

THIAGO MATHEUS MARTINS DE MORAES

**Estudo dos conceitos de eficiência energética associado à geração distribuída
fotovoltaica**

Thiago Matheus Martins de Moraes

**Estudo dos conceitos de eficiência energética associado à geração distribuída
fotovoltaica**

Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. Rubens Alves Dias
Coorientador: Dr. José Feliciano Adami

Guaratinguetá - SP
2021

M828e	Moraes, Thiago Matheus Martins de Estudo dos conceitos de eficiência energética associado à geração distribuída fotovoltaica / Thiago Matheus Martins de Moraes – Guaratinguetá, 2021. 100 f : il. Bibliografia: f. 86-92 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias Coorientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami 1. Sustentabilidade. 2. Geração de energia fotovoltaica. 3. Energia – Conservação. I. Título. CDU 620.92(043)
-------	--

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

THIAGO MATHEUS MARTINS DE MORAES

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr^a. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:



PROF. DR. RUBENS ALVES DIAS

Orientador / UNESP/FEG
participou por videoconferência



PROF. DR. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI

UNESP/FEG
participou por videoconferência



PROF. DR. CARLOS BARREIRA MARTINEZ

UNIFEI
participou por videoconferência

DADOS CURRICULARES

THIAGO MATHEUS MARTINS DE MORAES

NASCIMENTO	16.08.1994 – Campinas / SP
FILIAÇÃO	Alexandre Marcelo Martins de Moraes Ana Paula Dias de Moraes
2013/2018	Engenharia Elétrica Universidade Estadual Paulista - FEG

Dedico este trabalho, de modo especial, à
minha família, a todos os meus amigos e a
minha equipe de trabalho da iniciativa Ponto
Iluminado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço pela minha vida, minhas oportunidades, minha família e meus amigos;
aos meus orientadores, *Prof. Dr. Rubens Alves Dias e Prof. Dr. José Feliciano Adami* que jamais deixaram de me apoiar e ensinar;
aos meus pais *Alexandre Marcelo Martins de Moraes e Ana Paula Dias de Moraes*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos e lutaram para a realização destes, sempre me ensinando princípios e valores com amor e carinho;
as minhas avós *Ilda Gibim Dias da Silva e Maria Luiza Hyppolito de Moraes*, que sempre me auxiliaram em tudo que podiam;
aos meus avôs *Fernando Dias da Silva (In Memoriam)* e *David Francisco Martins de Moraes (In Memoriam)*, que se dedicaram para estruturar, em todos os sentidos, minha família e meu futuro;
aos meus familiares que, sempre que possível, me apoiaram, incentivaram e ajudaram;
a equipe da Iniciativa Ponto Iluminado e seus voluntários pela dedicação, presteza e, principalmente, pela vontade de ajudar e melhorar o mundo;
aos meus amigos que estiveram ao meu lado durante os bons e maus momentos desta caminhada rumo ao aprimoramento pessoal e intelectual;
aos professores, alunos e funcionários que, dentro de suas possibilidades individuais, saíram de suas zonas de conforto, uniram esforços e empenharam esforços para tornar possível o projeto FEG-Sustentável, provando a força da comunidade da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá quando engajada em uma causa;
aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - processo 88887.481021/ 2020-00.

“Ninguém nunca terá sucesso sem ajudar os outros.”

Jay Abraham

“O sucesso consiste em ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo.”

Winston Churchill

RESUMO

O Brasil possui um dos maiores sistemas de transmissão de energia elétrica do mundo, no qual cerca de 15% de toda a energia gerada no país é perdida, principalmente pelo fato dos grandes consumidores de energia estarem distantes dos centros geradores. Essas perdas podem ser reduzidas tanto pela adoção de medidas de eficiência energética, com a consequente redução da quantidade de energia transmitida, quanto por meio da implementação de sistemas de geração distribuída, especialmente o solar fotovoltaico. Com esta situação e tendo em vista os altos custos de manutenção e a necessidade de inovação na área de energia elétrica na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da UNESP, foi desenvolvido o projeto aqui descrito, como parte de uma iniciativa de sustentabilidade denominada Ponto Iluminado, com os objetivos de reduzir os gastos da unidade, diminuir as emissões de poluentes equivalentes da Faculdade, conscientizar a população a respeito dos conceitos de sustentabilidade e, finalmente, implementar um sistema fotovoltaico *on-grid* no campus universitário. A implementação deste foi precedida de uma ampla análise das cargas do campus para que ações de eficiência energética fossem aplicadas no sistema tornando-o eficiente pra receber uma central de geração fotovoltaica que supre parte da energia consumida por esse novo sistema modernizado. Assim, economizando mais de 400 mil reais entre janeiro de 2017 e junho de 2020 e reduzindo as emissões equivalentes de CO₂ do campus em mais de 70 toneladas no período. Ainda, as características únicas de projeto desse sistema com cunho didático permitiram a análise de perdas, seu comportamento em diferentes condições climáticas, o estudo sobre a sensibilidade dos equipamentos de medição do inversor e a comparação entre a geração real e a prevista utilizando os métodos de cálculos presentes na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade. Uso racional da energia. Eficiência energética. Geração fotovoltaica *on-grid*.

ABSTRACT

Brazil has one of the largest electricity transmission systems in the world, in which around 15% of all energy generated in the country is lost, mainly because the large energy consumers are far from the generating centres. These losses can be reduced both by adopting energy efficiency measures, with the consequent reduction in the amount of transmitted energy, and by implementing distributed generation systems, especially solar photovoltaic. With this situation and in view of the high maintenance costs and the need for innovation in the area of electricity at the School of Engineering of Guaratinguetá, UNESP, the project described here was developed, as part of a sustainability initiative called Ponto Iluminado, with the objectives of reducing the unit's expenses and its equivalent pollutant emissions, making the population aware of the concepts of sustainability and, finally, implementing an on-grid photovoltaic system on the university campus. The implementation of this was preceded by an extensive analysis of the loads on the campus so that energy efficiency actions were applied in the system, making it efficient to receive a photovoltaic generation plant that supplies part of the energy consumed by this new modernized system. Thus, saving more than 400 thousand reais between January 2017 and June 2020 and reducing the equivalent CO₂ emissions from the campus by more than 70 tons in the period. Furthermore, the unique design characteristics of this didactic system allowed the analysis of losses, their behaviour under different climatic conditions, the study of the sensitivity of the inverter measurement equipment and the comparison between actual and predicted generation using the methods of calculations present in the literature.

KEYWORDS: Sustainability. Rational use of energy. Energy efficiency. On-grid photovoltaic generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Adições de capacidade líquida fotovoltaica solar por país e região, 2015-2022.....	15
Figura 2	- Eletricidade no mundo.....	19
Figura 3	- Variação de consumo energético.....	20
Figura 4	- Produção de Energia Elétrica no Brasil.....	21
Figura 5	- Consumo de Energia Elétrica no Brasil.....	22
Figura 6	- Consumo residencial no Estado de São Paulo.....	22
Figura 7	- Geração de Energia Elétrica no Estado de São Paulo.....	23
Figura 8	- Geração e consumo por Estado brasileiro.....	24
Figura 9	- Aumento no consumo de energia elétrica.....	25
Figura 10	- Crescimento da geração distribuída em 2018.....	26
Figura 11	- Crescimento da geração solar em 2018.....	27
Figura 12	- Crescimento das fontes alternativas no mundo.....	28
Figura 13	- Consumo residencial versus a geração solar fotovoltaica.....	29
Figura 14	- Consumo comercial versus a geração solar fotovoltaica.....	30
Figura 15	- Atlas solarimétrico do Brasil.....	36
Figura 16	- Testes realizados com Voltímetros, Amperímetros e Wattímetros.....	43
Figura 17	- Testes realizados com Analisador de Qualidade de Energia.....	44
Figura 18	- Comparação de potência média pelo tempo dos sistemas de Vapor de Sódio e LED.....	52
Figura 19	- Gráficos de economia média por poste da partida ao regime permanente...	52
Figura 20	- Taxa de Distorção de Harmônicos de uma das lâmpadas LED.....	53
Figura 21	- Taxa de Distorção de Harmônicos de um dos sistemas Vapor de Sódio.....	53
Figura 22	- Estrutura de geração on-grid do projeto “FEG-Sustentável”.....	55
Figura 23	- Insolação média diária.....	56
Figura 24	- Projeto da área do Showroom de energias renováveis.....	56
Figura 25	- Estrutura para ampliação.....	57
Figura 26	- Gráfico de estimativa de geração da central on-grid sem perdas.....	58
Figura 27	- Estimativa de geração mensal com perdas.....	58
Figura 28	- Geração estimada com o sistema a plena capacidade e descontadas as perdas.....	59
Figura 29	- Curva de correção dos fusíveis WEG em relação a temperatura ambiente..	62

Figura 30	- Interior da central de geração.....	63
Figura 31	- Diagrama geral do sistema de geração.....	64
Figura 32	- Gráfico de correção e equação de regressão linear MPPT 1.....	70
Figura 33	- Gráfico de correção e equação de regressão linear MPPT 2.....	70
Figura 34	- Gráfico de erros de medição de corrente antes e depois da aplicação da equação de correção da entrada MPPT 1.....	71
Figura 35	- Gráfico de erros de medição de corrente antes e depois da aplicação da equação de correção da entrada MPPT 2.....	71
Figura 36	- Comparação entre a geração estimada e a geração real no ano de 2020.....	72
Figura 37	- Geração entre os períodos de outubro a março e abril a setembro com dados de 2020 e 2021.....	73
Figura 38	- Gráfico de potência semanal do sistema em março de 2021.....	75
Figura 39	- Gráfico da eficiência do inversor pela temperatura na faixa de 0 W a 500 W.....	75
Figura 40	- Gráfico da eficiência do inversor pela temperatura na faixa de 500 W a 1000 W.....	76
Figura 41	- Gráfico da eficiência do inversor pela temperatura na faixa de 3500 W a 4000 W.....	76
Figura 42	- Gráfico da eficiência do inversor pela temperatura na faixa de 4000 W a 4500 W.....	76
Figura 43	- Gráfico de consumo de energia da FEG – UNESP.....	78
Figura 44	- Gráfico do consumo médio mensal antes (2013 a 2016) e depois (2017 a 2020) do projeto.....	79
Figura 45	- Gráfico de comparação de consumo de 2015 e 2019.....	80
Figura 46	- Comparação dos sistemas de iluminação quanto a poluição luminosa.....	81
Figura 47	- Redução mensal de emissão de CO ₂ após o início do projeto.....	81
Figura 48	- Redução acumulada de emissão de CO ₂	82
Figura 49	- Bancada da Central de Sustentabilidade.....	83
Figura 50	- Estrutura de geração <i>off-grid</i> “Ponto Iluminado”.....	93
Figura 51	- Áreas de sombra sobre os eletrodutos enterrados.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Aumento nas perdas de transmissão (expansão hidráulica).....	24
Tabela 2	- Ângulo de inclinação dos módulos em relação a latitude.....	35
Tabela 3	- Levantamento de lâmpadas fluorescentes na FEG.....	47
Tabela 4	- Levantamento de lâmpadas LED, Incandescente e vapor de sódio na FEG.	47
Tabela 5	- Levantamento aparelhos de ar condicionado do tipo janela na FEG.....	47
Tabela 6	- Levantamento aparelhos de ar condicionado do tipo <i>split hi-wall</i> na FEG...	48
Tabela 7	- Levantamento aparelhos de ar condicionado dos tipos piso-teto e cassete...	48
Tabela 8	- Contribuição de cada carga no consumo.....	48
Tabela 9	- Potências dos sistemas (lâmpada, reator, capacitor e ignitor) com considerável grau de deterioração aferidas <i>in loco</i> (potência nominal da lâmpada igual a 250 W).....	49
Tabela 10	- Parâmetros dos sistemas numerados de 1 a 7 aferidas em laboratório.....	50
Tabela 11	- Parâmetros dos sistemas numerados de 8 a 13 aferidas em laboratório.....	50
Tabela 12	- Cabos dimensionados para os diferentes sistemas.....	60
Tabela 13	- Lista dos disjuntores de corrente alternada instalados.....	61
Tabela 14	- Correntes fornecidas pelo inversor e aferidas na entrada MPPT 1.....	66
Tabela 15	- Correntes fornecidas pelo inversor e aferidas na entrada MPPT 2.....	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.2.1	Objetivo geral.....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA....	19
2.1	PERSPECTIVA MUNDIAL DO SETOR ELÉTRICO.....	19
2.2	CENÁRIO ATUAL DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO.....	20
2.3	PERDAS NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO.....	23
2.4	CRESCIMENTO DA GERAÇÃO DISTRIBUIDA.....	25
2.4.1	Crescimento da Energia Solar.....	27
2.5	IMPACTO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESTADO DE SÃO PAULO.....	28
2.6	A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO CENÁRIO BRASILEIRO.....	30
2.7	IMPACTOS AMBIENTAIS DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.....	31
2.8	O TRIPÉ DA SUSTENTABILIDADE.....	33
3	ASPECTOS CONCEITUAIS.....	34
3.1	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO E ELEMENTOS OPERACIONAIS.....	34
3.1.1	Método da insolação.....	35
3.1.2	Método da corrente máxima.....	35
3.1.3	Sistemas <i>off-grid</i>.....	36
3.1.4	Sistemas <i>on-grid</i>.....	37
3.2	PARÂMETROS AMBIENTAIS.....	38
3.3	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES ELÉTRICOS.....	38
3.3.1	Método da capacidade de corrente.....	39
3.3.2	Método da queda de tensão.....	39
3.3.3	Dimensionamento dos eletrodutos.....	40

3.4	CÁLCULOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E PARÂMETROS ELÉTRICOS.....	40
3.4.1	Potências elétricas.....	40
3.4.2	Harmônicos.....	41
3.5	MATERIAL E DESENVOLVIMENTO.....	42
3.5.1	Levantamento de equipamentos para a eficiência energética.....	43
3.5.2	Consumo do sistema de iluminação.....	43
3.5.3	Sistema de geração fotovoltaico.....	44
3.5.4	Comprovação da economia.....	45
4	APLICAÇÃO E RESULTADOS DO PROJETO.....	46
4.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	46
4.1.1	Sistemas de iluminação.....	49
4.1.2	Sistemas de Ar Condicionado.....	53
4.1.3	Educação e conscientização.....	54
4.2	GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.....	54
4.2.1	Localização da estrutura de geração.....	54
4.2.2	Projeto de geração fotovoltaica.....	56
4.2.3	Projeto do cabeamento.....	60
4.2.4	Projeto dos sistemas de proteção.....	60
4.2.5	Sistemas de aquisição de dados.....	62
4.2.6	Projeto do sistema de controle e comando.....	63
4.2.7	Dados e análise da geração fotovoltaica.....	64
4.2.7.1	<i>Ajuste da corrente de entrada do inversor.....</i>	65
4.2.7.2	<i>Análise da geração e comparação com a estimativa.....</i>	72
4.2.7.3	<i>Influência da temperatura no rendimento do sistema.....</i>	74
4.3	ECONOMIA DE ENERGIA.....	77
4.4	IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS.....	80
5	CONCLUSÃO.....	84
	REFERÊNCIAS.....	85
	APÊNDICE A – Geração <i>off-grid</i>	93
	APÊNDICE B – Dimensionamento dos cabos.....	94
	ANEXO I – Diagrama geral do sistema de geração.....	100

1 INTRODUÇÃO

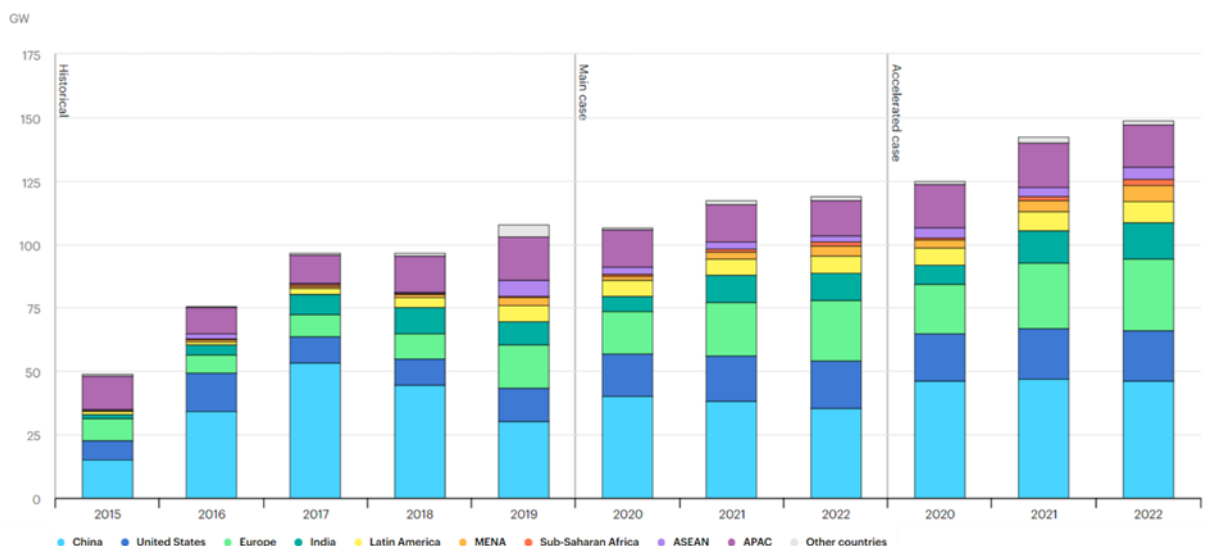
O aumento no consumo de energia elétrica em todo o planeta faz com que sejam estudadas novas formas de, simultaneamente, produzir mais energia elétrica e reduzir o desperdício com sistemas e equipamentos ineficientes (IEA, 2020). Isso, cada vez mais associado às questões ambientais relacionadas, em virtude dos impactos no meio ambiente e na sociedade causados pela produção deste tipo de energia (IEA, 2020b).

