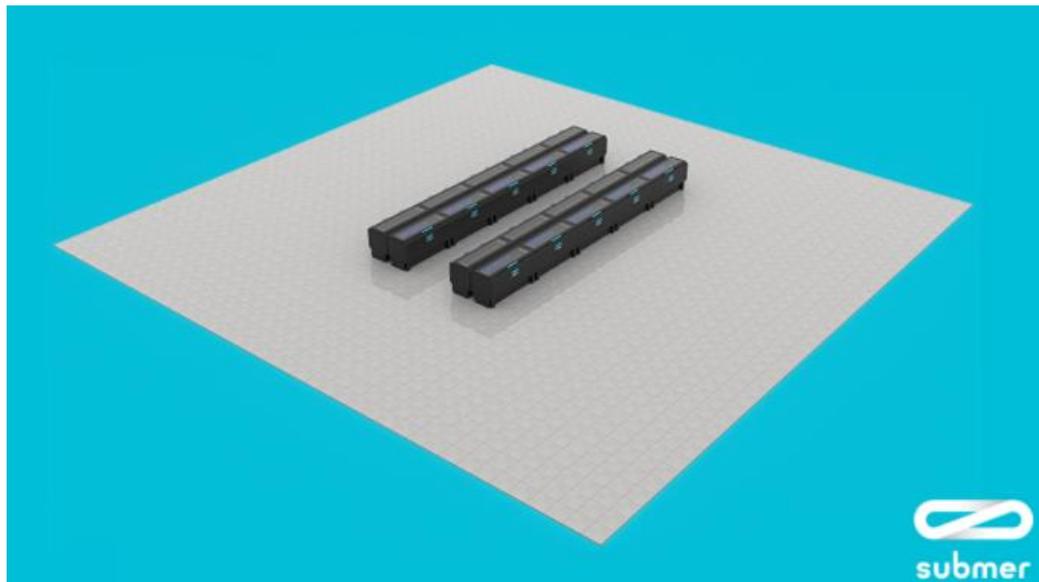
Figura 5 – Sala de computadores resfriada a ar



Forced-air cooling

Fonte: SUBMER (2021).

Figura 6 – Sala de computadores resfriada a liquido



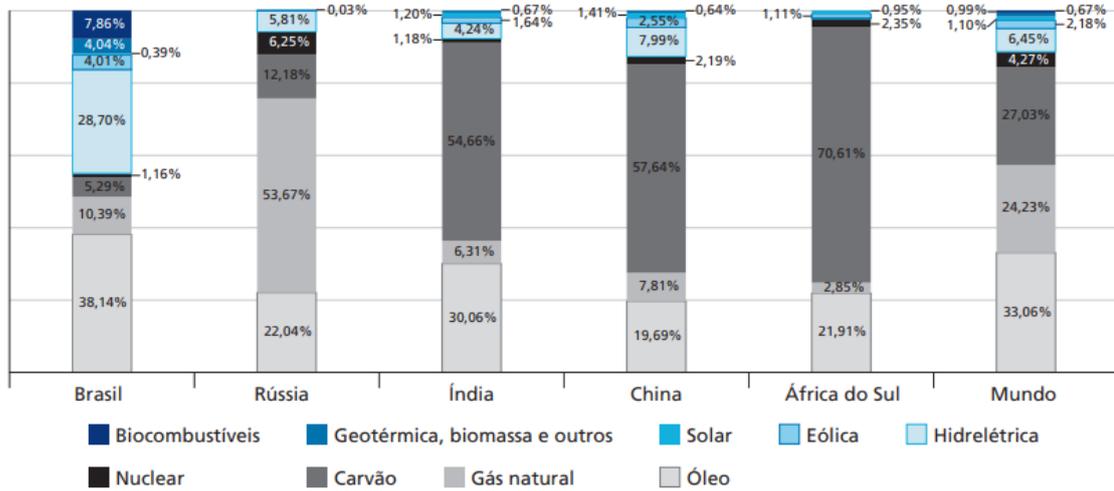
Fonte: SUBMER (2021).

4.6 Energias Renováveis

O uso de fontes de energia baseada em queima de combustíveis fósseis fora por muito tempo a mais utilizada em termos mundiais, sendo toda uma infraestrutura energética criada a partir desta fonte de geração. Ações políticas de descarbonização e de mitigação ao aquecimento global impulsionaram o crescimento a nível mundial do uso de energias renováveis, dentre elas a energia solar e eólica vem se destacando como mais difundidas.

No cenário energético do Brasil temos o uso de biocombustíveis e da biomassa desempenhando papéis fundamentais para o abastecimento energético no país. Em relatório publicado pelo BRICS, destaca-se na Figura 7 a matriz energética dos países participantes.

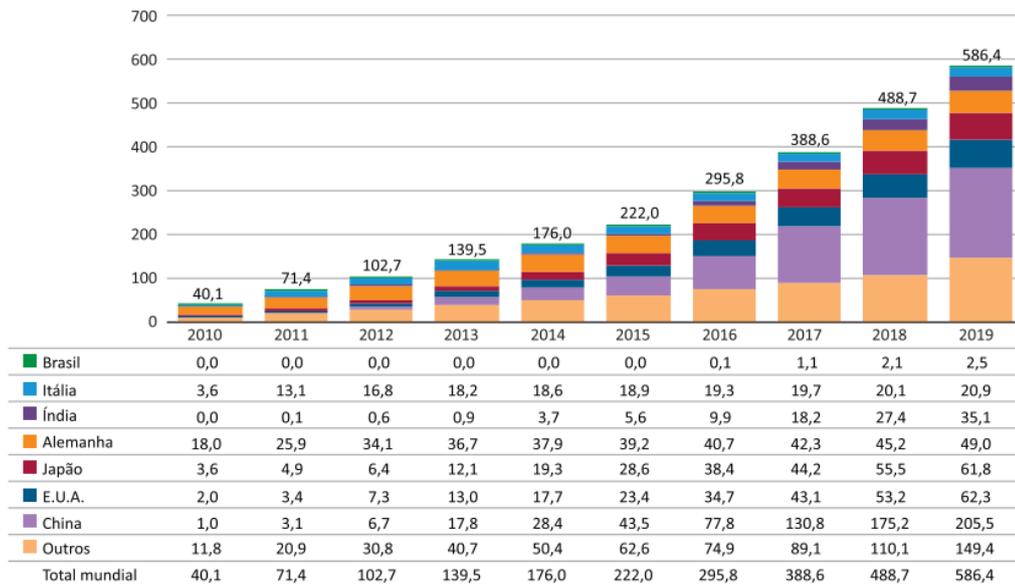
Figura 7 – Matriz energética do BRICS



Fonte: LUCIANO LOSEKANN, AMANDA TAVARES (2021).

Mesmo apresentando certa diversificação quanto às fontes de energia presentes na matriz do Brasil, o país ainda não faz bom proveito de sua posição física estratégica com ótimos potenciais para geração de energia solar e eólica. Como ponto de comparação, na Figura 8 tem-se a geração solar a nível mundial frente a presente em nosso país.

Figura 8 – Geração solar fotovoltaica mundial em GW



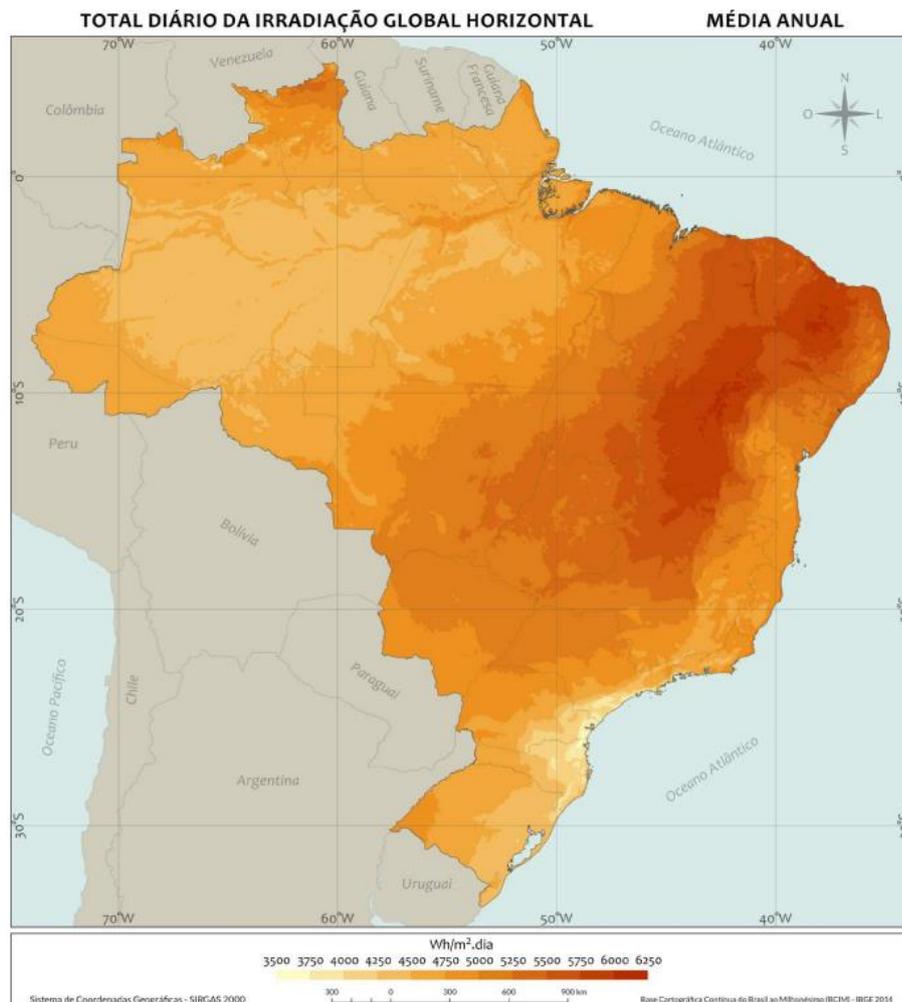
Fonte: BEZERRA (2021).

A energia solar citada é apenas um exemplo do potencial de geração de energia sustentável que se pode aproveitar para diversificar a matriz energética no Brasil, visto o posicionamento geográfico favorável a vários tipos de geração de energia. Como parte da pesquisa teve-se a energia solar, porém energia eólica e de biomassa possuem potenciais para crescimento no país.

4.7 Energia solar

A geração de energia a partir do sol tem sido a principal escolha para geração distribuída atualmente em nosso país. O principal fator é o potencial de geração solar presente em nosso território representado na Figura 9.

Figura 9 – Potencial de geração solar no Brasil

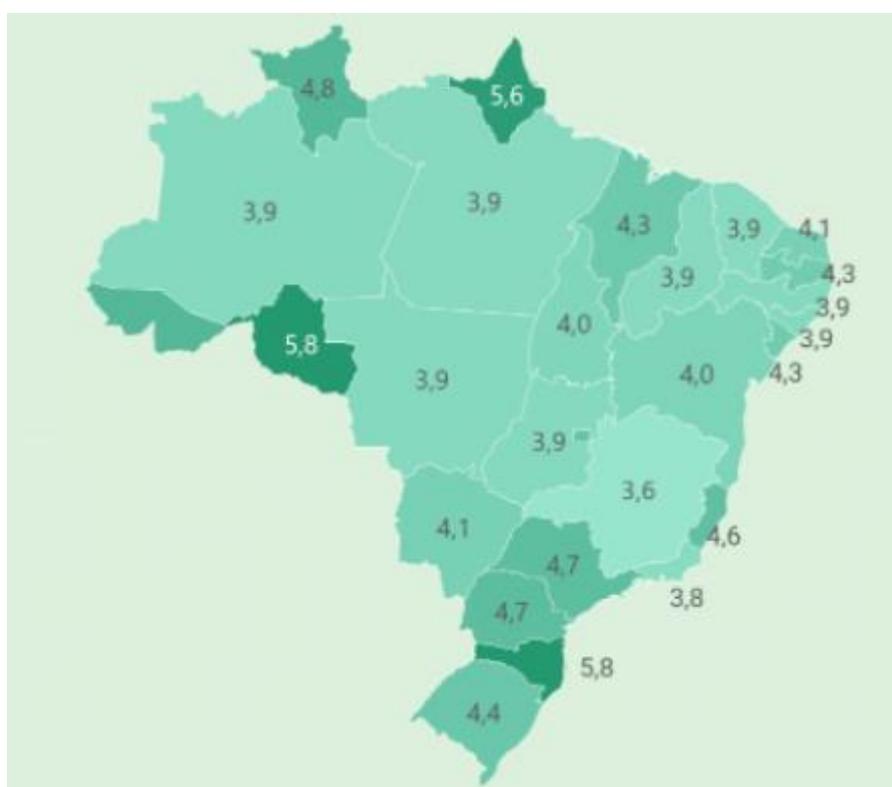


Fonte: PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES... (2017).

Aliado ao fator do potencial de geração, a redução do custo dos módulos fotovoltaicos ao longo dos anos está impulsionando o crescimento do seu uso. Uma pesquisa sobre geração distribuída feita pela empresa Grenner destaca o *payback* médio de uma geração solar nos estados do Brasil.

É interessante observar na Figura 10 que diferentes regiões do Brasil o *payback* oscila consideravelmente, isso ocorre principalmente devido à oscilação dos parâmetros de irradiância de cada região. O termo *payback* citado é um indicador financeiro que indica o tempo até o retorno do investimento.

Figura 10 – *Payback* médio por estado de instalações de geração solar



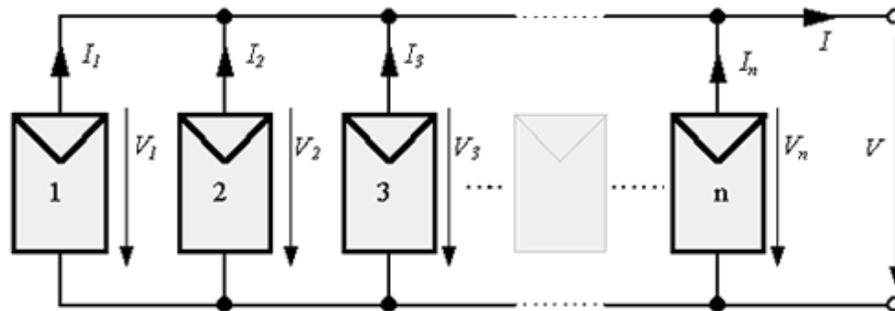
Fonte: GREENER (2022).

4.7.1 Painéis fotovoltaicos

São dispositivos projetados para permitir a conversão da energia vinda do sol em energia elétrica, esse processo se dá através do efeito fotoelétrico. Como característica possuem baixa tensão e corrente de saída, portanto são agrupados em várias células que formam um módulo.

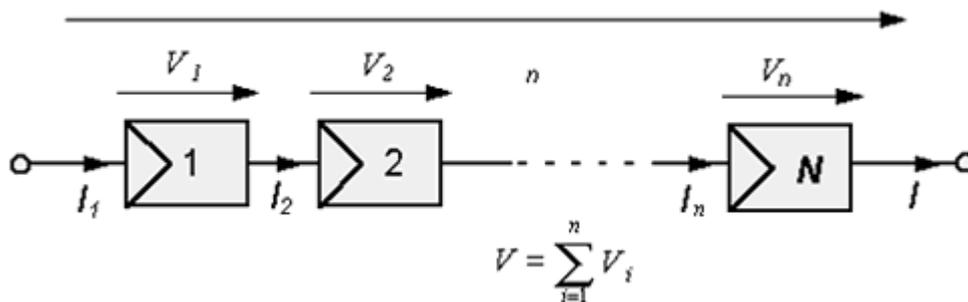
Os arranjos das células nos módulos podem ser feitos de forma paralela ou em série. No arranjo em paralelo temos a mesma tensão para todos os painéis fotovoltaicos e a corrente total sendo a soma de todas as correntes nos painéis como destacado na Figura 11. Já no arranjo em série soma-se as tensões de cada painel, sendo esse arranjo o mais utilizado na instalação dos painéis.

Figura 11 – Arranjos de painéis fotovoltaicos em paralelo



Fonte: CRESESB (2008).

Figura 12 – Arranjos de painéis fotovoltaicos em série



Fonte: CRESESB (2008).

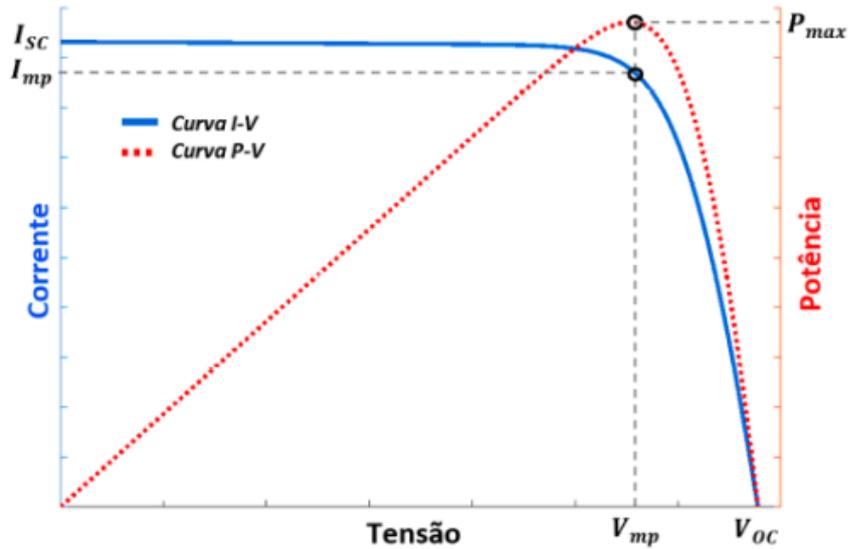
4.7.1.1 Característica elétrica dos módulos fotovoltaicos

Para se dimensionar uma geração fotovoltaica é de extrema importância conhecer as características elétricas dos painéis. A principal característica é a potência descrita no módulo fotovoltaico e se refere à potência de pico, outros parâmetros importantes são destacados na lista abaixo.

- Voltagem de circuito aberto (V_{oc});
- Corrente de curto circuito (I_{sc});
- Potência máxima (P_m);
- Voltagem de potência máxima (V_{mp});
- Corrente de potência máxima (I_{mp}).