Em âmbito nacional tem-se a situação de significativas perdas de energia elétrica nos sistemas de transmissão e distribuição em virtude das grandes distâncias entre as centrais produtoras e os grandes consumidores de energia (BRASIL, 2019c, 2018b).

Assim, a geração distribuída tem ganhado maior espaço dentro da matriz elétrica nacional (BRASIL, 2019a), com destaque para a geração solar fotovoltaica, apresentando-se como uma alternativa de geração complementar, próxima ao consumidor, a qual tem menor impacto ambiental e contribui para a redução do consumo de energia elétrica da rede convencional (FERREIRA et al., 2018).

Conforme apresentado na Figura 1, as adições anuais de capacidade líquida fotovoltaica em todo mundo apresentaram crescimento, especialmente a partir de 2015 e, de acordo com as tendências do setor, ganharão ainda mais espaço no setor elétrico nos próximos anos.

Figura 1 - Adições de capacidade líquida fotovoltaica solar por país e região, 2015-2022.



Fonte: IEA (2021).

Tais sistemas de geração, para não operarem de modo a suprir perdas, devem ser precedidos de adequações e modernização nos equipamentos elétricos, no lado do consumo, visando atingir a maior eficiência elétrica possível com a redução de perdas por situações técnicas ou uso incorreto (BARROS, 2015).

Sendo a região sudeste do Brasil, onde encontra-se o Campus da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), o maior centro consumidor de energia elétrica do país (BRASIL, 2018c) e uma região de alto índice de insolação, torna-se um local apropriado para a implementações de ações de eficiência energética e geração distribuída, no contexto do aproveitamento da energia solar (CRECESB, 2018).

Visto que a interação entre a sociedade e as tecnologias às quais está exposta é peça chave dentro do sistema elétrico em virtude das atitudes e hábitos de consumo das pessoas, tem-se a necessidade de associar as ações técnicas à conscientização da comunidade a respeito do uso racional de recursos energéticos e financeiros e de seus consequentes impactos na economia e no meio ambiente. Assim, estas ações poderão mais facilmente atingir o resultado e a prosperidade esperados (LOVISCEK, 2021; ELKINGTON, 1998).

Deste modo, foi escolhido o Campus da FEG-UNESP para o desenvolvimento desta pesquisa com a aplicação de ações de eficiência energética e construção de uma central de geração fotovoltaica para desenvolver estudos sobre essas tecnologias e métodos, seguindo a tendência mundial no setor elétrico e suprimindo a carência de estudos nessa área dentro das condições climáticas e socioeconômicas brasileiras.

Associada a estas ações técnicas e estudos, à comunidade local e, especialmente, a interna do Campus, foram organizadas ações visando a sensibilização a respeito da sustentabilidade e na formação de profissionais e cidadãos mais críticos sobre suas ações e sua responsabilidade perante o uso dos recursos naturais.

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Visto que existem aspectos técnicos e comportamentais que devem ser melhor entendidos e explorados, especialmente dentro das condições climáticas, sociais, educacionais e econômicas brasileiras, a presente pesquisa mostra-se necessária para a avaliação e aprimoramento dos métodos utilizados na aplicação de sistemas fotovoltaicos e de eficiência energética, principalmente no que se refere aos aspectos que não se encontram explícitos.

Assim, a fim de evidenciar a validade dos métodos de cálculo de sistemas fotovoltaicos e a influência das variáveis climáticas específicas do Brasil, foi criada a estrutura central deste projeto que é uma pequena usina de geração fotovoltaica a qual foram associadas ações na área de eficiência energética e conscientização da comunidade.

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa foi motivada por um objetivo geral, mais abrangente, do qual ramificaram os objetivos específicos a este relacionados, abaixo apresentados.

1.2.1 Objetivo geral

O principal objetivo que motivou este trabalho foi a avaliação conceitual e operacional de um sistema fotovoltaico *on-grid*, suportado por estratégias de uso racional de energia.

1.2.2 Objetivos específicos

Derivados do objetivo geral deste trabalho, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar sistemas que permitam a redução dos valores pagos na fatura de energia elétrica, levando em consideração variáveis climáticas, tecnológicas, econômicas e ambientais;
- Analisar os dados referentes à economia de energia e redução de emissões de gases de efeito estufa;
- Envolver a comunidade nas ações técnicas previstas para criar uma consciência coletiva a respeito do correto uso dos recursos disponíveis e sobre a importância da sustentabilidade.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação de mestrado está organizada em cinco capítulos, dois apêndices e um anexo dispostos da seguinte forma:

- O Capítulo 2 intitulado “Fundamentação teórica e revisão bibliográfica” exibe a revisão da literatura com enfoque na situação mundial e nacional do setor elétrico e os conceitos de eficiência energética, geração fotovoltaica e sustentabilidade;
- O Capítulo 3 traz os aspectos conceituais utilizados no desenvolvimento deste trabalho, por meio da discussão do material e método utilizados na obtenção dos resultados;
- O Capítulo 4 expõe o desenvolvimento do projeto associado a esta pesquisa e os resultados obtidos;

- O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas após a análise dos resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho;
- O Apêndice A apresenta os conceitos de geração *off-grid* e o projeto predecessor que foi base para o desenvolvimento do trabalho realizado nesta pesquisa;
- O Apêndice B discorre sobre o dimensionamento dos cabos utilizados na estrutura central do objeto de estudo deste trabalho;
- Por fim, o Anexo I traz o diagrama elétrico, apresentado no Capítulo 4, ampliado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Entender os panoramas relativos ao setor elétrico, tanto em âmbito internacional quanto nacional, no que diz respeito à inserção de fontes alternativas de energia frente às tradicionais, permite vislumbrar as tendências e realizações dentro deste segmento produtivo. Desta forma, ao se realizar uma análise prospectiva e cronológica no setor elétrico, é possível entender a movimentação dos agentes envolvidos e como uma proposta voltada à produção de eletricidade de forma alternativa, por intermédio de sistemas fotovoltaicos, conseguiria se inserir neste contexto.

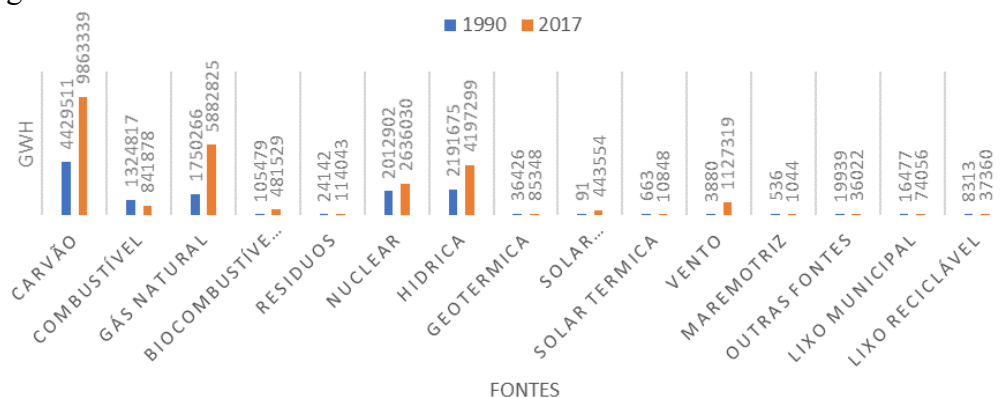
2.1 PERSPECTIVA MUNDIAL DO SETOR ELÉTRICO

O consumo de energia elétrica tem aumentado em todo o mundo nas últimas décadas, sendo que somente em 2018 a consumo mundial aumentou 2,3%, tanto em virtude das novas tecnologias e meios de produção serem cada vez menos dependentes de combustíveis fósseis e terem como fonte de energia a eletricidade, quanto pelo aumento da população mundial e de seu consumo de energia elétrica dentro das residências em suas atividades diárias (BRASIL, 2019d).

Os estudos da Agência Internacional de Energia apontam que o consumo médio anual de energia elétrica por pessoa no planeta passou de 2,1 MWh/ano/pessoa no ano de 1990 para 3,7 MWh/ano/pessoa no ano de 2017 (IEA, 2020). No mesmo período em que o consumo de energia elétrica per capita quase dobrou no mundo, a população mundial aumentou em mais de 2 bilhões de seres humanos (UN, 2019), tendo perspectivas de chegar a 9,7 bilhões de pessoas até o ano de 2030 (ONU, 2019).

Conforme apresentado na Figura 2, a produção de energia elétrica no mundo aumentou em 216% entre os anos de 1990 e 2017 (IEA, 2020b).

Figura 2 – Eletricidade no mundo

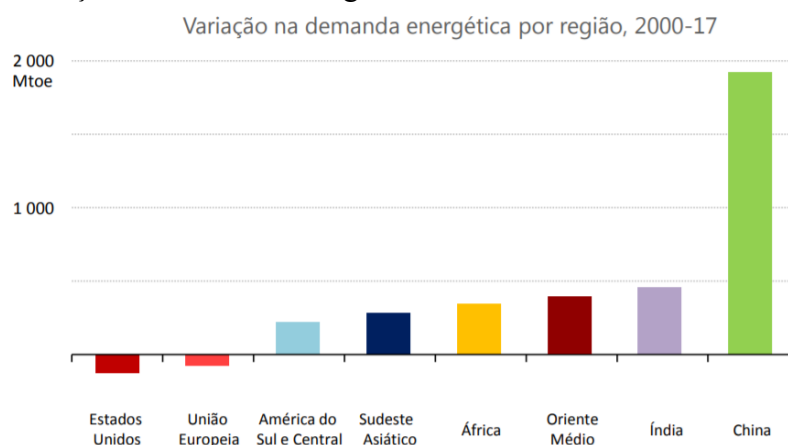


Fonte: Autoria própria a partir de dados disponíveis em IEA (2020b).

Estes mesmos dados mostram o aumento das fontes renováveis percentualmente maiores do que as fontes convencionais de energia (IEA, 2020b), sendo que a participação das renováveis passou de 19,9% em 1990 para 24,8% em 2017, demonstrando a mudança mundial em sua relação com o consumo e a produção da energia elétrica e seus impactos no cotidiano e no meio ambiente.

Em âmbito mundial, o país que teve maior variação na demanda de energia foi a China, sendo que, conforme mostra a Figura 3, Estados Unidos e União Europeia tiveram redução no consumo de energia no mesmo período.

Figura 3 – Variação de consumo energético



Fonte: BRASIL (2019d).

Ainda, estudos da Empresa Brasileira de Pesquisa Energética sinalizam que até o ano de 2040 os maiores aumentos de consumo estarão, em ordem decrescente, na Índia, China, África e Oriente médio, sendo o decréscimo de demanda da União Europeia proporcional ao aumento na África no mesmo período (BRASIL, 2019d).

2.2 CENÁRIO ATUAL DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

De acordo com a Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia (2018a), o Brasil, no ano de 2017 gerou 624,3 TWh de energia elétrica, o que representa 2,5% da geração mundial, dos quais 501,7 TWh foram provenientes de fontes renováveis de energia, o que representa 8% de toda a produção de energia elétrica proveniente de fonte renovável do mundo.

No ano seguinte, 2018, a produção de energia elétrica no Brasil cresceu 2%, a qual, em sua maior parte, deu-se pela geração hidrelétrica que passou de uma participação de 65,1% da

matriz elétrica brasileira em 2017 para 66,6% em 2018, com uma oferta hidráulica de 423,9 TWh (BRASIL, 2019a).

Apesar da queda da participação das fontes renováveis de energia na matriz elétrica brasileira de 89,9% em 2009 para 83,3% em 2018, esta ainda é quase três vezes superior que a média mundial de 2019 de 24% (BRASIL, 2019a).

Analisando o panorama da geração de energia elétrica no Brasil através dos dados do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2018 (BRASIL, 2019b) tem-se, conforme apresentado na Figura 4, que a maior produtora de energia elétrica no país é a região sudeste, com uma geração acumulada no ano de 2017 de 183.453 GWh, seguida das regiões sul, nordeste, Norte e, por fim, Centro-Oeste com uma produção de 65.523 GWh no mesmo período.

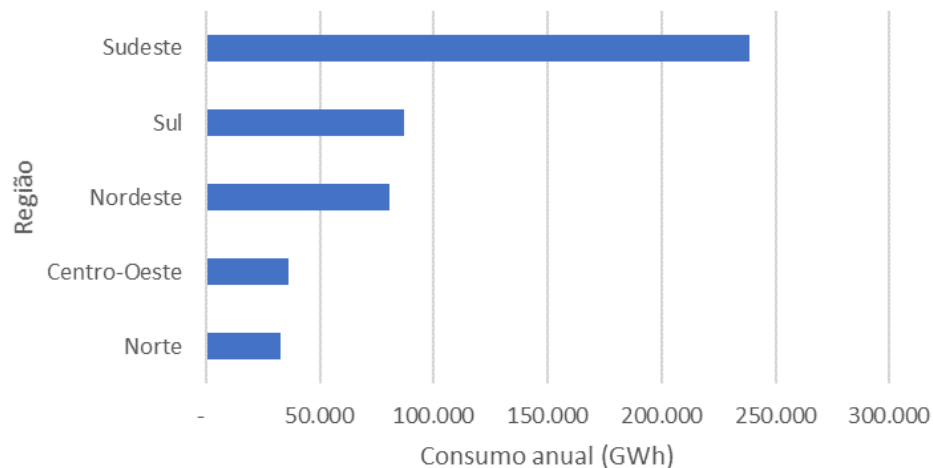
Figura 4 – Produção de Energia Elétrica no Brasil



Fonte: Autoria própria a partir de dados disponíveis em BRASIL (2019b).

Com os dados do BEN também se tem, no ano de 2017, a descrição sobre o consumo de energia elétrica no Brasil em cada uma de suas cinco regiões que, conforme apresentado na Figura 5, a região Sudeste é a maior consumidora desta forma de energia no país, com um consumo de 238.753 GWh no ano de 2018, um consumo 275% superior ao da região Sul, segunda maior consumidora (86.662 GWh) e 736% maior do que a menor consumidora, que é a região Norte (32.432 GWh).

Figura 5 – Consumo de Energia Elétrica no Brasil.