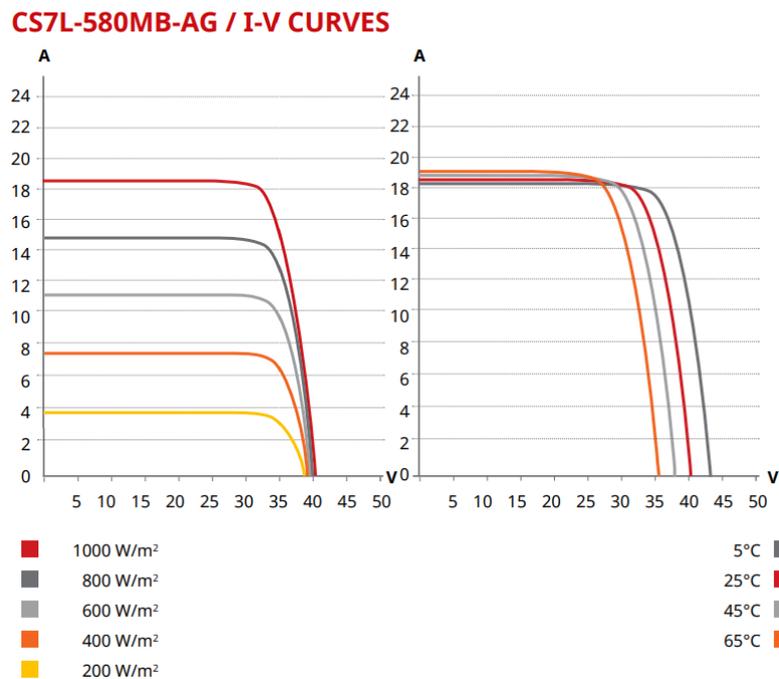
Juntamente com essas características temos as curvas que representam a tensão, potência e corrente dos painéis. Essas curvas são obtidas a partir das condições padrões de cada fabricante. É relevante mencionar que fatores como temperatura e intensidade luminosa afetam as características dessas curvas, podemos observar na Figura 14 os efeitos desses fatores.

Figura 13 – Curva I-V e P-V característica dos painéis fotovoltaicos.



Fonte: E. DURAN, J. GALAN, M. SIDRACH-DE CARDONA, AND J. ANDUJAR (2007).

Figura 14 – Curva I-V com variações na irradiância na parte a esquerda e sobre o efeito da variação de temperatura na direita.



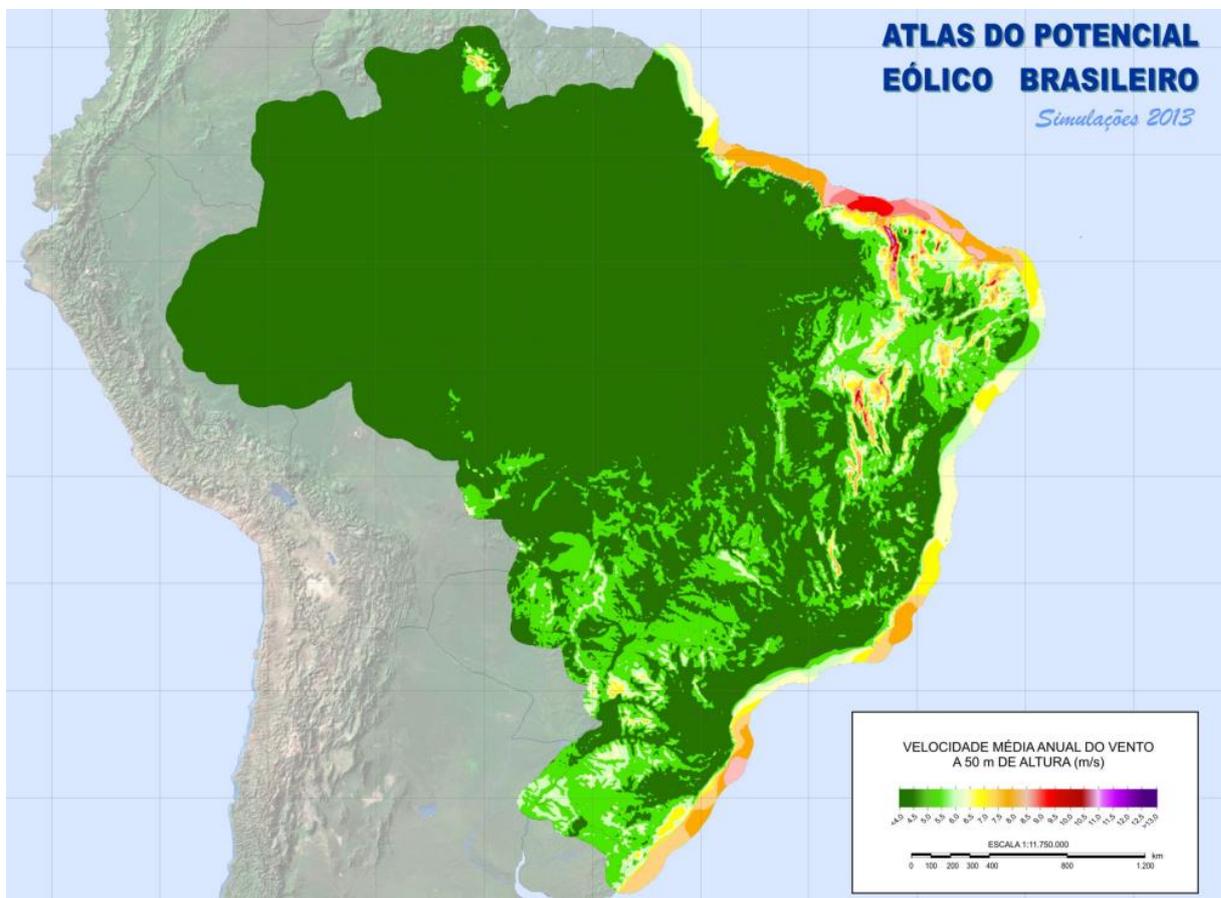
Fonte: CANADIAN SOLAR (2021).

4.8 Energia eólica

A energia eólica é uma fonte de energia renovável que é obtida a partir dos ventos. Basicamente se utiliza de turbinas com uma aerodinâmica apropriada para converter a força dos ventos em energia mecânica que é convertida posteriormente em elétrica.

Os ventos são originados pela radiação solar que aquece a superfície terrestre, sendo influenciada por fatores como relevo, clima, altura e entre outros. No Brasil o potencial de geração eólico é destacado pela Figura 15.

Figura 15 – Potencial de geração de energia eólica no Brasil.



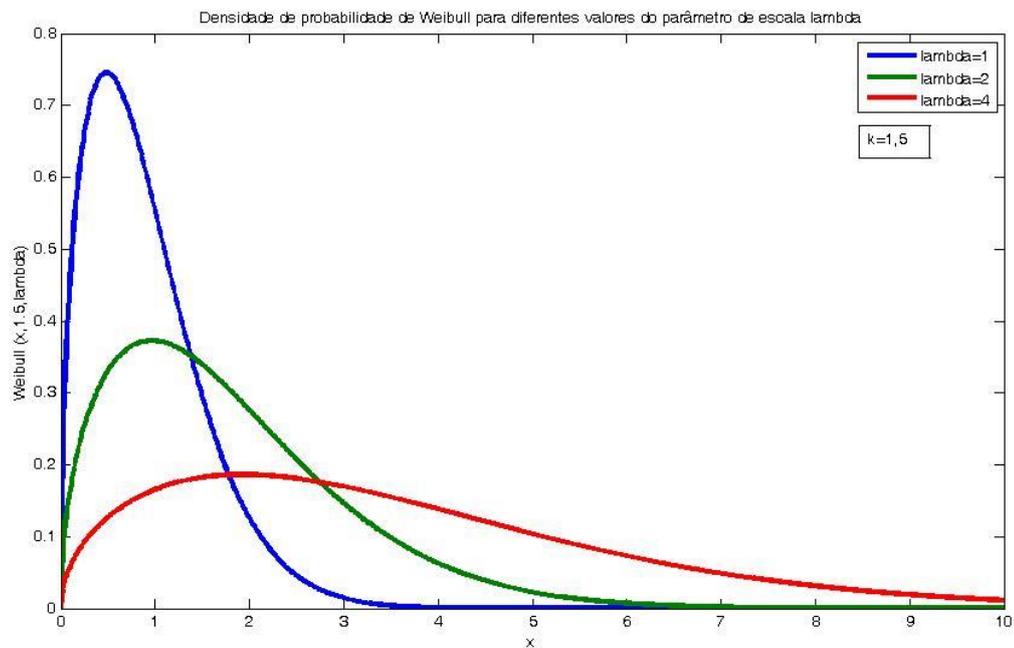
Fonte: CEPEL (2013).

4.8.1 Curva de Weibull

É uma distribuição de probabilidade contínua. Essa curva é usada para auxiliar no estudo do potencial de geração eólica, uma vez que o vento é influenciado por diversos fatores complexos e difíceis de mensurar. Sendo assim, essa curva simplifica em dois parâmetros

principais a estimação da frequência e intensidade com que os ventos ocorrem em uma determinada região. São estes parâmetros o K e o C que é descrito como “lambda” na Figura 16.

Figura 16 – Distribuição de probabilidade de Weibull



Fonte: WIKIPEDIA (2019).

4.8.2 Turbinas eólicas

As turbinas são responsáveis por converter a energia mecânica proveniente dos ventos em energia elétrica. Sendo divididas em dois grupos principais.

4.8.2.1 Eixo Vertical

São turbinas projetadas com os rotores no eixo vertical, têm a vantagem de não necessitarem de mecanismos externos para acompanharem a direção dos ventos.

Figura 17 – Turbina de eixo vertical

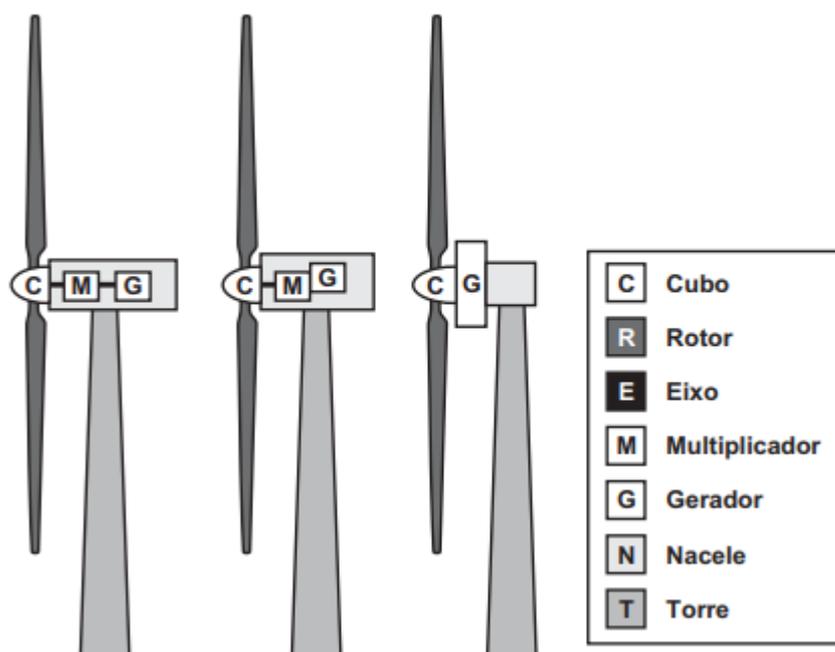


Fonte: OAK ENERGIA (2020).

4.8.2.2 Eixo Horizontal

São os tipos mais comuns de turbinas e possuem o eixo do rotor na horizontal, giram predominantemente pelo efeito de forças de sustentação e permitem liberar uma maior potência na geração de energia.

Figura 18 – Turbina de eixo horizontal



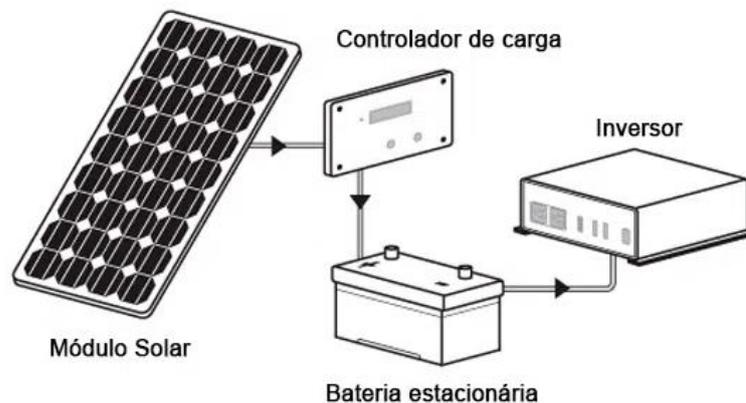
Fonte: CRESESB (2008).

4.9 Configurações da geração distribuída

Um sistema de geração distribuída pode ser construído de três formas distintas: *on-grid* (conectado a rede elétrica), *off-grid* (isolado da rede elétrica) e híbrido.

Na Figura 19 está destacado um sistema *off-grid* de geração eólica. Por ser um sistema que não está conectado a rede, toda a energia gerada é armazenada com o auxílio do controlador de carga. Após o controlador de carga tem-se o inversor para que a energia chegue à carga.

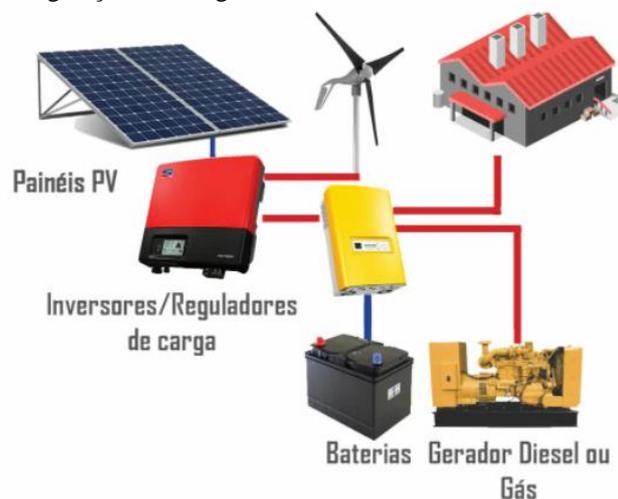
Figura 19 – Sistema off-grid de geração eólica



Fonte: SOLAR BRASIL (2022).

Já para o sistema híbrido, temos como principal característica a existência de mais fontes de geração de energia elétrica. Toda a energia gerada passa por uma unidade de controle de potência que disponibiliza essa energia diretamente a carga.

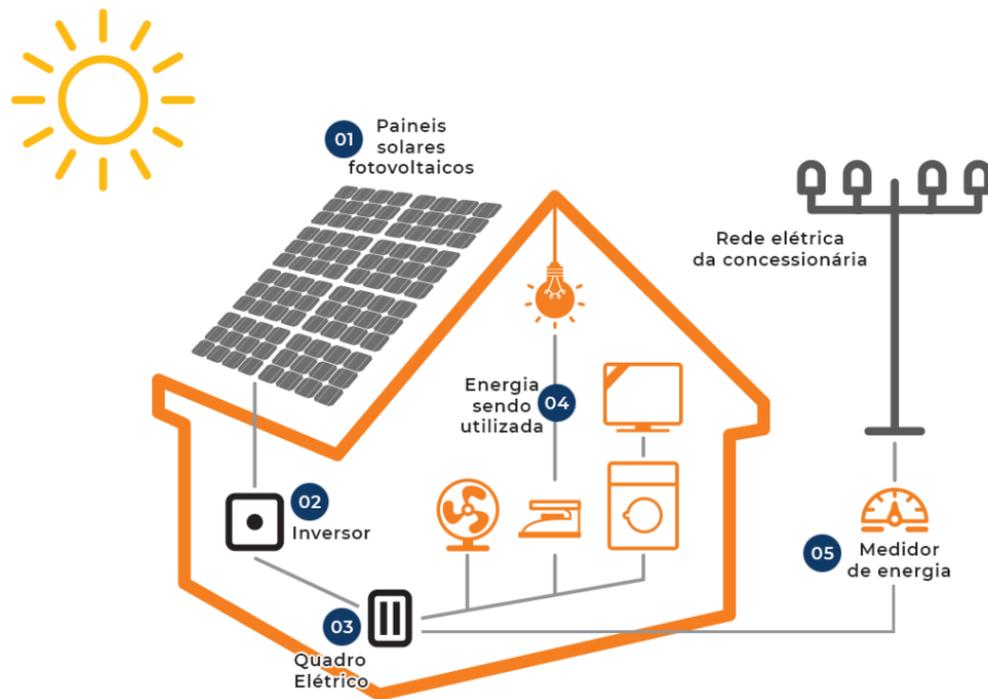
Figura 20 – Sistema híbrido de geração de energia



Fonte: SOLAR BRASIL (2022).

Por último temos o sistema mais usado que é o sistema de geração de energia conectado a rede, na qual a energia gerada é contabilizada por um medidor bidirecional de energia e na maioria das vezes descontado na conta de energia do consumidor responsável pela geração.

Figura 21 – Sistema on-grid de geração de energia



Fonte: DNA SOLAR BRASIL (2022).

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Dimensionamento da carga do data center

Após efetuar pesquisas, como parâmetro de projeto ficou definido uma unidade de processamento com dez servidores. A escolha da quantidade de servidores reflete na necessidade inicial de criar um pequeno data center funcional.

Os servidores do tipo 1U consomem um total de 1,5KW cada, sendo dez servidores teremos um total de 15KW para a carga de TI. Após uma pesquisa de mercado também foi possível anotar o preço correspondente a cada um desses servidores registrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros da carga crítica

Tipo	Consumo	Preço	Quantidade	Total
1U	1,5kW	R\$ 18.025,00	10	R\$ 180.250,00

Fonte: próprio autor.

5.1.1 Data center refrigerado a ar

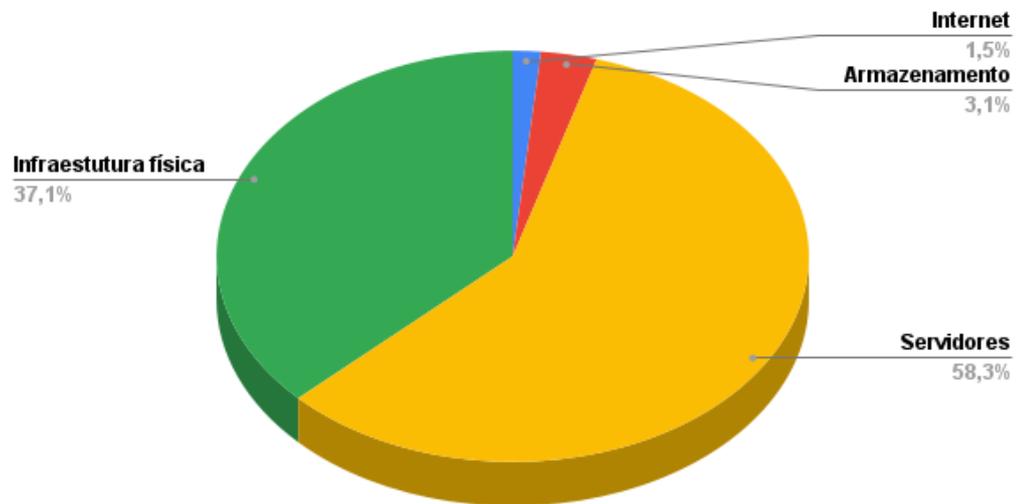
Para este tipo de aplicação, temos um PUE médio em torno de 1,8. Sendo assim podemos utilizar a equação (1) para determinar a potencia total do sistema.

$$1,8 = \frac{C_{Total}}{15kW}$$

$$C_{Total} = 27kW$$

De posse da potencia total do sistema, utilizamos o site da Schneider para estimar o gasto por setor que é representado na Figura 22.