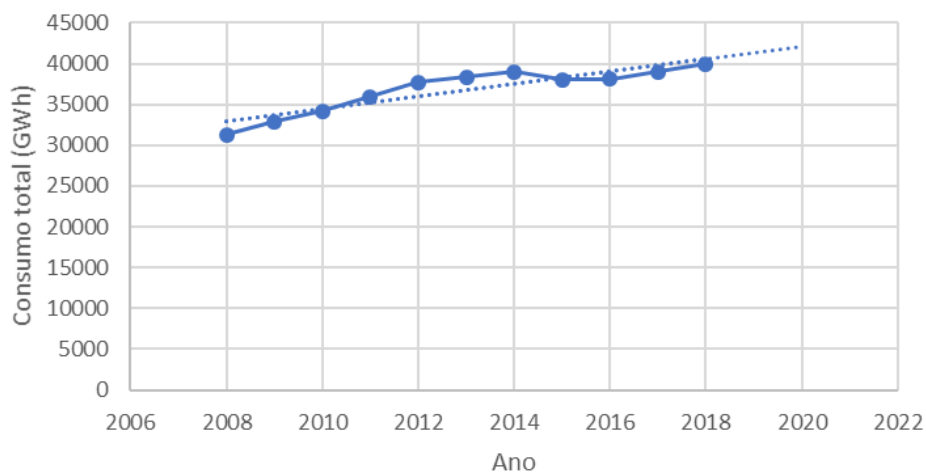


Fonte: Autoria própria a partir de dados disponíveis em BRASIL (2019b).

A partir da análise de tais dados tem-se que o consumo de energia elétrica da região Sudeste é 1,13% superior à soma do consumo de todas as outras quatro regiões brasileiras, enquanto sua geração é 54,65% inferior à geração das demais regiões somadas, o que significa que mais da metade da energia consumida nesta é importada de outros Estados.

Possuindo o maior consumo de energia elétrica do país, o Estado de São Paulo importa 57% de toda a energia elétrica consumida (SINDIENERGIA, 2017), sendo que apenas o setor residencial do Estado de São Paulo, cuja carga tem aumentado significativamente na última década, conforme mostrado na Figura 6, e com um consumo médio de quase 170 kWh/mês/residência (BRASIL, 2018b), representa 16,32% de todo o consumo de energia elétrica da região Sudeste do Brasil (BRASIL, 2019c).

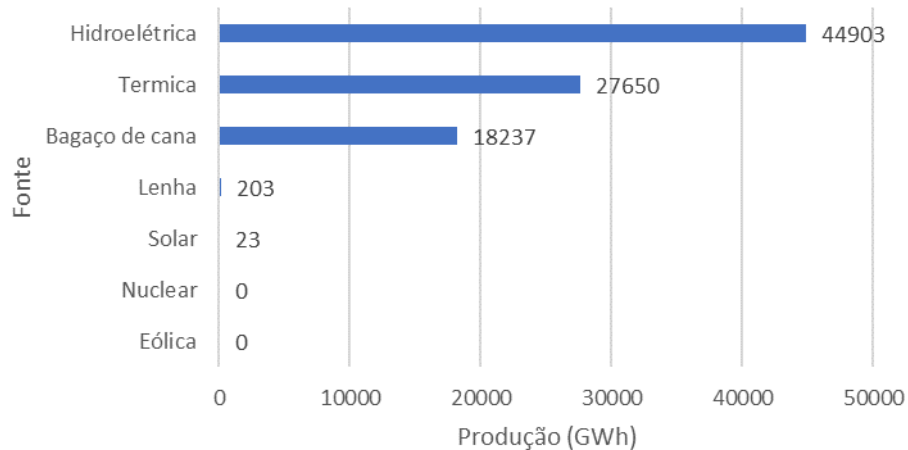
Figura 6 – Consumo residencial no Estado de São Paulo.



Fonte: Autoria própria a partir de dados disponíveis em BRASIL (2019c).

Na Matriz Elétrica do Estado de São Paulo a participação das fontes provenientes do processo da combustão da lenha e bagaço de cana, juntamente com as usinas termelétricas (UTE), é superior a participação das fontes hidrelétrica e solar somadas (BRASIL, 2019b), mostrando que o Estado que mais consome energia na federação possui fontes de grande impacto ambiental em sua geração, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Geração de Energia Elétrica no Estado de São Paulo.



Fonte: Autoria própria a partir de dados disponíveis em BRASIL (2019b).

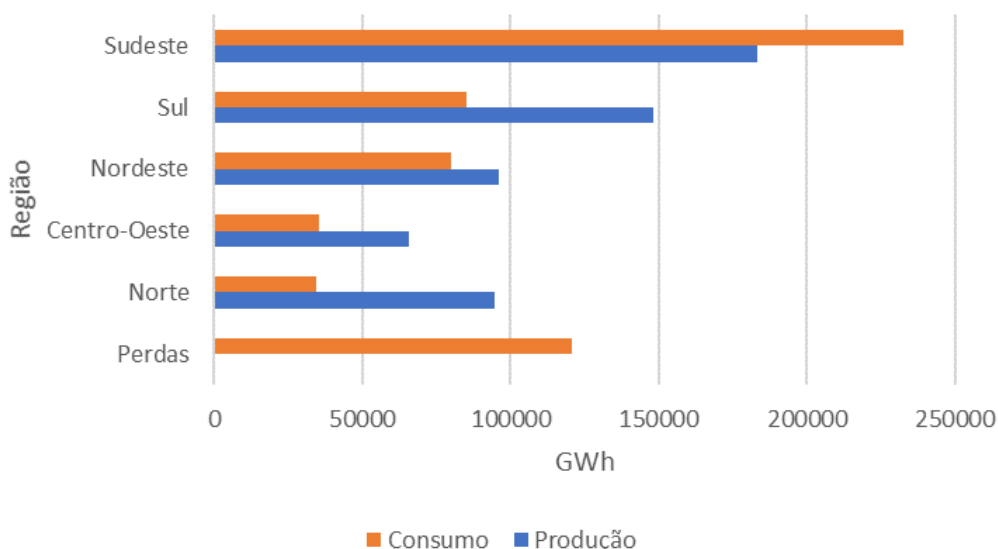
2.3 PERDAS NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

O Brasil é um país de dimensões continentais e, em virtude de suas políticas energéticas, possui um sistema nacional interligado, com linhas de transmissão que ligam 25 dos seus 26 Estados (ONS, 2018) em seus 8.514.877 km² (IBGE, 2004).

Este enorme sistema de transmissão utiliza mais de 107 mil quilômetros de linhas de transmissão para transmitir energia de grandes geradores, como Itaipu, a segunda maior usina hidrelétrica do mundo, para os consumidores (PORTAL BRASIL, 2014).

A partir dos dados anteriormente apresentados e da planilha de Consumo Mensal de Energia Elétrica e do Anuário Estatístico de Energia Elétrica da Empresa Brasileira de Pesquisa Energética (BRASIL, 2019c, 2018b) elaborou-se a Figura 8, na qual nota-se a discrepância entre geração e consumo de energia elétrica em todos os Estados da federação.

Figura 8 – Geração e consumo por Estado brasileiro.



Fonte: Autoria própria a partir de dados disponíveis em BRASIL (2019c, 2018b).

Tal diferença entre geração e consumo leva à necessidade de transporte de grandes quantidades de energia por consideráveis distâncias entre os produtores e os consumidores de energia elétrica, o que causa significativas perdas. No ano de 2018, como apresentado na Figura 8, tais perdas representaram o equivalente ao consumo das regiões Norte e Sul do país se somados.

Conforme apresenta o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2019a), as perdas no sistema de transmissão brasileiro aumentaram de 15,6% no ano de 2017 para 15,9% no ano de 2018 em decorrência do aumento da geração por centrais hidrelétricas no país, visto que estas ficam distantes dos centros consumidores, conforme apresentado na Tabela 1.

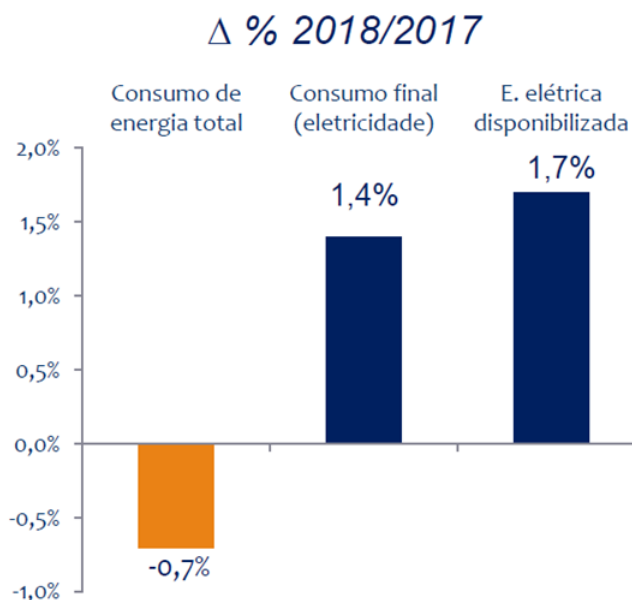
Tabela 1 – Aumento nas perdas de transmissão (expansão hidráulica).

Área	Comportamento	Valores em TWh	
		2017	2018
Oferta interna de Energia Elétrica	Crescimento	625,7	636,4
Centrais elétricas – Serviço Público	Crescimento	491,1	500,2
Centrais elétricas – Autoprodução	Crescimento	98,2	101,2
Importação de eletricidade	Queda	36,4	35,0
Consumo final	Crescimento	528,1	535,4
Perdas (comerciais + técnicas)	Crescimento	97,6	101,0
Perdas (%)	Crescimento	15,6 %	15,9 %

Fonte: Autoria própria a partir de dados disponíveis em BRASIL (2019a).

Ainda, conforme ilustrado na Figura 9, o consumo de energia elétrica no Brasil cresceu 1,4% em 2018 em relação a 2017, o que intensificou ainda mais este aumento nas perdas na transmissão.

Figura 9 – Aumento no consumo de energia elétrica.



Fonte: BRASIL (2019a).

2.4 CRESCIMENTO DA GERAÇÃO DISTRIBUIDA

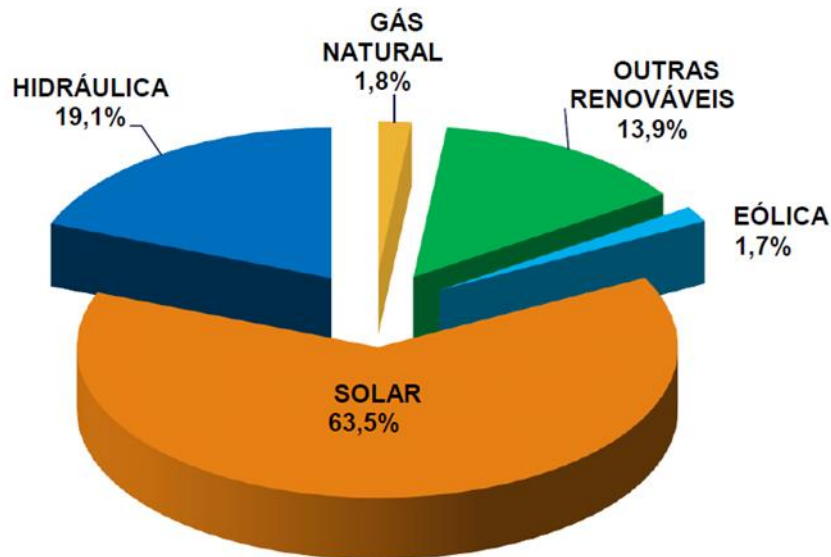
Com as atualizações das normas que regem o setor elétrico brasileiro e a redução dos custos das tecnologias de geração distribuída em virtude de seu crescimento e aprimoramento a nível mundial, este tipo de geração tem crescido em ritmo acelerado no país.

No ano de 2017, de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Energética, o Brasil atingiu 359,15 GWh de micro e minigeração distribuída (BRASIL, 2018b), passando para mais de 828 GWh no ano de 2018, um crescimento de 231% principalmente alavancado pelo crescimento da geração de energia pela fonte solar fotovoltaica, como mostra a Figura 10.

O consumo de energia continua a crescer a um ritmo mais rápido do que a oferta, o que ocasiona o crescimento substancial do preço desse serviço. De acordo com a Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN, 2017), o custo da energia para as indústrias aumentou 59,3% nos últimos três anos.

Figura 10 – Crescimento da geração distribuída em 2018.

Participação de cada fonte na geração distribuída em 2018:



Fonte: BRASIL (2019a).

O Senado Federal brasileiro indicou a geração por fontes renováveis como a solução para a crise energética (BRASIL, 2014), pois reduz a carga na rede elétrica e contribui indiretamente na redução da emissão de gases de efeito estufa pelas usinas termelétricas (KABIR et al., 2018). Especialmente no Brasil, a energia solar pode ser uma grande contribuição para a geração distribuída, devido ao grande potencial de geração de energia solar do país.

Outro assunto que se destaca nas pesquisas sobre a redução do consumo de eletricidade são as altas cargas tributárias. Mesmo sendo a nona maior economia do mundo (EXAME, 2016), o Brasil possui a sexta tarifa elétrica mais cara. Em fevereiro de 2017, o custo da eletricidade no país atingiu 126,30 US\$/MWh. Esse valor é 46% mais alto que a média internacional de 86,58 US\$/MWh (VEJA, 2017).

Devido ao aumento dos custos de produção com a operação de usinas termelétricas, que queimam principalmente combustíveis fósseis, para suprir a necessidade energética, um sistema de tarifas adicionais chamados “bandeiras tarifárias” foi implementado nas contas de energia, o que causou um aumento nos preços de eletricidade no país (BRASIL, 2018d).

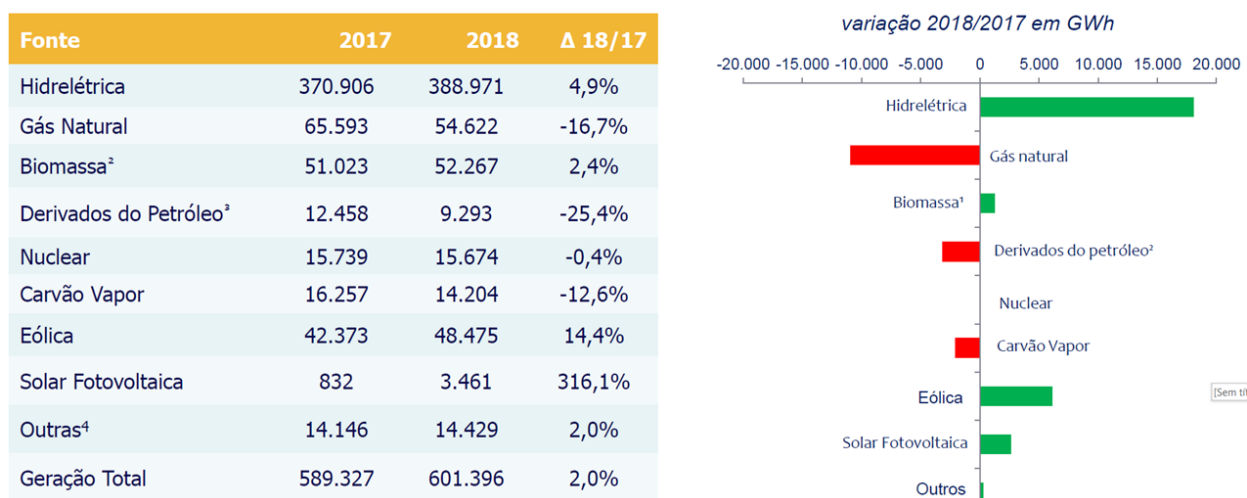
Neste cenário, a geração distribuída encontra condições cada vez mais favoráveis para seu crescimento com retorno econômico cada vez mais rápido.

2.4.1 Crescimento da Energia Solar

Atualmente, os projetos de energia solar têm sido uma tendência (FERREIRA et al., 2018), sendo tema central de um grande número de grupos de discussão (ABSOLAR, 2017). No entanto, isso não é algo recente ou mesmo temporário, pois a energia solar tem sido a solução (PEREIRA et al., 2012) não apenas para comunidades pobres sem acesso à eletricidade em todo o mundo, mas também para cidades que buscam fontes de energia alternativa (BRASIL, 2014).

Em virtude de sua facilidade de instalação, baixo custo quando comparado a outras fontes de geração de energia elétrica e reduzido tempo de retorno financeiro para o consumidor, a energia solar fotovoltaica é a que apresenta maior crescimento nos últimos cinco anos no Brasil, conforme apresentado na Figura 11, somente em 2018 esta fonte registrou um crescimento de 316,1% em relação ao ano anterior, valor 800% superior ao crescimento de todas as outras fontes somados.

Figura 11 – Crescimento da geração solar em 2018.