Figura 22 – Consumo de energia por setor estimado do data center



Fonte: SCHNEIDER (2022).

Nota: Adaptado pelo autor

5.1.2 Data center refrigerado a líquido

Como solução para esta opção, iremos utilizar o Smartpod X da Submer que segundo o site da própria fabricante possui um PUE real igual a 1,03.

Figura 23 – Smartpod X



Fonte: Submer (2021).

As informações referentes ao submer Smartpod X estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros do Smartpod X

Smartpod X	Quantidade	PUE	Preço
1	1	1,03	R\$ 257.500,00

Fonte: próprio autor.

Utilizando a equação (1) podemos chegar aos valores reais do sistema.

Tabela 4 – Gasto de energia por setor usando o smartpod X

Carga de TI	Demais setores	Carga Total
15kW	0,45 kW	15,45 kW

Fonte: próprio autor.

Diante dessas duas opções, utilizando a solução do Smartpod X temos o menor consumo de potência. Assim, utilizando novamente a equação (1) temos o valor em kW e podemos então estimar a carga em valores de kWh nos seguintes períodos descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Carga total em kWh

Carga diária	Carga mensal	Carga anual
370,8 kWh	11124 kWh	133488 kWh

Fonte: próprio autor.

5.2 Escolha do local

Levando em conta vários fatores, decidiu-se escolher uma área próxima ao CPID para a alocação do projeto. Esta escolha tem a ver com a finalidade do laboratório, estimulando pesquisas que visam estimar o nível de capacidade de geração de energia no estado do Espírito Santo. O CPID é localizado em Campo Grande, Cariacica, Espírito Santo.

Como informações complementares sobre o CPID, temos que é alimentado por uma tensão de 11,4 kV, pertence ao subgrupo A4 e possui demanda contratada de 414kW.

5.3 Dimensionamento do sistema solar

5.3.1 Levantamento de dados

Para prosseguir com o dimensionamento do sistema de geração solar precisamos obter os dados referentes à localidade escolhida. Os dados foram obtidos através do site da CRESESB, sendo considerado para fins de cálculo o menor valor de irradiância no plano inclinado de 20° como sendo 4,42 kWh/m²/dia.

Tabela 6 – Irradiância mensal

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
5,50	6,06	5,35	4,93	4,53	4,42	4,42	4,87	4,96	4,68	4,5	5,16

Fonte: CRESESB (2022).

Através de pesquisas de mercado foram escolhidos painéis fotovoltaicos na faixa de potência de 500W das principais marcas utilizadas e registrados seus modelos e preços na tabela.

Tabela 7 – Painéis fotovoltaicos

Marca	Jinko Solar	Risen solar	Canadian
Modelo	JKM540 – 72HL4 - V	RSM150 – 8 – 500M	CS7L 585MB AG
Tipo	Monocristalino	Monocristalino	Monocristalino
Potência (Wp)	540	500	585
Eficiência (%)	20,94	20,4	20,6
Área do painel (m²)	2,5787	2,42	2,83
Preço unitário (R\$)	1.879,00	1.569,00	1.607,97

Fonte: próprio autor.

5.3.2 Cálculo da geração de energia

Utilizando os valores já obtidos, podemos utilizar a equação (3) para estimar a geração de energia de cada painel. Já com os dados da carga e os demais dados, conseguimos através da equação (4) saber o numero de painéis necessários para cada situação escolhida.

$$E_p = IR \times A \times \eta \quad (3)$$

$$N = \frac{C_d}{E_p} \quad (4)$$

Tabela 8 – Geração estimada por painel

Marca	Jinko Solar	Risen solar	Canadian
Modelo	JKM540 – 72HL4 - V	RSM150 – 8 – 500M	CS7L 585MB AG
Energia gerada (kWh/painel/dia)	2,3867	2,1821	2,5769
N° de painéis calculados	155,3593	169,9307	143,8951
N° de painéis utilizados	155	170	144
Custo (R\$)	291.245,00	266.730,00	231.547,68

Fonte: próprio autor.

Usando a Tabela 8, vemos que os painéis da *Canadian* resultam em um menor custo entre todas as opções e, portanto, serão adotados para a continuidade do projeto. Como os painéis são testados em temperaturas diferentes das presentes no local escolhido, o valor de potência foi corrigido utilizando a equação (5).

$$F_c = \gamma \times (T_{NOCT} - T_{STC}) \quad (5)$$

Tabela 9 – Parâmetros elétricos do painel corrigidos pela temperatura.

Grandeza	Valor nominal	Coefficiente de temperatura (%/°C)	Fator de correção (%)	Valor corrigido
Pmax	585 W	-0,34	-5,1	555,165 W
Voc	40,7 V	-0,26	-3,9	39,1127 V
Isc	18,32 A	-0,05	-0,75	18,1826 A

Fonte: próprio autor.

5.3.3 Dimensionamento do inversor

Seguindo, para o inversor, foi realizada uma pesquisa de mercado para determinar possíveis opções e seus determinados preços. O resultado é destacado na Tabela 10.

Tabela 10 – Inversores

Marca	Goodwe	Growatt	Sungrow
Modelo	GW73KLV-HT	MAX75KTL3-LV	SG75CX
Pin (W)	73000	75000	75000
V máx (Vcc)	800	1100	1000
V mín (Vcc)	200	200	200
V mín MPPT (Vcc)	180	195	200
P out (W)	73000	75000	75000
P máx (W)	112500	112500	75000
I máx (A)	30	25	26
V (Vca)	187-242	220-380	320-460
Eficiência (%)	98,4	98,8	98,70
Preço (R\$)	28.172,19	34.519,00	33.211,99

Fonte: próprio autor.

Para verificar se os inversores propostos atendem ao sistema, serão efetuados os cálculos e análises da faixa de operação, níveis de tensão e corrente dos inversores.

5.3.3.1 Tensão de entrada

Para obter a tensão na entrada do inversor basta somar as tensões nos módulos em séries ligadas ao mesmo. Utilizando a equação (5) para corrigir a tensão dos painéis e com o dado fornecido pelo fabricante da tensão máxima de entrada no inversor é possível determinar, através da equação (6), o número máximo de painéis que podem ser ligados em série junto do inversor.

$$N_{ms} \times V_{OC,Tmin} = V_{I\ máx} \quad (6)$$

5.3.3.2 Faixa de operação do MPPT

Utilizando a faixa MPPT de operação do inversor é possível determinar o número mínimo e máximo de painéis conectados em série com o inversor. Para calcular essa faixa de operação iremos utilizar a equação (7).

$$\frac{V_{MPPT,min}}{V_{m,T\ máx}} < N_{ms} < \frac{V_{MPPT,max}}{V_{m,T\ mín}} \quad (7)$$

5.3.3.3 Corrente máxima do inversor

A corrente é uma das variáveis principais no dimensionamento do inversor, portanto a corrente de entrada no inversor não deve ser maior que a suportada pelo mesmo. Para calcular a corrente máxima suportada pelo inversor utilizamos a equação (8) e para determinar a quantidade de painéis suportados ligados em paralelo usamos a equação (9).

$$I_{I\ max} = \frac{P_{max}}{V_{min}} \quad (8)$$

$$N_p = \frac{I_{I\ max}}{I_{sc}} \quad (9)$$

5.3.3.4 Fator de dimensionamento do inversor (FDI)

Por último calculamos o FDI do inversor utilizando a equação (10). O fator de dimensionamento é utilizado para verificar em que nível de potencia frente à potência nominal o inversor esta atuando.

$$FDI = \frac{P_{n\ CA}}{P_{FV}} \quad (10)$$

5.3.3.5 Determinando a quantidade de inversores

Os resultados dos cálculos realizados nas sessões anteriores estão registrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros calculados do inversor

Marca	Goodwe	Growatt	Sungrow
Modelo	GW73KLV-HT	MAX75KTL3-LV	SG75CX
*Nsmáx	20,7285	28,5017	25,9106
**Nsmín	5,4623	5,9174	6,0692
**Nsmáx	19,9844	30,7453	30,7453
***Npmáx	34,1157	20,9943	20,4694
Ns	19	28	25
Np	34	20	20
FDI	0,9131	0,9381	0,9381
N° de inversores	1	1	1
Custo total (R\$)	28.172,19	34.519,00	33.211,99

Fonte: próprio autor.

*foi calculado utilizando a equação (6)

**foi calculado utilizando a equação (7)

***foi calculado utilizando a equação (9)

5.3.4 Dimensionamento de cabos e demais acessórios

5.3.4.1 Kit de fixação

O projeto é alocar no térreo todos os painéis. O suporte escolhido é o padrão de alumínio com inclinação, sendo registradas na Tabela 12 as demais informações.

Tabela 12 – kit de fixação

	Quantidade	Preço (R\$)	Custo total (R\$)
Estrutura de solo modular - 2 linha	6	342,39	2054,34
Estrutura de solo modular - 1 linha	2	228,22	456,44

Fonte: próprio autor.

5.3.4.2 Dimensionamento dos cabos

A fim de dimensionar os cabos utilizaremos o critério de corrente proposto na NBR5410. Nessa instalação em questão, teremos um total de dezoito painéis ligados em serie em oito entradas MPPT do inversor escolhido.

Para instalação que liga os painéis ao inversor teremos eletrodutos aparentes, logo será classificado como B1 na norma. A corrente no circuito em questão será a corrente corrigida pela temperatura que para o painel escolhido que é de 18,1826 A. O fator de correção de temperatura será de 0,94 e o fator de correção de agrupamento será 0,8. Esses valores foram obtidos utilizando a tabela 42 da NBR 5410:2008 (ABNT,2008).

$$I' = \frac{I}{K1 \times K2} \quad (11)$$

Com posse dos dados, utilizando a equação (11) chegamos a uma corrente corrigida de 24,179 A. Observando os valores presentes na Tabela 36 da NBR 5410, optou-se pela sessão de 6mm² para o fio.

Para o lado de corrente alternada, a ligação entre o inversor até o medidor bidirecional temos uma corrente total de 145,46 A. O fator de agrupamento é 0,7 e o fator de temperatura será de 1,06. Conforme a equação (11), chegou-se a uma corrente corrigida de 196,0388 A que na Tabela 36 da NBR 5410 resulta em um cabo de 95mm². Na Tabela 13 mostra o resultado do dimensionamento dos cabos.

Tabela 13 – Dimensionamento dos cabos

	Quantidade (m)	Preço (R\$)	Custo total (R\$)
Cabo solar flex 6mm ²	200	8,39	1.678,00
Cabo elétrico 95mm ²	30	93,8	2.814,00
Conectores	40	8,43	337,20

Fonte: próprio autor.

5.3.5 Dimensionamento da proteção do sistema

Para garantir a proteção contra possíveis sobrecargas e descargas elétricas será dimensionado um sistema de proteção elétrica. Na Tabela 14 esta disposta às respectivas correntes elétricas nos trechos do circuito.

Tabela 14 – Circuito

Circuito	Corrente (A)	Corrente suportada pelo fio (A)
Painel – Inversor (CC)	18,1826	41
Inversor – Medidor (CA)	145,4608	207

Fonte: próprio autor.

Sabendo que o disjuntor deverá suportar uma corrente que seja maior que a corrente nominal do circuito e menor que a suportada pelo fio. No trecho entre o painel e o inversor será utilizado um disjuntor de 20 A e no outro trecho um disjuntor de 150 A.

No trecho entre o inversor e o medidor foi alocado um DPS para garantir a proteção do inversor na parte de corrente alternada. Segundo a NBR 5410 o DPS deve ter uma tensão de operação 10% maior que a do circuito que será inserido, para atender a essa norma o dispositivo escolhido foi o DPS Clamper 014472.

Tabela 15 – Dimensionamento da proteção

	Quantidade (m)	Preço (R\$)	Custo total (R\$)
Disjuntor Weg 20 A	8	43,85	350,80
Disjuntor Weg 150 A	1	503,94	503,94
DPS Clamper 40KA	1	149,81	149,81

Fonte: próprio autor.

5.3.6 Demais custos

Como tentativa de mensurar os custos de engenharia foram feitos orçamentos com empresas locais e anotados na Tabela 16.

Tabela 16 – Custos do Serviço de Integração

Item	Preço (R\$/Wp)	Custo total (R\$)
Custos de Engenharia e Integração	0,82	59.860,00

Fonte: GREENER (2022).

*Foi considerado o Wp nominal do inversor neste cálculo

Estão inclusos custos como:

- Alvarás de regularização da obra;
- Mão de obra técnica para a instalação da usina solar;
- Projetos técnicos de engenharia;
- Fretes dos produtos;
- Laudos técnicos.

Por fim temos o custo com a terraplanagem já que a usina solar será instalado no solo. Portanto foi realizado um novo orçamento para estimar esse custo.

Tabela 17 – Terraplanagem

Referência	Serviço	Unidade	Qtd.	Preço (unit.) (R\$)	Total (R\$)
DER 40184	Escavação, carga e transporte de material de 1ª cat. 1000 a 1200 m com moto-escavo transportador	m³	499,20	30,06	15.005,95
DER 40754	Regularização e compactação do sub-leito (100% P.I.) H = 0,20 m	m²	1040,00	1,50	1.560,00
DER 43327	Sub-base de brita graduada, inclusive fornecimento, exclusive transporte da brita	m³	208,00	112,86	23.474,88
DER 42483	Base de brita graduada, inclusive fornecimento, exclusive transporte da brita em Vias Urbanas	m³	208,00	120,01	24.962,08
DER 41360	CAP-50/70, fornecimento	t	9,38	4.080,09	38.291,48
DER 42484	Imprimação inclusive fornecimento e transporte comercial do material betuminoso em Vias Urbanas	m²	1040	10,35	10.764,00
DER 41112	"CBUQ (camada pronta Faixa ""B"" para revestimento) exclusive fornecimento do CAP e transp. de todos os materiais	t	99,84	129,60	12.939,26
DER 42485	Pintura de ligação inclusive fornecimento e transporte comercial do material betuminoso em Vias	m²	1040,00	3,28	3.411,20
DER 40878	CBUQ (camada pronta-faixa"C") exclusive fornecimento do CAP e transporte de todos os materiais	t	99,84	135,33	13.511,35
TOTAL					143.920,20

Fonte: YASCHI (2022).

5.3.7 Orçamento final do projeto fotovoltaico

Foi registrado na Tabela 18 o orçamento final de todo o projeto de geração solar.

Tabela 18 – Orçamento final fotovoltaico

Item	Quantidade	Preço (R\$)	Custo total (R\$)
Painel solar Canadian	144	1607,97	231.547,68
Inversor Goodwe	1	28.172,19	28.172,19
Estrutura de solo modular - 2 linha	6	342,39	2054,34
Estrutura de solo modular - 1 linha	2	228,22	456,44
Cabo solar flex 6mm ²	200m	8,39	1.678,00
Cabo elétrico 95mm ²	30m	93,8	2.814,00
Conectores	40	8,43	337,20
Disjuntor Weg 20 A	8	43,85	350,80
Disjuntor Weg 150 A	1	503,94	503,94
DPS Clamper 40KA	1	149,81	149,81
Terraplanagem	1	143920,20	143920,20
Custos de Engenharia e Integração	-	-	59860,00
TOTAL	-	-	471.844,60

Fonte: próprio autor.

5.4 Sistema de geração Eólica

5.4.1 Levantamento de dados

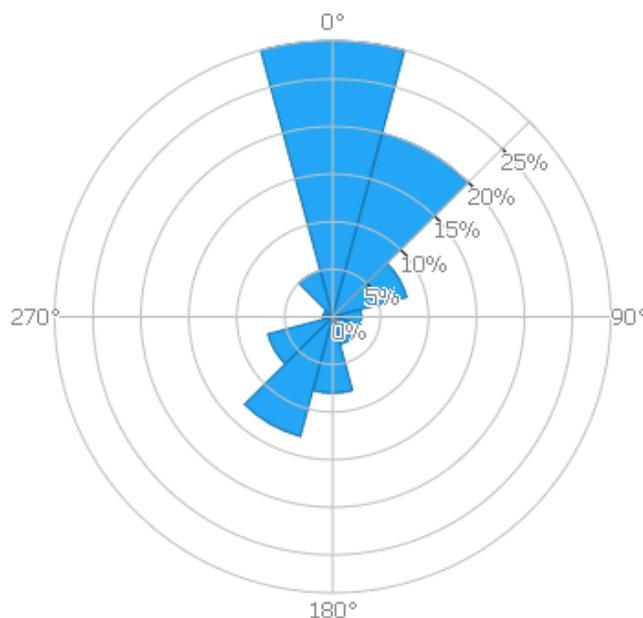
A primeira etapa foi buscar dados sobre as características dos ventos na região escolhida, para isso foram anotados os valores em diferentes alturas para a velocidade média dos ventos e os respectivos fatores da curva de Weibull. Os dados referentes aos ventos no local abordado foram obtidos por meio do programa *Windnavigator* da empresa AWS TRUE POWER. Destaca-se também a rosa dos ventos da região, indicando os possíveis sentidos do vento retirado do WIND ATLAS.

Tabela 19 – Dados para a estimação da geração eólica

Altura (m)	Velocidade média do vento (m/s)	Fator C	Fator K
20	4,65	5,23	2,459
30	5,09	5,73	2,459
40	5,43	6,11	2,523
50	5,71	6,43	2,588

Fonte: AWS TRUE POWER (2022).

Figura 24 – Rosa dos ventos



Fonte: WIND ATLAS (2022).

Novamente realizando uma pesquisa de mercado foi possível chegar a três possíveis turbinas com faixas de potências diferentes para compor o dimensionamento.

Tabela 20 – Turbinas eólicas

Marca	Jiangsu	Jiangsu	Jsx power
Modelo	NE – 20KW	NE – 30KW	XTL – 50K
Tipo	Eixo Horizontal	Eixo Horizontal	Eixo Horizontal
Potência (W)	20000	30000	50000
Diâmetro (m)	155	170	144
Preço (R\$)	57.694,00	84.983,60	286.119,60

Fonte: próprio autor.

Para prosseguir, foi necessário definir a frequência que o vento ocorre utilizando a equação (12) vinda da definição de Weibull. Os respectivos cálculos foram registrados na Tabela 21.

$$f(v) = \frac{k}{c} \times \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \times \exp\left\{-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right\} \quad (12)$$

Tabela 21 – Dados de frequência dos ventos

Altura (m)	Freq. dos Ventos
20	0,1873
30	0,1710
40	0,1642
50	0,1598

Fonte: próprio autor.

5.4.2 Estimando a geração de energia

Utilizando a equação (13) é possível definir o valor da potência em Watts gerado por cada turbina em questão. Note que é proporcional a velocidade média dos ventos, sendo assim cada altura terá a sua respectiva potência. Na Figura 25 temos os resultados de geração unitária por turbina em relação à altura, podemos observar a diferença que a velocidade causa no valor da potência.

$$P_W = \frac{1}{2} \times \rho \times \eta \times A \times V^3 \quad (13)$$

Figura 25 – Geração de energia por turbina variando a altura



Fonte: Próprio autor (2022).