Devido à sua localização próxima à linha do equador e suas condições climáticas, o Brasil tem um dos maiores potenciais de geração de energia solar do mundo. Seu clima tropical garante grandes períodos de irradiação durante todas as estações do ano.

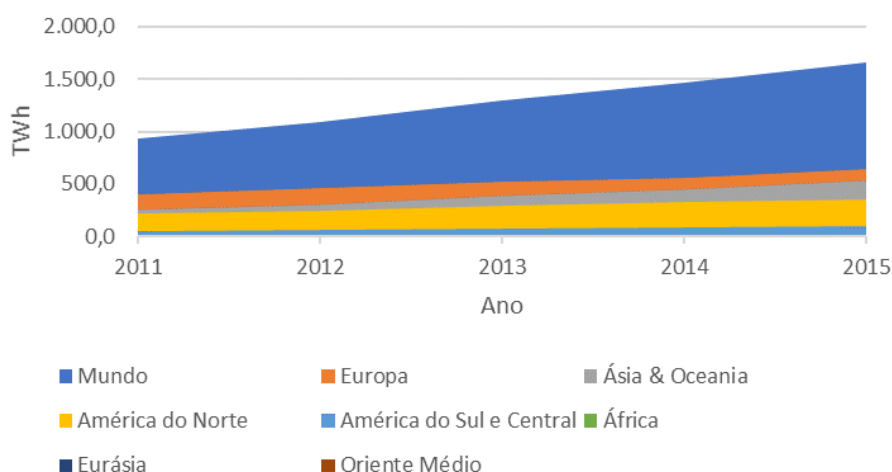
De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, a insolação diária varia de 4.444 Wh/m² no Sul, para 5.483 Wh/m² no norte do país (AMÉRICA DO SOL, 2017).

Com capacidade instalada de 2.056 MW (BRASIL, 2018c) a energia solar fotovoltaica passou a ser, em 2019, a sétima maior fonte do sistema elétrica brasileiro após ter superado os 1.990 MW das usinas nucleares de Angra I e II no Rio de Janeiro (VALOR, 2019).

Tal crescimento acompanha a tendência mundial de aumento da geração de energia por fontes alternativas de energia, sendo que somente no ano de 2015 houve um crescimento de 13,9% e dobrou entre 2011 e 2015, passando de uma geração de 938,4 TWh em 2011 para 1.665,2 TWh em 2015 (BRASIL, 2018c).

Conforme apresenta a Figura 12, impulsionado principalmente pelas fontes solar e eólica, todas as regiões do planeta têm investido na geração distribuída de energia elétrica (BRASIL, 2018c) tanto pelas questões econômicas quanto pelas ambientais, tendo em vista os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015).

Figura 12 – Crescimento das fontes alternativas no mundo.



Fonte: Autoria própria a partir de dados disponíveis em BRASIL (2018c).

2.5 IMPACTO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESTADO DE SÃO PAULO

No ano de 2015 as residências do Estado de São Paulo, o maior consumidor de energia do Brasil, juntas, utilizaram 41,76% de toda a energia elétrica produzida em todo Estado ou 22,58% de toda a energia elétrica produzida na região sudeste do Brasil.

Somente o setor residencial do Estado de São Paulo representa 15,92% de todo o consumo da região sudeste, apresentando um consumo médio mensal de aproximadamente 229,85 kWh (BRASIL, 2018c) por residência, com uma densidade de 3,22 pessoas por domicílio (SÃO PAULO, 2019).

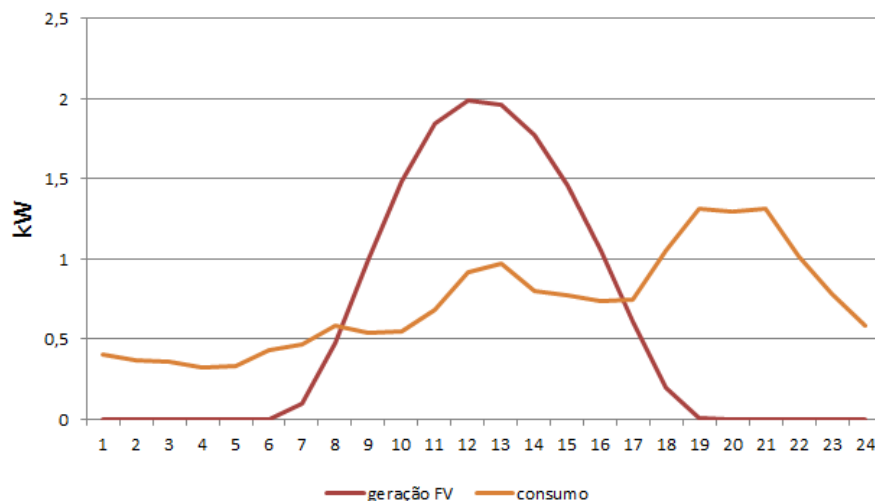
Sabendo-se que 100% (16.953.937) dos domicílios no Estado de São Paulo tem acesso à energia elétrica (SÃO PAULO, 2019), é possível a criação de uma política pública para incentivar a geração solar fotovoltaica residencial de modo a reduzir a dependência do Estado

de energia elétrica provinda de outras regiões e reduzir substancialmente as perdas nos sistemas de transmissão.

Com o crescimento da curva de carga de consumo no Estado de São Paulo a partir das 8 h da manhã com acentuado declínio a partir das 21 h (ALVIM, C. F. et al., 2005), a entrada dos sistemas de geração fotovoltaica abrange grande parte do período de maior consumo no Estado.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2017), a inserção de sistemas de geração fotovoltaica em residências e comércios reduz consideravelmente, em grande parte do dia, o consumo de energia elétrica da rede, inclusive produzindo mais do que se consome em quase todo o período entre o nascer e o pôr do sol, conforme apresentado nas Figuras 13 e 14.

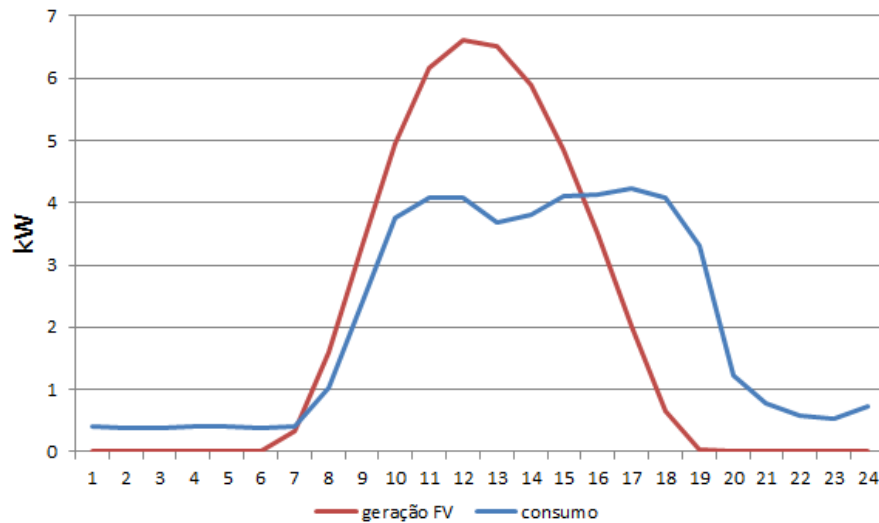
Figura 13 – Consumo residencial versus a geração solar fotovoltaica.



Fonte: BRASIL (2017).

No caso do setor comercial, praticamente todo o período de geração é capaz de reduzir substancialmente ou zerar o consumo de energia elétrica do setor, sendo que as áreas sob as curvas tendem a se igualar, como apresenta a Figura 14.

Figura 14 – Consumo comercial versus a geração solar fotovoltaica.



Fonte: BRASIL (2017).

2.6 A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO CENÁRIO BRASILEIRO

É usual que Estados e municípios possuam suas próprias secretarias de energia de modo a melhor administrarem e gerenciarem os aspectos relacionados à energia especificamente em seus Estados e cidades (BARROS, 2015).

Dentro das discussões sobre energia está inserido, inevitavelmente, o tema da eficiência energética, sendo várias as políticas públicas existentes, algumas das quais são mencionadas a seguir:

- Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf): Com o objetivo de instruir políticas e orientar ações que consigam fazer com que sejam desenvolvidas atuações de eficiência energéticas, focadas em aspectos tecnológicos e comportamentais, foi lançado em 2011 o PNEf. O plano prevê mecanismos de ação voluntárias e também compulsória que resultem em uma redução de 10% no consumo de energia (BRASIL, 2011).

- Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL): Instituído pela portaria interministerial nº 1.877 de 30 de dezembro de 1985, o PROCEL é um programa de governo para promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e executado pela Eletrobrás. O PROCEL promove ações de eficiência energética em diversos segmentos da economia, que ajudam o país a economizar energia elétrica e que geram benefícios para toda a sociedade (PROCEL, 2020).

- Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE): Gerido pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro, é uma das ações mais antigas na área de eficiência energética no país, criado em 1984. Este tem a função de fornecer ao consumidor informações de desempenho de produtos que considera, entre outros fatores, o consumo de energia. Uma série de produtos possui a sua etiquetagem compulsória, nestes casos o fabricante é obrigado a ensaiar seus produtos em laboratório autorizado a avaliar o nível de eficiência energética deste e classificá-lo dentro de certa escala. Atualmente há uma grande gama de produtos com etiquetas, avaliando o consumo não somente de energia elétrica, mas também de outros energéticos, como gás e combustíveis (INMETRO, 2018).

- Programa de eficiência energética da Aneel: Instituído no ano de 2000 pela lei federal nº 9.991, o programa obriga as distribuidoras de energia elétrica a aplicarem 0,5% de sua Receita Operacional Líquida em ações de eficiência energética no uso final da energia elétrica de seus consumidores.

Nos últimos 18 anos foram criadas leis e resoluções complementares que, sob a orientação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), ajustaram e regulamentaram a aplicação desses recursos (BRASIL, 2016).

- Lei da Eficiência Energética: A lei nº 10.295 de 17 de outubro de 2001 institui a política nacional de conservação e uso racional de energia. Como diretriz, essa lei apresenta a necessidade de se estabelecer níveis referenciais de eficiência energética (BRASIL, 2001).

Vê-se, então, a necessidade de primeiramente tornar um sistema energeticamente eficiente e conscientizar os usuários quanto à correta utilização dos recursos disponíveis antes de serem implementados métodos de geração distribuída. Gerar energia para um sistema que tem perdas e mau uso desta torna o retorno financeiro do sistema mais lento e não cumpre os propósitos de melhorar e reduzir o consumo de energia.

O que se tem atualmente é a construção de sistemas fotovoltaicos ou eólicos que são superdimensionados para suprir gastos desnecessários, o que torna o projeto mais caro e menos ecologicamente correto, visto que são necessários maiores investimentos (DIDONE, 2017).

2.7 IMPACTOS AMBIENTAIS DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Em geral, a população não está ciente de que a eletricidade contribui para a poluição do ambiente devido às suas fontes de energia, principalmente usinas termelétricas. Esses poluentes podem levar a uma série de problemas de saúde, direta e indiretamente. É necessário mudar a

consciência ambiental dos brasileiros, não apenas sobre o uso racional de eletricidade, mas também implementar pequenas usinas de “energia verde” (possui apelo à sustentabilidade energética e de recursos naturais) em residências e edifícios comerciais (SILVA, 2014).

Em virtude dos efeitos nocivos e à fácil dispersão dos gases de efeito estufa (MENICONI et al., 2011), a redução das emissões destes, principalmente dióxido de carbono (CO₂), que pode ser causada pela diminuição do consumo de energia da rede elétrica convencional devido às ações de geração de energia solar fotovoltaica (GOLDEMBERG; LUCON, 2007) e eficiência energética, trazem benefícios para a saúde coletiva.

Altas concentrações de dióxido de carbono têm um impacto negativo na capacidade de concentração e diminuem a capacidade de tomada de decisão e a memória (LOWE; GESHE; ORESZCYN, 2018). Um estudo da Universidade de Harvard permitiu concluir que essas concentrações elevadas em ambientes com pouca circulação de ar (comum em prédios antigos) levam a uma redução na resposta cognitiva e no desenvolvimento estratégico (DATZ, 2015). Outro estudo, publicado por pesquisadores da Escola de Saúde Pública da Universidade de Yale, realizado na China, um dos países com as maiores taxas de poluição de CO₂, demonstra que isso pode impedir um bom desempenho cognitivo verbal e matemático (ZHANG; CHEN; ZHANG, 2018). A exposição à poluição combinada ao CO₂ traz riscos à saúde da população com o desenvolvimento e agravamento de doenças respiratórias (OMS, 2018).

A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que no ano de 2008 foram contabilizados 12,7 milhões novos casos de câncer em todo o planeta que ocasionaram 7,6 milhões de óbitos, sendo 1,18 milhão referente aos casos de óbitos por câncer de pulmão. Os efeitos da exposição a poluentes e o desenvolvimento de câncer de pulmão estão atribuídos tanto à ação direta dos cancerígenos presentes na poluição, quanto à inflamação crônica induzida pelos mesmos (ARBEX et al., 2012).

Ainda, um estudo realizado pela Universidade de Lund, Suécia, estabelece uma relação entre a incidência de câncer de pulmão e o tempo de exposição da população à poluição em longo prazo. Concluiu-se que na média de 12,6 anos, 2.095 casos de câncer de pulmão foram diagnosticados, sendo estatisticamente comprovada a relação direta entre a poluição ambiental e a doença (BRAZILIAN TIMES, 2017).

De acordo com a *International Energy Agency* (IEA, 2019), o Brasil emite 86,7654 gramas de CO₂ por kWh de energia produzida, enquanto a média mundial é de 528,6 gramas de CO₂ por kWh.

Um estudo realizado pelo Instituto Totum e pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), da Universidade de São Paulo em parceria com a Fundação SOS Mata

Atlântica, estima que cada árvore da Mata Atlântica absorve 163,14 kg de gás carbônico (CO₂) equivalente ao longo de seus primeiros 20 anos (CICLO VIVO, 2016).

A geração de energia por painéis fotovoltaicos é considerada limpa por sua emissão nula de poluentes para a atmosfera terrestre, ou seja, nenhuma molécula de dióxido de carbono é emitida para a atmosfera durante o processo de geração de energia elétrica com painéis fotovoltaicos fazendo, assim, com que a adoção de sistemas de geração deste tipo reduza as emissões de poluentes equivalentes por kWh produzido do país (LIRA et al., 2019); o que contribui para a redução do fenômeno do aquecimento global, sendo este um dos principais gases do efeito estufa (BRASIL, 2020).

2.8 O TRIPÉ DA SUSTENTABILIDADE

Criado no meio dos anos 1990 pelo pesquisador John Elkington, o *Triple Bottom Line* (TBL), também conhecido como o “tripé da sustentabilidade”, é um dos principais conceitos base do estudo e aplicação das práticas sustentáveis (GOH et al., 2019). Tal conceito tem a premissa de que o desenvolvimento deve atender às necessidades das gerações atuais mantendo as condições e oportunidades para as gerações futuras fazerem o mesmo (HAMMER; PIVO, 2017), o que reitera os preceitos apresentados no Brundtland Report (1987).

Segundo a obra de Elkington (1997), a designação de 3Ps (*People, Planet and Profits*) é o que a sustentabilidade deve procurar atingir, ressaltando que as áreas social, ambiental e econômica devem ter o mesmo nível de importância, trazendo mais coerência a aplicação do deste (ALHADDI, 2015).

Após mais de duas décadas da criação do conceito, este ganha cada vez mais relevância ao redor do mundo com a adoção de práticas sustentáveis que sejam economicamente viáveis, ecologicamente corretas e socialmente benéficas. O crescimento dos modelos de negócios sustentáveis com compartilhamento de soluções encontradas conjuntamente entre diferentes setores faz com que o TBL seja constantemente aplicado e reformulado em diversos contextos (LOVISCEK, 2021; ELKINGTON, 1998).

Sendo este um conceito fundamental, também, na inserção de novas práticas sustentáveis dentro do setor elétrico com a adoção de tecnologias e formas de geração que possam trazer benefícios, atender o crescente consumo de energia elétrica da sociedade e diminuir os impactos ambientais referentes à geração de energia.

3 ASPECTOS CONCEITUAIS

No dimensionamento e montagem de um sistema fotovoltaico há conceitos e tratamentos de variáveis que na dinâmica operacional requerem não somente o domínio de conceitos específicos, mas a interpretação dos dados se faz fundamental para, posteriormente, fornecerem informações estratégicas para a orientação dos procedimentos de projetos, execução e seleção de tecnologias mais adequadas. No caso das estruturas conectadas à rede, devido à sua crescente participação na geração distribuída, existem particularidades que envolvem localização geográfica, comportamento do clima, equipamentos e seus aspectos tecnológicos e, finalmente, a coexistência entre sistemas de corrente contínua e alternada.

3.1 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO E ELEMENTOS OPERACIONAIS

No dimensionamento do sistema fotovoltaico, o primeiro ponto a ser considerado é o posicionamento dos painéis fotovoltaicos, sendo que, no hemisfério sul, estes devem ser posicionados para o norte geográfico para melhor aproveitamento da irradiação solar durante o dia.

O ajuste entre o norte magnético e o norte geográfico se dá em diferentes ângulos nas regiões em que se encontram; no caso do estado de São Paulo, o norte geográfico localiza-se a 19° a Leste do norte magnético (VILLALVA, 2015), ou seja, os painéis deverão ser instalados com sua superfície captora de luz com este direcionamento.

Além do direcionamento dos módulos fotovoltaicos, a angulação desses em relação ao solo é primordial para o melhor aproveitamento da energia dos raios solares que incidem sobre a superfície terrestre.

O ângulo de incidência dos raios solares não é fixo, varia ao longo do dia e nas diferentes estações do ano, portanto os painéis solares com angulação fixa devem ser instalados de modo a garantir a máxima incidência na maior parte do tempo ao longo do ano. Uma inclinação mais vertical aumenta a produção de energia no inverno e diminui no verão, da mesma forma que uma inclinação mais horizontal aumenta a produção de energia no verão e a reduz no inverno.

Assim sendo, a inclinação ideal para os painéis atingirem melhor desempenho ao longo do ano é dada em relação à latitude do local com ajustes conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Ângulo de inclinação dos módulos em relação à latitude

Latitude geográfica do local	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	10°
11° a 20°	Latitude
21° a 30°	Latitude + 5°
31° a 40°	Latitude + 10°
41° ou mais	Latitude + 15°

Fonte: Feito pelo autor adaptado de Villalva (2015).

Após o correto posicionamento dos módulos, o projeto necessita do cálculo de quanto será produzido em cada módulo fotovoltaico, valor que pode ser obtido por dois diferentes métodos de cálculo, os quais são o da insolação e da corrente máxima.

3.1.1 Método da insolação

Neste método de cálculo deve-se consultar a insolação média diária da região de instalação do sistema (E_s) dada em Wh/m².dia, de acordo com os dados do Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) do Ministério de Minas e Energia do Governo Brasileiro. Este fornece a insolação média registrada na estação de medições mais próxima das coordenadas da instalação (CRESESB, 2018); ainda, deve ser consultada a área da superfície captora do módulo fotovoltaico (A_m) dada em m² e a eficiência do módulo (η_m).

Com estes dados, utiliza-se a equação (1) para calcular a energia produzida diariamente, em Wh, pelo módulo (E_p) em estudo na região selecionada.

$$E_p = E_s \cdot A_m \cdot \eta_m \quad (1)$$

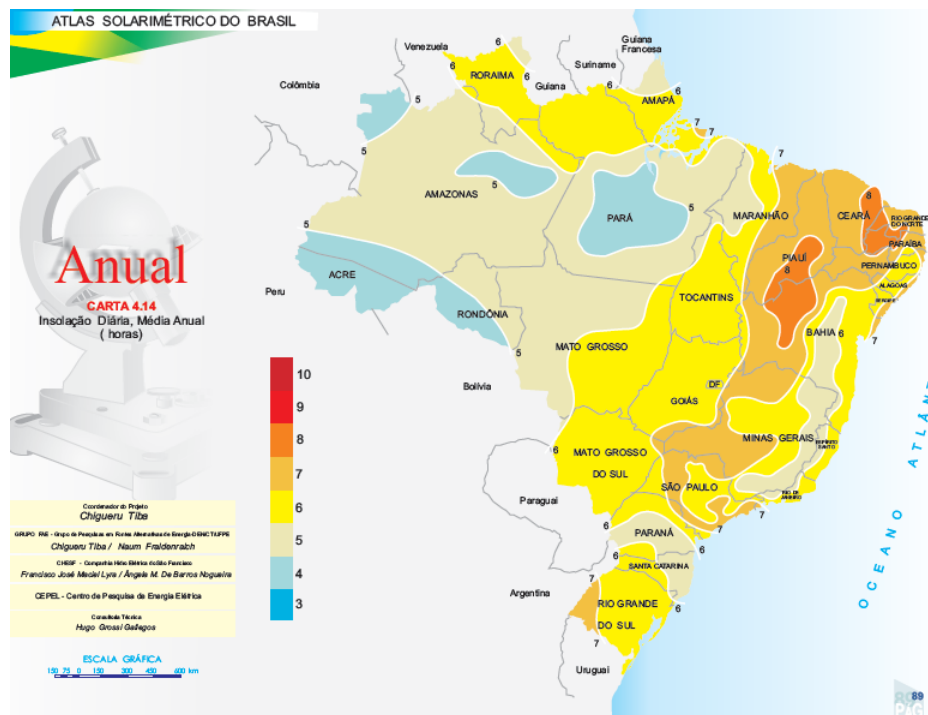
3.1.2 Método da corrente máxima

O método da corrente máxima utiliza a equação (2) para determinar a energia produzida diariamente pelo módulo (E_p), em Wh, a partir da potência nominal do módulo (P_m), dada em Wp, e do número de horas de insolação plena por dia (H_s).

$$E_p = H_s \cdot P_m \quad (2)$$

Sendo que a insolação diária é o tempo médio, em horas, em que se concentra a plena insolação durante o dia, ou seja, considera-se como se toda a insolação do dia ocorresse em um só período contínuo, valor dado pelo atlas solarimétrico apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Atlas solarimétrico do Brasil.



Fonte: CRESESB (2000).

3.1.3 Sistemas *off-grid*

Sistemas *off-grid* são aqueles desconectados à rede, ou seja, que geram energia elétrica e a utilizam instantaneamente ou a armazenam em bancos de baterias para uso posterior.

Estes sistemas contam com controladores de carga que são de dois tipos, o Rastreador de Máximo Ponto de Potência (MPPT), o qual é mais eficiente por procurar sempre o ponto de melhor desempenho da relação tensão-corrente do painel fotovoltaico, e o de Pulsos Modulados (PWM) que, por sua vez, apresenta eficiência reduzida em relação ao MPPT por ter uma tecnologia mais simples que apenas modula em pulsos a tensão de entrada e saída, apresentando menor custo em relação ao MPPT.

Além da tecnologia empregada no controlador, o principal parâmetro para a escolha é a máxima corrente suportada pelo equipamento, que deverá ser sempre superior à máxima corrente do painel fotovoltaico e da carga.

3.1.4 Sistemas *on-grid*

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (*on-grid*) foram regulamentados no Brasil pela Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que possibilitou o acesso de microgeração e minigeração

distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e, também, implementou o sistema de compensação de energia elétrica (BRASIL, 2012).

Esse tipo de sistema torna dispensável tanto o uso de baterias e demais tecnologias de armazenamento de energia elétrica, quanto o uso instantâneo da energia, uma vez que a energia gerada injetada na rede elétrica que não for consumida na instalação à qual pertence o sistema é direcionada à rede de distribuição de energia elétrica, gerando créditos de energia ao consumidor (BRASIL, 2012).

O equipamento responsável por realizar a conversão da energia em corrente contínua gerada pelos painéis fotovoltaicos e transforma-la em corrente alternada em fase com a rede elétrica é o inversor, cuja escolha deve seguir rígida e sequencialmente os passos e critérios em que são apresentados (VILLALVA, 2015).

O inversor deverá ter potência nominal igual ou superior a 80% da somatória das potências totais de pico de todos os módulos fotovoltaicos a ele conectados, ou seja, seguindo a equação (3).

$$P_I \geq 0,8 \cdot \sum P_M \quad (3)$$

sendo,

P_I : Potência do Inversor [W];

P_M : Potência dos módulos fotovoltaicos [Wp].

Depois de selecionada a potência nominal mínima do inversor a ser utilizado, deve-se verificar os parâmetros da rede onde será instalado para definir se o inversor necessário será monofásico, bifásico ou trifásico e se terá tensão nominal de 127 V, 220 V, 380 V ou 440 V. A frequência de saída, no Brasil, será sempre 60 Hz.

Tendo definido os critérios de potência e saída do inversor é necessário avaliar os modelos disponíveis que se adequem ao sistema proposto, sendo que os módulos fotovoltaicos deverão ser divididos entre as entradas MPPT do inversor de modo a não ultrapassar a tensão e a potência máxima permitida em cada entrada.

O arranjo série e paralelo (*strings*) dos módulos fotovoltaicos deverá sempre levar em conta a máxima tensão de operação e a máxima corrente de operação fornecidas pelo fabricante ao calcular os valores de tensão, corrente e potência de cada arranjo a ser conectado nas entradas MPPT do inversor.

Todos os inversores homologados no Brasil possuem sistemas chamados “anti-ilhamento” que garantem que, em caso de falta da rede elétrica, o inversor seja desligado automaticamente para evitar acidentes em manutenções ou sobrecargas de sistemas (BRASIL, 2012).

Mesmo com sua proteção interna, recomenda-se que todos os equipamentos de proteção elétrica sejam instalados em conformidade com a NBR 5410 (ABNT, 2014).

3.2 PARÂMETROS AMBIENTAIS

Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), o Brasil emite 86,7654¹ gramas de CO₂ por kWh de energia produzida (IEA, 2010), ou seja, através da equação (4) é possível calcular a quantidade de dióxido de carbono emitida na atmosfera por determinado consumo de energia elétrica da rede.

$$Q_{CO_2/ano} = E_c \cdot 0,0867654 \quad (4)$$

sendo,

Q_{CO_2} : Quantidade de dióxido de carbono emitido na atmosfera [kg];

E_c : Energia elétrica consumida da rede [kWh/ano].

Estima-se que cada árvore absorva 163,14 kg de dióxido de carbono (CO₂) em seus primeiros 25 anos de vida (ROSA, 2013). Assim sendo, é possível calcular a quantidade equivalente de árvores plantadas pela quantidade de CO₂ que deixa de ser emitida na atmosfera pela tomada de ações sustentáveis através da equação (5).

$$Q_{arv} = \frac{Q_{-CO_2/ano} \cdot 25}{163,14} \quad (5)$$

sendo,

Q_{arv} : Quantidade equivalente de árvores plantadas, em unidades de árvores de grande porte;

$Q_{-CO_2/ano}$: Quantidade de dióxido de carbono que deixou de ser emitido na atmosfera por ano [kg/ano].

3.3 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES ELÉTRICOS

Todos os condutores elétricos utilizados nas estruturas do projeto são de cobre e seguem a NBR 5410 (ABNT, 2014), sendo dimensionados de acordo com as regras e boas práticas de projeto.

¹ Valor numérico adotado com quatro casas decimais em virtude da ordem de grandeza da energia elétrica.

Aqui são apresentados os dois métodos de cálculo dos condutores elétricos, sendo que o condutor a ser escolhido deverá ser o de maior seção transversal fornecido nos cálculos ou a seção mínima descrita em norma, caso os cálculos forneçam um valor inferior a esta.

3.3.1 Método da capacidade de corrente

O primeiro passo para o cálculo da seção mínima do condutor necessário para a aplicação é a definição de seu tipo de instalação conforme a tabela de tipos de linhas elétricas da NBR 5410 (ABNT, 2004).

Definido o tipo de instalação do condutor, utiliza-se a equação (6) para calcular a corrente de projeto no condutor com a aplicação dos fatores de correção.

$$I'_B = \frac{I_B}{F_t \cdot F_a} \quad (6)$$

sendo,

I'_B : Corrente de projeto corrigida [A];

I_B : Corrente de projeto [A];

F_t : Fator de correção pela temperatura do ambiente;

F_a : Fator de correção pelo agrupamento de circuitos carregados.

Com o valor da corrente de projeto corrigida calculada e o tipo de instalação dos cabos, recorre-se às tabelas de capacidade de condução de corrente da NBR 5410 (ABNT, 2004) para a definição da seção transversal mínima do condutor que deverá ser utilizado para a aplicação em questão.

3.3.2 Método da queda de tensão

O cálculo da seção transversal mínima (S_A) dos condutores é dado pela equação (7), que fornece o valor desta em mm^2 .

$$S_A = \frac{200 \cdot \rho \cdot L_c \cdot I_c}{\Delta V_c \cdot V_c} \quad (7)$$

sendo,

ρ : resistividade do material condutor (cobre = $1/56 \, \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$);

L_c : comprimento do circuito [m];

I_c : corrente total do circuito [A];

ΔV_c : queda de tensão admitida em projeto [%];

V_c : tensão do circuito [V].

Na comparação entre os métodos da seção mínima (ABNT, 2004), capacidade de corrente (ou ampacidade) e queda de tensão deve-se escolher o condutor com a maior seção transversal comercial mais próxima.

3.3.3 Dimensionamento dos eletrodutos

Os eletrodutos são as tubulações pelas quais passam os condutores elétricos, sendo a sua principal função o direcionamento e sua proteção.

A escolha dos eletrodutos está atrelada a sua ocupação interna, portando deve-se calcular o diâmetro interno mínimo dos eletrodutos a partir da equação (8).

$$d_i = \sqrt{\frac{4 \cdot \sum S_{\text{condutores}}}{K \cdot \pi}} \quad (8)$$

Sendo,

d_i = diâmetro interno do eletroduto [mm];

$\sum S_{\text{condutores}}$ = somatório da seção final dos condutores (com isolamento) que compõem o circuito [mm²];

K = fator de ocupação dos eletrodutos, sendo 0,53 para um condutor, 0,31 para dois condutores e 0,4 para três ou mais condutores (ABNT, 2004).

3.4 CÁLCULOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E PARÂMETROS ELÉTRICOS

Os principais parâmetros a serem analisados em um estudo de eficiência energética são a potência nominal ativa dos aparelhos, a potência aparente e, conseqüentemente, o fator de potência. São também importantes para a análise as informações a respeito dos harmônicos gerados.

3.4.1 Potências elétricas

Os principais parâmetros para o cálculo da eficiência energética são a potência aparente, aquela que leva em conta o fator de potência, e a potência ativa, aquela que é transformada em trabalho, são dadas pelas equações (9) e (10), respectivamente.

$$S = V \cdot I \quad (9)$$

$$P = V \cdot I \cdot \text{FP} \quad (10)$$

sendo,

S: Potência aparente [VA];

V: Tensão [V];

I: Corrente [A];

P: Potência ativa [W];

FP: Fator de potência.

Destas equações é possível a determinação do fator de potência em sistemas com distorção de harmônicos desprezível, o qual também pode ser obtido pela equação (11).

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \left(\arctan \left(\frac{Q}{P} \right) \right) = \cos \phi \quad (11)$$

sendo,

Q: Potência reativa [VAr].

Para sistemas nos quais não se pode desprezar a presença dos harmônicos, o cálculo do fator de potência é dado pela equação (12).

$$FP = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + TDH_1^2}} \quad (12)$$

sendo,

ϕ_1 : Defasagem entre a primeira harmônica da corrente e a tensão [graus];

TDH_I: Taxa de Distorção de Harmônicos na corrente elétrica.

3.4.2 Harmônicos

É estabelecido pelo teorema de Fourier que toda função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões e é composta de uma expressão senoidal em frequência fundamental, de expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental, chamados harmônicos, e de uma eventual componente contínua. Este formato é conhecido como série trigonométrica de Fourier, todavia, existem outras formas de representação, tais como, a compacta e a exponencial; a escolha do tipo série a ser usada depende da situação estudada e da representação desejada (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

A presença de harmônicos é sinônimo de uma onda de tensão ou de corrente deformada, decorrente do funcionamento de sistemas elétricos não lineares, tanto na geração quanto no consumo. Tais harmônicos, quando presentes, se propagam na rede elétrica e modificam a forma senoidal, conforme a amplitude e frequência.