De posse do valor em Watts da potência e da frequência, basta multiplicarmos por um período de tempo para obtermos o valor final em kWh. Neste caso, usaremos a equação (14) para determinar a geração de potência em kWh anual.

$$P_{kWh} = \frac{f(v) \times P_W \times 8760}{1000} \quad (14)$$

Após o cálculo da potência podemos prosseguir utilizando a equação (15) para prever o número de turbinas que deverão ser utilizadas para suprir a carga. Os resultados estão despostos nas Tabelas 22 a 25.

$$N_{turbina} = \frac{C_{anual}}{P_{kWh}} \quad (15)$$

Tabela 22 – Geração eólica para altura igual a 20m

Modelo	NE – 20KW	NE – 30KW	XTL – 50K
Nº de Turbinas	39	27	15
Preço (R\$)	2.250.066,00	2.294.557,20	4.291.794,00

Fonte: próprio autor.

Tabela 23 – Geração eólica para altura igual a 30m

Modelo	NE – 20KW	NE – 30KW	XTL – 50K
Nº de Turbinas	32	23	12
Preço (R\$)	1.846.208,00	1.954.622,80	3.433.435,20

Fonte: próprio autor.

Tabela 24 – Geração eólica para altura igual a 40m

Modelo	NE – 20KW	NE – 30KW	XTL – 50K
Nº de Turbinas	28	19	11
Preço (R\$)	1.615.432,00	1.614.688,40	3.147.315,60

Fonte: próprio autor.

Tabela 25 – Geração eólica para altura igual a 50m

Modelo	NE – 20KW	NE – 30KW	XTL – 50K
Nº de Turbinas	25	17	9
Preço (R\$)	1.442.350,00	1.444.721,20	2.575.076,40

Fonte: próprio autor.

5.5 Análise do potencial de geração de energia

Para traçar uma linha de comparação entre o potencial de geração eólica e solar da região escolhida foi registrado na Tabela 26 a geração unitária de cada painel e turbina por um dia em kWh.

Tabela 26 – Geração eólica e solar diária

	NE – 20KW	NE – 30KW	XTL – 50K	Jinko Solar	Risen Solar	Canadian
Geração kWh/dia	14,8756*	21,4209*	38,9404*	2,3867	2,1820	2,5768

Fonte: próprio autor.

*Os valores de geração em kWh das turbinas são para a altura de 50m

De posse dos valores estimados na Tabela 26, foi possível comparar a quantidade de painéis necessários para gerar a mesma quantidade de energia fornecida por cada turbina. Os resultados se encontram nas Tabelas 27 a 29.

Tabela 27 – Geração eólica turbina NE-20K e solar

	NE – 20KW	Jinko	Risen	Canadian
Quantidade	1	7	7	6
Preço (R\$)	57.694,00	1.879,00	1.569,00	1.607,97
Custo Total (R\$)	57.694,00	13.153,00	10.983,00	9.647,82

Fonte: próprio autor.

*Os valores de geração em kWh das turbinas são para a altura de 50m

Tabela 28 – Geração eólica turbina NE-30K e solar

	NE – 30KW	Jinko	Risen	Canadian
Quantidade	1	9	10	9
Preço (R\$)	84.983,60	1.879,00	1.569,00	1.607,97
Custo Total (R\$)	84.983,60	16.911,00	15.690,00	14.471,73

Fonte: próprio autor.

*Os valores de geração em kWh das turbinas são para a altura de 50m

Tabela 29 – Geração eólica turbina xtl-50 e solar

	XTL – 50K	Jinko	Risen	Canadian
Quantidade	1	17	18	16
Preço (R\$)	286.119,60	1.879,00	1.569,00	1.607,97
Custo Total (R\$)	286.119,60	31.943,00	28.242,00	25.727,52

Fonte: próprio autor.

*Os valores de geração em kWh das turbinas são para a altura de 50m

Pode-se observar pela Tabela 26 que existe sim um potencial de geração de energia no local escolhido para as duas fontes de geração proposta. No entanto pode-se notar que em todas as possíveis comparações estabelecidas a energia solar sempre representa o menor custo.

5.6 Eficiência energética do sistema

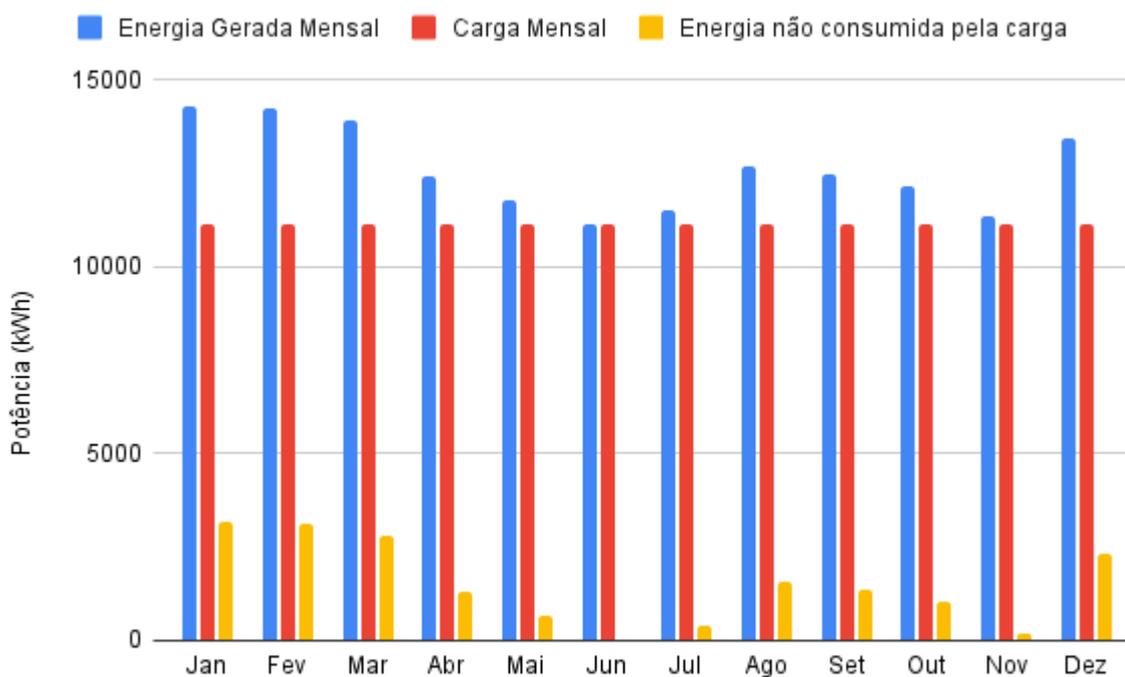
Para avaliar o sistema como um todo, foi feito o cálculo da geração de energia solar mensal durante todo o ano. Os valores calculados foram registrados na Tabela 30 junto ao valor de potência consumida pela carga. A fim de representar melhor, os dados da tabela foram utilizados também para a elaboração do gráfico presente na Figura 26.

Tabela 30 – Panorama energético do sistema

Mês	Energia gerada (kWh)	Carga Mensal (kWh)	Energia não consumida (kWh)
Jan	14313,32	11124	3189,32
Fev	14244,48	11124	3120,48
Mar	13922,96	11124	2798,96
Abr	12416,07	11124	1292,07
Mai	11788,97	11124	664,97
Jun	11131,65	11124	7,65
Jul	11502,71	11124	378,71
Ago	12673,79	11124	1549,79
Set	12491,63	11124	1367,63
Out	12179,34	11124	1055,34
Nov	11333,13	11124	209,13
Dez	13428,5	11124	2304,5

Fonte: próprio autor.

Figura 26 – Panorama energético do sistema



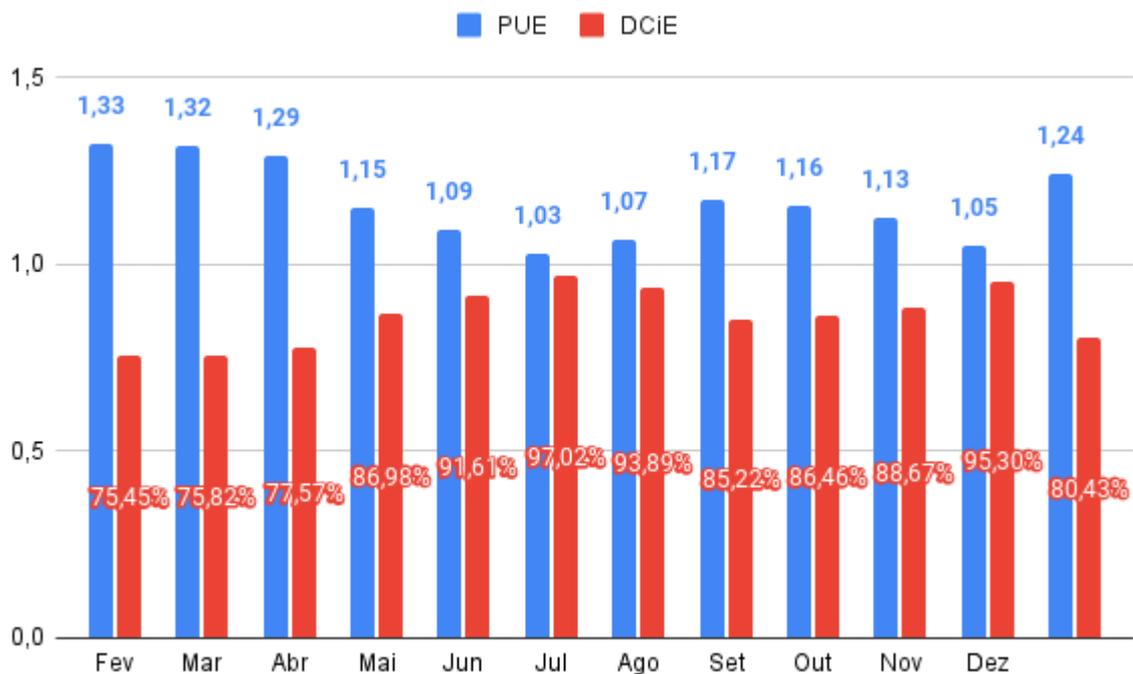
Fonte: Próprio autor (2022).