Estes, na aplicação desta pesquisa², são representados pela Taxa de Distorção de Harmônicos da corrente elétrica (TDH_I), cujo método de cálculo é apresentado na equação (13).

$$TDH_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=0; \neq 1; \neq 2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (13)$$

sendo,

I_n : Corrente do n -ésimo harmônico [A];

I_0 : Corrente contínua [A];

I_1 : Corrente do primeiro harmônico [A].

Harmônicos circulando na rede elétrica são causadores de inúmeros problemas, dentre eles: sobrecarga das redes de distribuição por aumento da corrente eficaz, sobrecarga dos condutores de neutro em razão da soma das correntes harmônicas de ordem três (homopolares) geradas pelas cargas monofásicas em sistemas trifásicos, vibrações e envelhecimento dos alternadores, transformadores e motores, ruídos dos transformadores, sobrecarga e envelhecimento dos capacitores de compensação de energia reativa, deformação da tensão de alimentação que pode perturbar receptores sensíveis além de perturbação das redes de comunicação ou das linhas telefônicas, além de poderem alterar a operação dos sistemas de proteção (MATEUS, 2001).

3.5 MATERIAL E DESENVOLVIMENTO

Na concepção dos sistemas fotovoltaicos *on-grid*, os elementos estruturais têm que ser compatíveis com os painéis fotovoltaicos, no tocante à parte física, pois o posicionamento, a segurança e a funcionalidade operacional constituem elementos básicos na geração distribuída. Os aspectos operacional e científico do projeto requerem especial atenção devido ao fato de que todo o sistema precisa ser pensado não somente para o suprimento de energia elétrica à rede, mas possuir elementos que permitam o monitoramento, aquisição de dados e controle das grandezas físicas de interesse.

Uma característica de grande importância no projeto e aplicação dos sistemas fotovoltaicos é de que estes devem ser antecidos de ações de gerenciamento de cargas e de eficiência energética para que a geração se torne a mais eficiente possível, não sendo um sistema que além de atender às cargas necessárias, supre perdas e cargas mal geridas.

² A rede é vista como um barramento infinito cuja tensão é muito estável e a taxa de distorção de harmônicos é considerada nula.

3.5.1 Levantamento de equipamentos para a eficiência energética

Antes da implementação de um sistema de autogeração é necessário avaliar se este encontra-se dentro de um sistema eficiente e, para tanto, é realizada ampla análise anterior ao início da geração de todas as cargas do sistema elétrico da localidade em que será instalado.

São catalogados todos os equipamentos e seus respectivos tipos e potências, bem como todas as lâmpadas e seus tipos, tecnologias e potências nominais; levando sempre em consideração o regime de operação (forma e tempo de uso), visando a análise do consumo de energia.

3.5.2 Consumo do sistema de iluminação

Com o uso de amperímetros *True RMS* é aferida *in loco* a corrente dos sistemas de iluminação externo e interno em sua totalidade, medindo não apenas o consumo das lâmpadas, mas também de seus reatores, capacitores e ignitores.

Para melhor análise, alguns desses sistemas são levados para ensaios em laboratório, conforme apresentado na Figura 16, sendo medidas a corrente ao longo do tempo da partida do sistema até a estabilização da corrente com o acompanhamento da tensão, a temperatura de operação da lâmpada após atingir o regime permanente (uso de termômetro infravermelho), a potência ativa em regime permanente (uso de um wattímetro) e, assim, calcular o fator de potência.

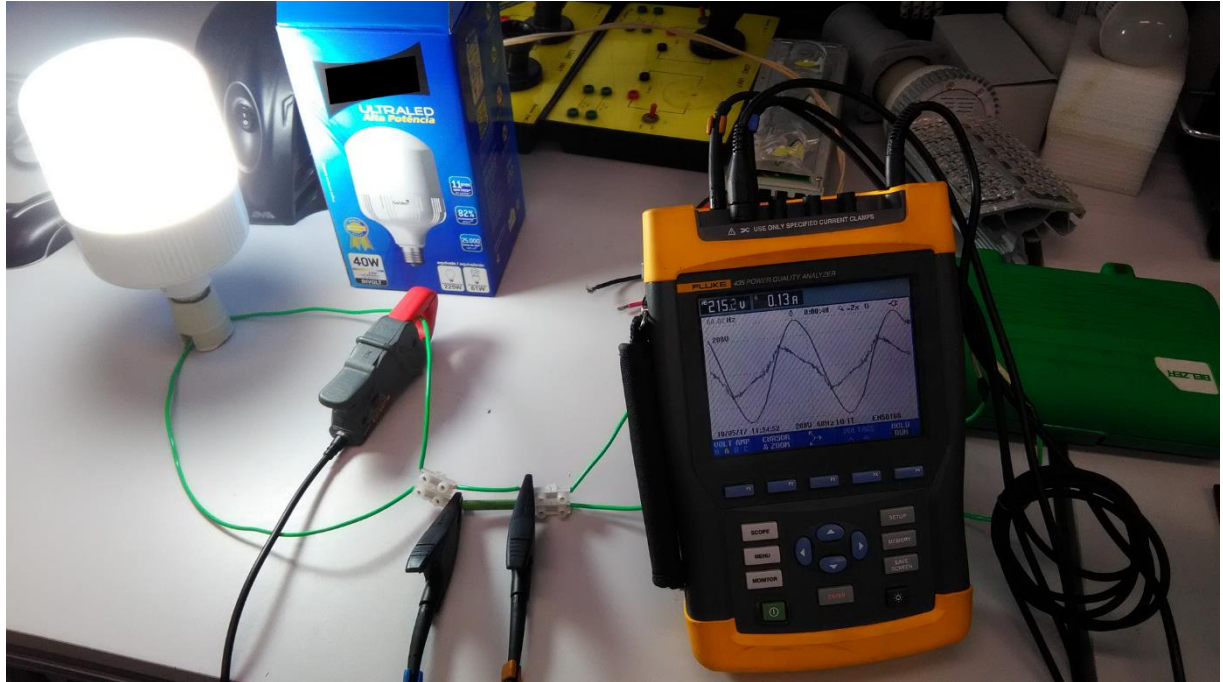
Figura 16 – Testes realizados com Voltímetros, Amperímetros e Wattímetros.



Fonte: O autor (2018).

Ademais, para uma avaliação sobre a taxa de distorção dos harmônicos é utilizado um medidor de qualidade de energia em amostras dos sistemas, conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Testes realizados com Analisador de Qualidade de Energia.



Fonte: O autor (2018).

3.5.3 Sistema de geração fotovoltaico

A maior parte dos inversores *on-grid* disponíveis no mercado é capaz de fornecer todos os dados de tensão, corrente e potência de entrada e saída referentes a geração fotovoltaica, todavia sistemas de cunho didático e laboratorial podem possuir medidores de tensão e corrente individuais para diferentes áreas do sistema com a finalidade de obter dados mais específicos e, também, de possibilitar uma análise mais apurada do funcionamento da central de geração.

Como o sistema fotovoltaico projetado, concebido e estudado nesta pesquisa se destina à propósitos didáticos, optou-se pela instrumentação analógica, a qual torna mais fácil a visualização dos fenômenos físicos em questão através da movimentação dos ponteiros sobre a escala (LEÃO, F. B.; KUROKAWA, S., s.a.).

Os equipamentos como termômetros, voltímetros e alicates amperímetros *True RMS* são peças fundamentais para estudos mais aprofundados dos sistemas de geração em relação a seu desempenho em diferentes condições climáticas e para a eventual conferência do correto funcionamento da instrumentação interna dos painéis de controle e aquisição de dados.

Os dados de tensão e corrente em corrente contínua adquiridos, tanto pelos voltímetros e amperímetros quanto pelo sistema de armazenamento de dados do inversor, são usados para determinar a potência na operação do sistema fotovoltaico e, sendo conhecida a potência nominal dos módulos, pode-se calcular a eficiência de geração do sistema em dado momento.

Ainda, a tensão individual de cada painel fotovoltaico aferida com voltímetros pode ser utilizada para a determinação da eficiência de cada módulo e para a determinação da fonte de eventuais falhas e pontos de sombra que possam prejudicar todo o sistema.

No que se refere à parte em corrente alternada, os dados de potência ativa e energia fornecidos pela interface do inversor permitem a determinação da eficiência instantânea de transformação da corrente contínua em corrente alternada do aparelho bem como a quantidade de energia injetada na rede elétrica.

Com o dado de potência ativa supracitado e o cálculo da potência aparente com os dados de tensão e corrente dos voltímetros e amperímetros *True RMS* é possível determinar o fator de potência do inversor.

A aferição de temperatura dos painéis e equipamentos com termômetros a termopar ou infravermelhos permitem, ainda, uma comparação da eficiência destes em diferentes temperaturas e uma análise mais ampla a respeito dos possíveis ganhos com investimento em sistemas de arrefecimento.

3.5.4 Comprovação da economia

Para realizar uma análise dos impactos da implementação da geração fotovoltaica *on-grid* em um sistema previamente modificado para aumento de sua eficiência energética, são levantadas todas as faturas de energia elétrica completas da localidade por um período igual ou superior ao de funcionamento do projeto implementado e antes de sua implementação.

É primordial para a definição da porcentagem de economia de energia a disponibilidade dos dados médios mensais de consumo da localidade em estudo, obtidos por meio das faturas de energia elétrica, antes e depois da aplicação das ações.

Ainda, dados de redução de consumo acumulada por período são necessários para a mensuração de valores monetários de economia e para a definição dos impactos na redução na emissão de poluentes.

4 APLICAÇÃO E RESULTADOS DO PROJETO

O desenvolvimento do projeto de geração de energia solar fotovoltaica *on-grid* na Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG), foi precedido de uma ampla aquisição de dados das cargas presentes no sistema elétrico da instituição, com o intuito de realizar a análise do consumo de energia elétrica, bem como a identificação dos principais consumidores. Tal procedimento teve como objetivo tanto o aprimoramento da operação quanto, na medida do possível, a modernização e consequente melhoria da eficiência em relação ao consumo de energia elétrica. Dessa forma, o sistema de geração fotovoltaica, com operação *on-grid*, fica com a sua dimensão mais ajustada às necessidades das cargas, evitando-se o suprimento de energia às perdas decorrentes do funcionamento das cargas ineficientes.

4.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Antes da implementação do sistema de geração fotovoltaica foram catalogadas e analisadas as cargas do sistema elétrico da FEG no intuito de identificar aquelas que mais oneravam a fatura de energia elétrica do Campus, o que foi realizado por meio da contagem manual de equipamentos em cada sala e espaço do local e utilização dos dados de placa dos aparelhos, sendo substituídos por aferições com alicate amperímetro, quando não disponível a placa.

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os cinco diferentes tipos de sistema de iluminação presentes na instituição, sendo estes fluorescentes tubulares, fluorescentes compactas, LED, incandescente e vapor de sódio, com um total de 8.378 lâmpadas em funcionando, representando uma potência instalada de 415,3 kW.

Por intermédio da observação dos hábitos de utilização dos diferentes sistemas de iluminação em diferentes locais do Campus entre os anos de 2017 e 2019, foram analisadas as quantidades de lâmpadas em relação ao total de cada tipo que permaneciam ligadas simultaneamente e, então, foi aplicado um percentual de uso nos cálculos, como por exemplo, 40% do total de lâmpadas tubulares de 40 W de cada bloco, em média, ficam ligadas simultaneamente devido as características de uso e de instalações elétricas.

A Tabela 2 sintetiza o levantamento de lâmpadas fluorescentes existentes no campus, o tempo médio de seu funcionamento e sua contribuição para o consumo total do sistema de iluminação da FEG que é de aproximadamente 92.699 kWh/mês.

Tabela 3 – Levantamento de lâmpadas fluorescentes na FEG.

	Fluorescente tubular			Fluorescente compacta			
	18 W	40 W	110 W	10W	12 W	15 W	85 W
Número de lâmpadas	340	6998	126	97	12	101	20
Porcentagem do total de lâmpadas no Campus (%)	4,06	83,53	1,50	1,16	0,14	1,21	0,24
Potência total [W]	6732	307912	15246	970	144	1515	1700
Tempo de uso/dia [h/dia]	8	12	13	6	6	6	4
Percentual de uso (%)	30	40	30	100	100	100	10
Consumo [kWh/mês]	484,70	44339,33	1783,78	174,6	25,92	272,70	20,40
Porcentagem do gasto total do sistema de iluminação do Campus (%)	0,52	47,96	1,93	0,19	0,03	0,29	0,02

Fonte: Feito pelo autor.

A Tabela 4, seguindo o mesmo princípio da Tabela 3, apresenta o levantamento de lâmpadas LED, Incandescente e Vapor de Sódio existentes no campus e sua contribuição para o consumo total do sistema de iluminação.

Tabela 4 – Levantamento de lâmpadas LED, Incandescente e vapor de sódio na FEG.

	LED			Incandescente		Vapor de Sódio	
	E27-9 W	E27-12 W	Spot	60 W	100 W	250 W	500 W
Número de lâmpadas	12	8	221	2	18	419	4
Porcentagem do total de lâmpadas no Campus (%)	0,14	0,10	2,64	0,02	0,21	5,00	0,05
Potência total [W]	108	96	2210	120	1800	115225	2200
Tempo de uso/dia [h/dia]	10	10	4	12	12	12	4
Percentual de uso (%)	100	100	10	10	10	100	100
Consumo [kWh/mês]	32,40	28,80	26,52	4,32	64,80	44937,75	264,00
Porcentagem do gasto total do sistema de iluminação do Campus (%)	0,03	0,04	0,03	0,00	0,07	48,6	0,29

Fonte: Feito pelo autor.

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam as quantidades de aparelhos de ar condicionado do tipo janela, *split hi-wall*, piso-teto e cassete, respectivamente, existentes no campus universitário, com a finalidade de elaborar planos de modernização desses sistemas e estimar a participação desses no consumo de energia elétrica.

Tabela 5 – Levantamento aparelhos de ar condicionado do tipo janela na FEG.

Tipo de aparelho	Janela					
	10.000	7.500	12.000	15.000	18.000	21.000
Potência [BTU/h]						
Quantidade	91	27	26	12	3	11
Total do tipo	170					
Porcentagem do total de aparelhos no Campus (%)	53,53	15,88	15,29	7,06	1,76	6,47

Fonte: Feito pelo autor.

Tabela 6 – Levantamento aparelhos de ar condicionado do tipo *split hi-wall* na FEG.

Tipo de aparelho	Split Hi-Wall					
Potência [BTU/h]	9.000	12.000	13.000	18.000	24.000	21.000
Quantidade	25	103	8	34	8	10
Total do tipo	178					
Porcentagem do total de aparelhos (%)	7,96	32,80	2,55	10,83	2,55	3,18

Fonte: Feito pelo autor.

Tabela 7 – Levantamento aparelhos de ar condicionado dos tipos piso-teto e cassete.

Tipo de aparelho	Piso – Teto						Cassete
Potência [BTU/h]	24.000	30.000	36.000	48.000	60.000	80.000	46.000
Quantidade	2	57	18	13	27	3	6
Total do tipo	130						6
Porcentagem do total de aparelhos (%)	0,64	18,15	5,73	4,14	8,60	0,96	1,91

Fonte: Feito pelo autor.

Também, existem no Campus 54 geladeiras, sendo 15 com mais de 20 anos de uso e 13 com mais de 10 anos de uso e 57 chuveiros de 5.500 W.

Devido a impossibilidade técnica do levantamento exato do número de equipamentos de informática, foi realizado um cálculo estimado de equipamentos por bloco e um percentual de uso de 25%, obtendo um total de 570 aparelhos e um consumo mensal estimado de 8.208 kWh.

Conforme apresentado na Tabela 8, com estes levantamentos foi possível analisar a contribuição de cada tipo de carga no consumo do Campus, sendo o total a média de consumo mensal do Campus entre os anos de 2012 e 2016.

Tabela 8 – Contribuição de cada carga no consumo.

Carga	Consumo mensal (kWh/mês)	Porcentagem do total (%)
Iluminação	92.460	74,31
Ar condicionados	14.971	12,22
Equipamentos de informática	8.208	6,60
Demais cargas	5.000	4,02
Geladeiras	3.240	2,60
Chuveiros	313	0,25
Total	124.193	100,00

Fonte: Feito pelo autor.

Sendo a maior fonte de despesas, a primeira área a ser adequada dentro de um plano de eficiência energética foi a iluminação do campus, que representa cerca de 74% do consumo energético, seguida pelos aparelhos de ar condicionado com 12%. Por conta do comportamento desse sistema ser bastante dinâmico, há variações de participação de cada tipo de carga ao longo

dos meses; com consumos mensais que, em algumas ocasiões, superam os 178 MWh e, em outras, são inferiores a 90 MWh.

4.1.1 Sistemas de iluminação

Com o uso de amperímetros *True RMS* foram aferidas as correntes de 61 dos 152 (40,1%) postes ornamentais do Campus, que utilizam lâmpadas de vapor de sódio de 250 W, mesmo tipo e potência utilizados em todo o sistema de iluminação externo do Campus.

Destes 61 postes escolhidos ao acaso em diferentes áreas do Campus, 38 sistemas (lâmpada, reator, capacitor e ignitor) apresentavam falhas graves dos componentes, o que causava o não funcionamento do poste ou um significativo aumento da corrente em relação à corrente nominal calculada. Pelo objetivo ser a determinação do comportamento médio do sistema em condições de manutenção aceitáveis, estes 38 sistemas foram desconsiderados.

Dos 23 sistemas restantes, os 13 que tinham condições físicas e mínimas de segurança para serem testados foram escolhidos para uma análise em laboratório da corrente ao longo do tempo da partida do sistema até a estabilização da corrente.

Outros cinco postes mais deteriorados, diferentes dos supracitados 61, foram escolhidos aleatoriamente para uma análise *in loco* da potência pelo período de 20 minutos com o uso de equipamento *True RMS*, cujos resultados são apresentados na Tabela 9, apresentando uma potência média de funcionamento em regime permanente de 407 VA.

Tabela 9 – Potências dos sistemas (lâmpada, reator, capacitor e ignitor) com considerável grau de deterioração aferidas *in loco* (potência nominal da lâmpada igual a 250 W).

Tempo [s]	Pot. média [VA]	P1 [VA]	P2 [VA]	P3 [VA]	P4 [VA]	P5 [VA]
1	546	746	469	426	383	708
15	546	746	469	426	383	707
30	529	724	447	405	362	708
45	478	618	415	351	298	707
60	427	511	385	300	234	706
420	407	512	383	298	236	606
1200	407	511	383	299	234	605

Fonte: Feito pelo autor.

As Tabelas 10 e 11 apresentam as correntes aferidas nos sistemas de número 1 a 13 no período entre 1 segundo e 600 segundos. Além dos dados de corrente ao longo do tempo, cada uma das 13 medições foi realizada com o acompanhamento da tensão, sendo apresentado nas tabelas o valor médio da tensão durante as medições nos 600 segundos, a temperatura de operação da lâmpada após atingir o regime permanente, a potência ativa em regime permanente aferida com wattímetro e o fator de potência.

Tabela 10 - Parâmetros dos sistemas numerados de 1 a 7 aferidas em laboratório.

Tempo [s]	R1 [A]	R2 [A]	R3 [A]	R4 [A]	R5 [A]	R6 [A]	R7 [A]
1	3,37	1,94	1,72	2,94	1,57	3,66	1,56
15	3,37	1,62	1,73	2,95	1,55	3,68	1,55
30	3,37	1,63	1,73	2,94	1,56	3,68	1,56
45	3,37	1,60	1,75	2,94	1,58	3,70	1,53
60	3,36	1,59	1,76	2,92	1,59	3,70	1,52
75	3,35	1,54	1,74	2,83	1,56	3,69	1,48
90	3,34	1,53	1,69	2,80	1,54	3,66	1,45
105	3,30	1,48	1,66	2,70	1,51	3,57	1,39
120	3,28	1,46	1,61	2,58	1,51	3,51	1,34
135	3,25	1,43	1,57	2,48	1,49	3,49	1,30
150	3,21	1,41	1,55	2,42	1,45	3,45	1,29
165	3,21	1,40	1,50	2,36	1,51	3,42	1,27
180	3,18	1,40	1,48	2,34	1,49	3,37	1,26
195	3,17	1,38	1,47	2,31	1,47	3,33	1,26
210	3,13	1,37	1,45	2,29	1,44	3,28	1,26
225	3,10	1,37	1,43	2,26	1,41	3,24	1,26
240	3,07	1,36	1,42	2,24	1,38	3,21	1,25
300	2,97	1,34	1,40	2,18	1,34	3,19	1,24
420	2,89	1,33	1,38	2,26	1,33	2,98	1,23
600	2,88	1,33	1,38	2,25	1,29	2,99	1,24
Tensão [V]	211	210,5	210,5	207,2	210	210	209
Temperatura [°C]	170	178	178	164	179	176,5	164
P. ativa em 600 s [W]	215	208	208	220	210	200	210
FP	0,357	0,749	0,720	0,468	0,782	0,320	0,808

Fonte: Feito pelo autor.

Tabela 11 - Parâmetros dos sistemas numerados de 8 a 13 aferidas em laboratório.

(continua)

Tempo [s]	R8 [A]	R9 [A]	R10 [A]	R11 [A]	R12 [A]	R13 [A]
1	2,19	2,65	2,31	3,06	3,37	2,18
15	2,19	2,71	2,28	3,07	3,36	2,19
30	2,20	2,72	2,27	3,06	3,36	2,19
45	2,20	2,70	2,30	3,03	3,38	2,20
60	2,20	2,65	2,31	2,93	3,38	2,19
75	2,19	2,59	2,34	2,92	3,36	2,18
90	2,18	2,55	2,30	2,88	3,33	2,17
105	2,17	2,46	2,30	2,76	3,29	2,14
120	2,14	2,35	2,26	2,66	3,25	2,10
135	2,12	2,29	2,23	2,57	3,20	2,08
150	2,07	2,25	2,22	2,52	3,10	2,05
165	2,05	2,24	2,18	2,53	3,09	2,01
180	2,03	2,20	2,18	2,47	2,99	1,99
195	2,00	2,16	2,16	2,43	2,94	1,97
210	1,98	2,13	2,13	2,40	2,88	1,96

Tabela 11 - Parâmetros dos sistemas numerados de 8 a 13 aferidas em laboratório.
(continuação)

Tempo [s]	R8 [A]	R9 [A]	R10 [A]	R11 [A]	R12 [A]	R13 [A]
225	1,97	2,11	2,10	2,38	2,81	1,92
240	1,93	2,09	2,08	2,37	2,76	1,92
300	1,88	2,00	2,02	2,36	2,67	1,87
420	1,78	2,03	1,94	2,33	2,55	1,76
600	1,77	2,04	1,93	2,34	2,50	1,67
Tensão [V]	209	209	209	209	209	210
Temperatura [°C]	162,5	177	175	161	174,5	170
P. ativa em 600 s [W]	220	210	200	215	215	215
FP	0,596	0,492	0,496	0,439	0,411	0,617

Fonte: Feito pelo autor.

Tais sistemas apresentaram, portanto, em regime permanente a uma tensão média de 209,5 V durante os testes, uma temperatura média de operação de 171,5 °C, uma potência ativa média de 211,2 W e um fator de potência médio de 0,513, com potência aparente média de 412 VA.

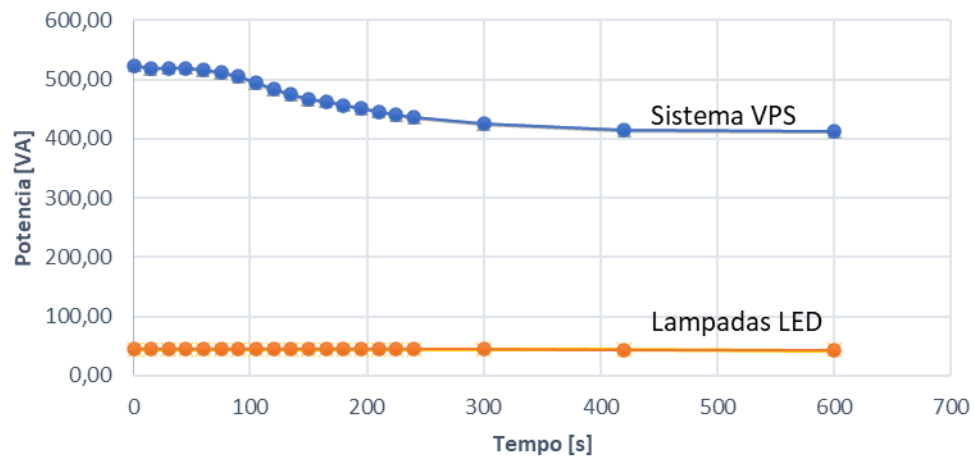
Todas as 124 lâmpadas LED de 40 W e 45 W utilizadas na substituição dos sistemas de vapor de sódio foram testadas e apresentam corrente estável desde a partida e com diferenças inferiores a 4% na corrente entre uma lâmpada e outra, sendo que as de 40 W apresentaram uma potência aparente média de operação de 44 VA e as de 45 W uma potência aparente média de operação de 46 VA.

Das 124 lâmpadas LED supracitadas 91 tem a potência nominal de 40 W e 33 a potência nominal de 45 W, para fins de cálculos foi utilizada média ponderada para obter o valor médio de potência aparente de 44,5 VA.

Quanto às lâmpadas fluorescentes tubulares, estas apresentavam uma potência nominal de 40 W por lâmpada e fator de potência nominal de 0,92, portanto, uma potência aparente de 43,5 VA, o que fora constatado por testes em sistemas em funcionamento aleatoriamente escolhidos. Destas, 332 foram substituídas por lâmpadas LED tubulares de potência nominal de 18 W e potência aparente média aferida de 19,5 VA. Assim, tem-se que a economia média das lâmpadas tubulares fluorescentes em relação às lâmpadas do mesmo formato LED é de 55,2%.

Realizando a comparação de potência ao longo do tempo da média de todas as medições realizadas no sistema de vapor de sódio e no novo sistema LED de lâmpadas externas foi obtido o gráfico apresentado na Figura 18.

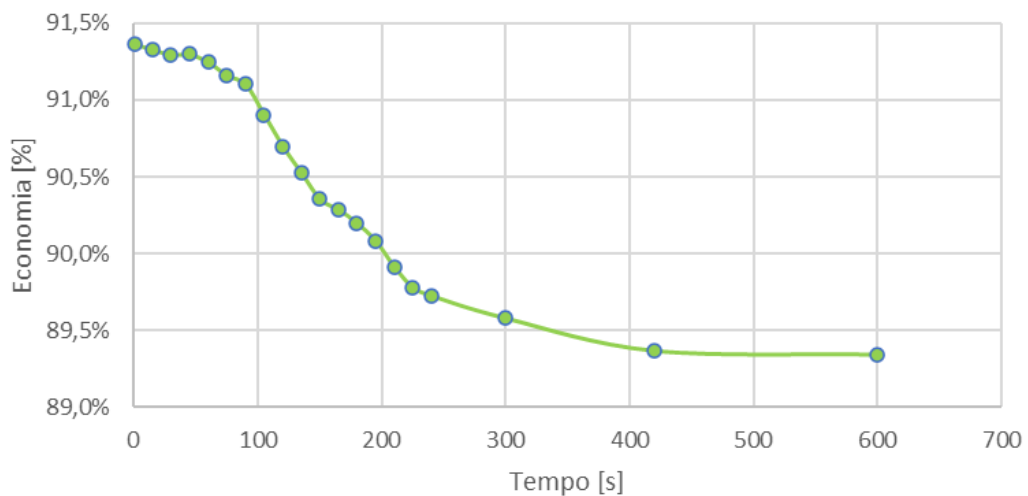
Figura 18 – Comparação de potência média pelo tempo dos sistemas de Vapor de Sódio e LED.



Fonte: Feito pelo autor.

Com esta comparação foi possível estipular a economia média por poste modernizado entre a partida e o regime permanente apresentado no gráfico da Figura 19.

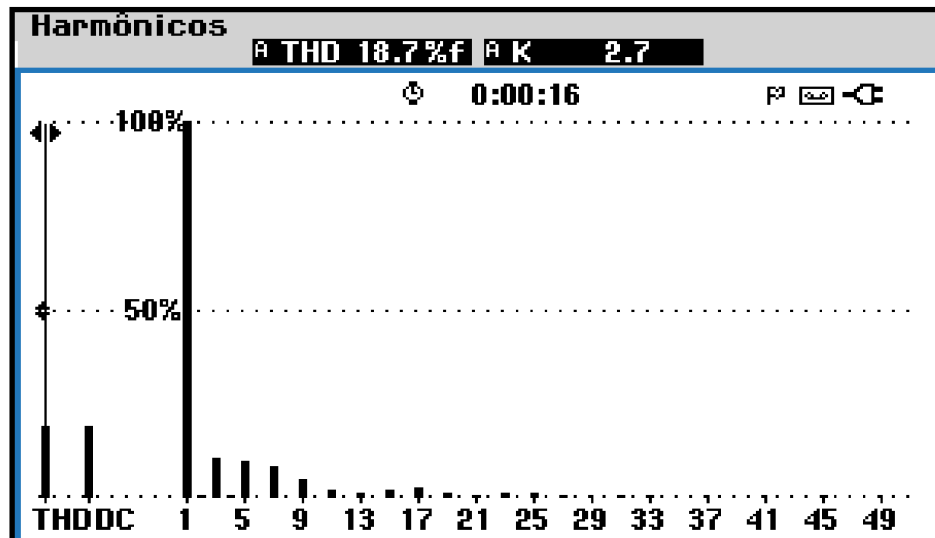
Figura 19 – Gráficos de economia média por poste da partida ao regime permanente.



Fonte: Feito pelo autor.

Uma amostra de 10 das lâmpadas LED instaladas no processo de modernização do sistema de iluminação do Campus foram testadas com o uso de um medidor de qualidade de energia e, conforme apresentado na Figura 20, a Taxa de Distorção de Harmônicos (TDH) aferida nas lâmpadas foi, em todos os casos, inferior a 20%.

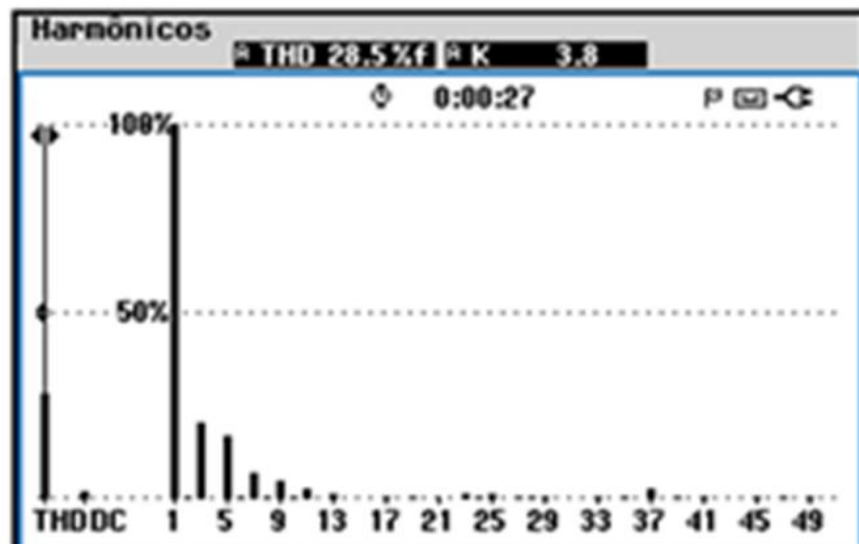
Figura 20 – Taxa de Distorção de Harmônicos de uma das lâmpadas LED no gráfico de porcentagem versus harmônicos.



Fonte: Captura de tela feita pelo autor de medidor de qualidade de energia (2017).

Os testes realizados *in loco* em alguns dos postes do sistema vapor de sódio resultaram, em todos os casos, em TDHs superiores a 25%, conforme exemplo apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Taxa de Distorção de Harmônicos de um dos sistemas Vapor de Sódio no gráfico de porcentagem versus harmônicos.



Fonte: Captura de tela feita pelo autor de medidor de qualidade de energia (2017).

4.1.2 Sistemas de Ar Condicionado

Após o levantamento apontado nas Tabelas 5, 6 e 7, iniciou-se o processo gradual de substituição dos equipamentos de ar condicionado do Campus de aparelhos com compressor convencional que utilizavam o gás prejudicial ao meio ambiente R-22 para aparelhos com

tecnologia de compressor Inverter que utilizam o gás inerte R-410A e que possuem eficiência até 75% superior aos modelos anteriores.