O panorama energético do sistema, a princípio, é totalmente favorável à autossuficiência da carga em termos de energia. Porém como fatores climáticos influenciam diretamente no valor de irradiância e na geração de energia dos painéis solares, optou-se pela ligação *on-grid* do sistema para que não aconteça da carga ser desligada.

Todos os meses a energia gerada foi o suficiente para alimentar a carga integralmente, apresentando por vezes energia gerada não consumida que como regulamenta a ANEEL pode ser utilizada como crédito segundo apresentado na resolução normativa 482.

De posse dos dados da Tabela 30, foi possível calcular as medidas de eficiência energética do data center em relação a geração de energia mensal. Foram utilizados as equações (1) e (2) para obter os dados expostos na Figura 27.

Figura 27 – PUE e DCiE em relação a energia gerada pelo sistema solar



Fonte: Próprio autor (2022).

Nota-se através dos resultados presentes na Figura 27 que o PUE de projeto, 1,03, é alcançado no mês de julho. Isso demonstra que este mês praticamente toda a energia gerada é utilizada para a alimentação integral da carga, levando o sistema a um DCiE próximo de 100%.

Nos outros meses o valor de PUE oscila assumindo valores maiores, porém mesmo o maior valor de PUE encontrado é menor se comparado a um valor médio de 1,8. Isso demonstra que o sistema projetado cumpriu os requisitos de eficiência energética expostos.

5.7 Orçamento Final

Após todas as análises propostas, chegou-se ao orçamento final do projeto que está descrito na Tabela 31. O intuito deste orçamento é estimar o gasto total de implementação de todas as etapas deste trabalho, o que inclui os servidores, o data center *in a box* e o sistema de geração de energia fotovoltaico.

Tabela 31 – Orçamento final

Item	Quantidade	Preço (R\$)	Custo Total (R\$)
Servidores	10	18025,00	180250,00
Smartpod X	1	257500,00	257500,00
Painel solar Canadian	144	1607,97	231547,68
Inversor Goodwe	1	28172,19	28172,19
Estrutura de solo modular - 2 linha	6	342,39	2054,34
Estrutura de solo modular - 1 linha	2	228,22	456,44
Cabo solar flex 6mm ²	200m	8,39	1678,00
Cabo elétrico 95mm ²	30m	93,8	2814,00
Conectores	40	8,43	337,20
Disjuntor Weg 20 A	8	43,85	350,80
Disjuntor Weg 150 A	1	503,94	503,94
DPS Clamper 40KA	1	149,81	149,81
Terraplanagem	1	143920,20	143920,20
Custos de Engenharia e Integração	-	-	59860,00
Frete	-	-	13132,50*
TOTAL			922.727,10

Fonte: próprio autor.

*o frete foi estimado como sendo 3% do custo total dos servidores e do Smartpod X.

6 CONCLUSÃO

Em um contexto mundial que busca tornar cada vez mais a energia renovável como prioridade na matriz de geração elétrica mundial, as fontes de energia solar e eólica tem se destacado. Sendo utilizadas e tornando-se uma grande solução a pequena escala com a geração distribuída e a larga escala com grandes parques de geração.

Paralelamente a este cenário sobre novas fontes de energia, surge também o aumento da demanda da mesma por parte das aplicações e infraestruturas de tecnologia em geral. Aumento do número de aparelhos conectados a internet, data centers, torres de transmissão e entre outros.

A alternativa proposta é criar pequenas centrais de processamento de dados utilizando a refrigeração a líquido. Adotando essa tecnologia através do *Submer Smartpod X* foi possível reduzir quase que pela metade o consumo total de potência da carga, quando comparado com a solução de refrigeração a ar.

O grande potencial de geração de energia elétrica utilizando fontes renováveis no território brasileiro, neste trabalho caracterizado pela região do Espírito Santo, aliado a solução apresentada para a carga torna possível à autossuficiência energética da mesma.

De posse de todos os dados referentes à carga e do potencial de geração de energia, foi dimensionado sistemas de geração solar e eólica. Sendo testados diferentes cenários, painéis solares, turbinas e alturas de geração a fim de levantar a opção mais economicamente viável.

Analisando os resultados, nota-se que neste trabalho a fonte de energia solar tem um custo muito menor se comparado à eólica. Na aplicação proposta, todo o sistema de geração solar é cerca de três vezes mais barato que somente a turbina eólica que obteve o melhor custo. Todos estes fatores levaram a escolha final do painel solar da empresa *Canadian* para o orçamento final que é o objetivo deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14565**: Cabeamento estruturado para edifícios comerciais e data centers – Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 16665**: Cabeamento estruturado para data centers – Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2008.

BEZERRA, Francisco Diniz. Energia solar: caderno setorial ETENE. 2021. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/370>. Acesso em: 03 jul. 2021.

FACCIONI FILHO, Mauro. Conceitos e Infraestrutura de datacenters: livro digital. Palhoça: Unisul Virtual, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319913948_Conceitos_e_infraestrutura_de_datacenters Acesso em: 03 jul. 2021.

LUCIANO LOSEKANN, AMANDA TAVARES. Transição energética e potencial de cooperação nos brics em energias renováveis e gás natural. IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. 2021. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=38329&Itemid=457. Acesso em: 03 jul. 2021.

MARIN, P.S. Data Centers – Engenharia: Infraestrutura Física. São Paulo: PM Books, 2016.

ROSS STEVENS, NIC CARTER. Report: bitcoin net zero. Nydig. 2021. Disponível em: <https://nydig.com/bitcoin-net-zero/>. Acesso em: 03 jul. 2021.

SHEHABI, A., SMITH, S., SARTOR, D., BROWN, R., HERRLIN, M., KOOMEY, J., ET AL. United States Data Center Energy Usage Report: Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL Report #: LBNL-1005775. 2016. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/84p772fc> Acesso em: 03 jul. 2021.

SUBMER. MicroPod the smartest solution for edge and cloud computing. 2021. Disponível em: <https://submer.com/micropod/>. Acesso em: 03 jul. 2021.

_____. SmartPod: immersion cooling made practical. 2021. Disponível em: <https://submer.com/smartpod/>. Acesso em: 03 jul. 2021.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>

GREENER. Estudo Estratégico sobre Geração Distribuída e o mercado Fotovoltaico em 2021. 2022. Disponível em: <https://www.greener.com.br/sumario-executivo-estudo-de-geracao-distirbuida-2o-sem-2021/>

CRESESB, CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA
SÉRGIO DE SALVO BRITO. Módulos fotovoltaicos. 2008. Disponível em:
http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=331

_____. Componentes de um Sistema Fotovoltaico. 2008. Disponível em:
http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=341

E. DURAN, J. GALAN, M. SIDRACH-DE CARDONA, AND J. ANDUJAR, “A New Application of the Buck-Boost-Derived Converters to Obtain the I-V Curve of Photovoltaic Modules,” in 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol. 36, pp. 413–417, IEEE, 2007

CANADIAN SOLAR, Datasheet CS7L-585MB-AG. Disponível em:
https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/2020/10/23164015/CS-Datasheet-BiHiKu7_CS7L-MB-AG_v1.7_EN.pdf

CEPEL, Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2013. Disponível em:
http://novoatlas.cepel.br/wpcontent/uploads/2017/03/NovoAtlasdoPotencialEolico_BrasileiroSIM_2013.pdf

WIKIPEDIA, Distribuição de Weibull, 2019. Disponível em:
https://pt.wikipedia.org/wiki/Distribui%C3%A7%C3%A3o_de_Weibull

OAK ENERGIA, Turbinas Eólicas ou Aerogeradores, 2020. Disponível em:
<https://oakenergia.com.br/blog/turbinas-eolicas/>

SCHNEIDER, Data Center Power Sizing Calculator, 2022. Disponível em:
<https://www.se.com/ww/en/work/solutions/system/s1/data-center-and-network-systems/trade-off-tools/data-center-power-sizing-calculator/>

WIND ATLAS, Global Wind Atlas, 2022. Disponível em: <https://globalwindatlas.info/>

AWS TRUE POWER, Windnavigator, 2022. Disponível em:
<https://dashboards.awstruepower.com/>

SOLAR BRASIL, O que é energia solar fotovoltaica, 2022. Disponível em:
<https://www.solarbrasil.com.br/energia-solar/>

DNA SOLAR BRASIL, Energia solar, 2022. Disponível em:
<https://dnasolarbrasil.com.br/energia-solar/>

YASCHI, Eng. Civil Rodrigo Yaschi, orçamento elaborado segundo parâmetros do DER-ES, 2022. Disponível em:
[https://der.es.gov.br/Media/der/Documentos/Tabela%20Referencial%20de%20Pre%C3%A7o/Referencial%20de%20Rodovias/2021/COMPOSI%C3%87%C3%95ES%20-%20SEM%20DESONERA%C3%87%C3%83O%20\(JUNHO-21\).pdf](https://der.es.gov.br/Media/der/Documentos/Tabela%20Referencial%20de%20Pre%C3%A7o/Referencial%20de%20Rodovias/2021/COMPOSI%C3%87%C3%95ES%20-%20SEM%20DESONERA%C3%87%C3%83O%20(JUNHO-21).pdf)