Tal processo iniciou-se com o reinvestimento da economia gerada pela Iniciativa Ponto Iluminado para a aquisição de 20 aparelhos para a substituição dos aparelhos de maior potência mais antigos do Campus e pretende-se substituir todos os 457 aparelhos convencionais restantes por equipamentos mais eficientes e menos nocivos ao meio ambiente.

4.1.3 Educação e conscientização

Mesmo com um sistema eficiente, os usuários deste são os principais agentes responsáveis pela economia. Tendo isso em foco, em associação as ações técnicas de modernização e aumento da eficiência do sistema, foram realizadas mais de 50 palestras, aulas e visitas técnicas às instalações do projeto para a conscientização da população local e dos usuários das dependências do Campus a respeito de ações de sustentabilidade e eficiência energética.

Mini cursos e situações práticas foram desenvolvidas com os alunos da FEG e de seu colégio técnico visando à participação da comunidade interna e sua sensibilização para maior impacto do projeto.

Ademais, professores e funcionários do Campus também foram informados e educados quanto às ações para a diminuição do consumo de energia elétrica, essas associadas a campanhas e divulgações através de redes sociais.

4.2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Tendo um sistema mais eficiente após os processos apontados no item 4.1, iniciou-se o desenvolvimento do sistema de geração de energia solar fotovoltaica *on-grid* com 3 principais finalidades: a geração de energia sem a emissão de poluentes dentro da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, o aprofundamento dos estudos a respeito da tecnologia *on-grid* e sua comparação com o sistema *off-grid* (Apêndice A) e o uso de suas instalações como um *showroom* de energia renovável e sustentabilidade aberto à população local.

4.2.1 Localização da estrutura de geração

A estrutura *on-grid* do projeto foi desenvolvida para a injeção de energia elétrica na rede do Campus de modo a reduzir o consumo de energia elétrica proveniente da rede em virtude desta geração sem emissão de poluentes, projetada utilizando o método da insolação diária,

junto a uma ampla análise da região possível para a construção, de modo a escolher a área disponível com menos sombra dentro do Campus.

Conforme apresenta a Figura 22, a estrutura localizada na latitude $22^{\circ}48'09''$ S e na longitude $45^{\circ}11'29'$ O é formada por 18 painéis fotovoltaicos de 320 Wp instalados em duas estruturas distintas, sendo uma fixa de 2,8 metros de altura com 10 painéis e outra móvel no eixo horizontal com 1,5 metro de altura com 8 painéis, todos conectados em uma central de comando sob os 10 painéis.

Figura 22 – Estrutura de geração *on-grid* do projeto “FEG-Sustentável”

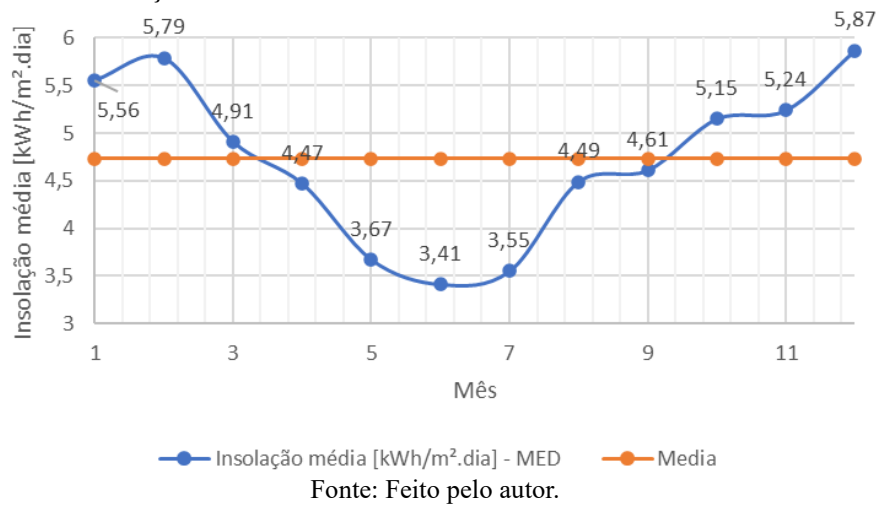


Fonte: O autor (2019).

A localização foi concebida de forma que pudesse receber a máxima insolação possível dentro de uma região próxima à subestação da Faculdade de modo que a energia gerada facilmente fosse injetada na rede.

De acordo com o Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRECESB) do Ministério de Minas e Energia do Governo Brasileiro, a insolação média registrada pelos dados das três estações de medição mais próxima das coordenadas da instalação é de $4,73 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ (CRECESB, 2018), apresentando a variação mensal média exposta no gráfico da Figura 23.

Figura 23 – Insolação média diária.

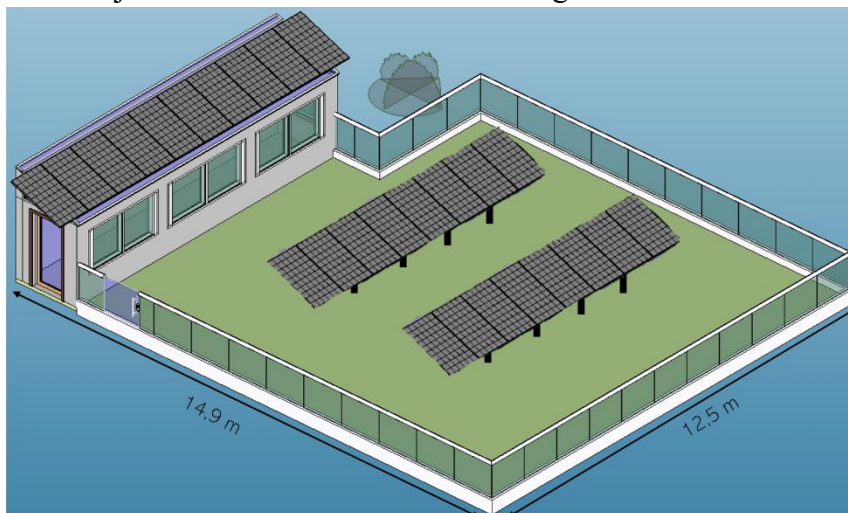


4.2.2 Projeto de geração fotovoltaica

O projeto de geração fotovoltaica visa o máximo aproveitamento da área disponibilizada pela FEG para a criação do *showroom* de energia fotovoltaica com finalidade de autogeração, pesquisa e divulgação. Portanto, a área foi projetada para a inserção do máximo possível de painéis sem que houvesse interferência entre as diferentes atividades que o local foi projetado para abrigar.

Conforme apresenta a Figura 24, uma estrutura central em alvenaria cuja cobertura é feita com 10 painéis fotovoltaicos e com a finalidade de abrigar todos os equipamentos elétricos de medição, controle e proteção e de servir como central de visitação foi projetada adjacente à área livre cercada por vidros de 160 m² com capacidade para abrigar mais 16 painéis fotovoltaicos.

Figura 24 – Projeto da área do Showroom de energias renováveis.



Fonte: Adaptado de MARQUES (2018).

Dezoito painéis fotovoltaicos de 320 Wp foram instalados no local, sendo dez na cobertura da estrutura de alvenaria e outros oito em uma estrutura de aço galvanizado fixada no solo a uma distância igual ao dobro da altura da estrutura a frente para evitar áreas de sombra.

Outra estrutura de solo idêntica com capacidade para oito painéis fotovoltaicos, conforme mostra a Figura 25, também foi instalada no local para futura ampliação do sistema com o uso de microinversores.

Figura 25 – Estrutura para ampliação.



Fonte: O autor (2019).

Utilizando a inclinação apresentada na Tabela 2, e com os dados de localização da seção 4.2.1, todos os painéis fotovoltaicos foram instalados com o ângulo de inclinação de 27°.

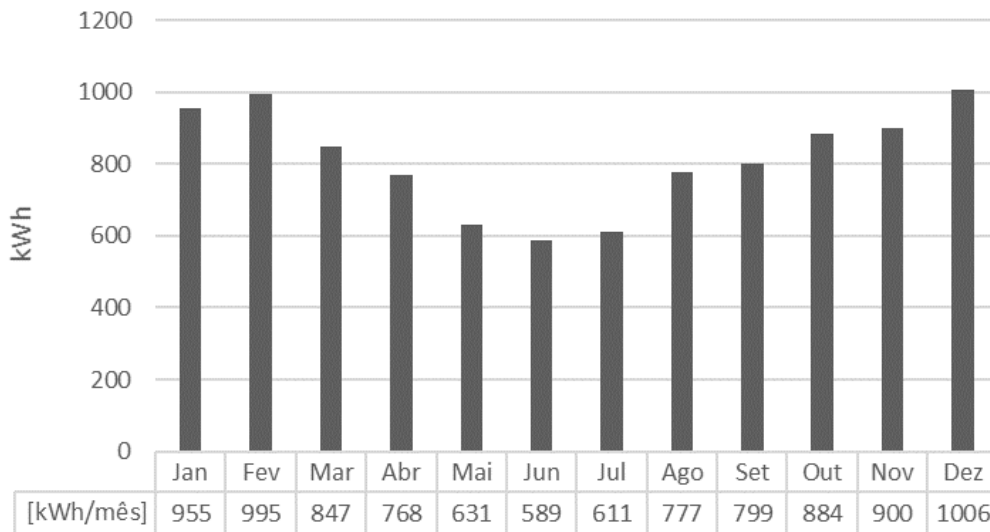
Os dados de placa indicam que a eficiência de cada painel fotovoltaico utilizado é de 16,5% e a área de útil de geração é de 1,94 m², calculou-se a estimativa de geração diária de cada painel utilizando a equação (1) e os dados de insolação diária apresentados na Figura 28.

$$E_p = E_s \cdot A_m \cdot \eta_m = 5,52 \cdot 1,94 \cdot 0,165$$

$$E_p = 1,768 \frac{\text{kWh}}{\text{painel} \cdot \text{dia}}$$

Considerando a geração dos 18 painéis pelo período de 30 dias com os dados da Figura 23 e utilizando o mesmo método de cálculo da equação (1), foi elaborado o gráfico de estimativa de geração apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Gráfico de estimativa de geração da central *on-grid* sem perdas.



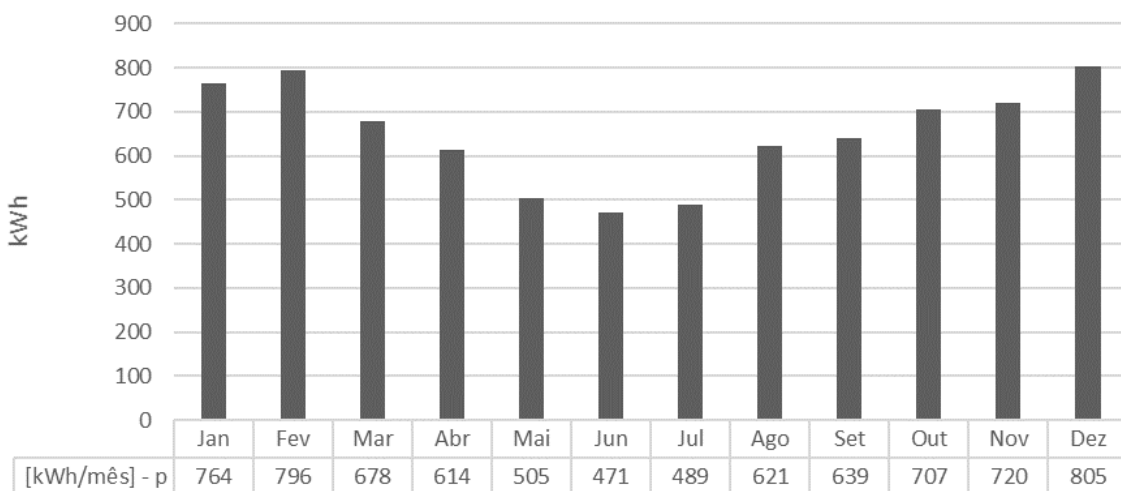
Fonte: Feito pelo autor.

Tendo como base o estudo realizado por Gostein et al. (2014) a respeito de acúmulo de poeira sobre os painéis e sua influência na geração, foi acrescentado ao cálculo um fator de degradação de 5% e o mesmo valor também foi acrescentado pela perda admissível nos cabos e conexões de acordo com as especificações do fabricante.

Devido às características estéticas que tiveram que ser seguidas em virtude do plano diretor do Campus, a estrutura está voltada a 24° oeste do norte, uma diferença de 43° em relação à posição de instalação recomendada, o que resulta em uma perda na geração estimada em 10% nos cálculos.

Aplicadas as perdas supracitadas, uma nova estimativa de geração de energia mensal foi realizada, conforme apresenta a Figura 27.

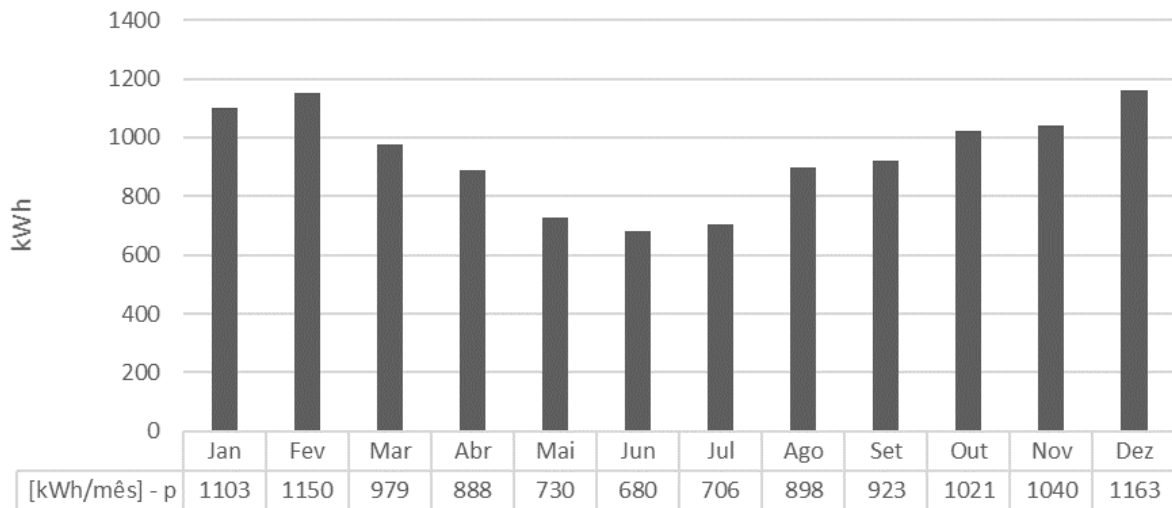
Figura 27 – Estimativa de geração mensal com perdas.



Fonte: Feito pelo autor.

Assim, a média de geração mensal esperada para o sistema com os 18 painéis fotovoltaicos é de 651 kWh/mês. Com a instalação dos oito painéis fotovoltaicos extras planejados, essa média sobe para 940 kWh/mês, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Geração estimada com o sistema a plena capacidade e descontadas as perdas.



Fonte: Feito pelo autor.

Sendo o sistema projetado para que 18 painéis fotovoltaicos fiquem conectados em um inversor *on-grid* e os outros oito sejam conectados em outros dois microinversores em uma expansão futura.

Utilizando a equação (3) tem-se que a potência nominal do inversor conectado aos 18 painéis deverá ser superior a 4.608 W.

$$P_i \geq 0,8 \cdot \sum P_M \geq 0,8 \cdot (18 \cdot 320)$$

$$P_i \geq 4.608 \text{ W}$$

Assim, foi escolhido o inversor homologado da marca Elgin com saída bifásica de 220 V e potência nominal de 5.000 W.

Também utilizando a equação (3) tem-se que a potência nominal do inversor conectado aos outros 8 painéis deverá ser superior a 2.048 W.

$$P_i \geq 0,8 \cdot \sum P_M \geq 0,8 \cdot (8 \cdot 320)$$

$$P_i \geq 2.048 \text{ W}$$

Assim, os outros dois microinversores a serem instalados futuramente terão potência nominal de 1.200 W, cada.

4.2.3 Projeto do cabeamento

Todos os cabos utilizados na usina fotovoltaica são de cobre com isolamento de PVC homologados pelo INMETRO e inspecionados visualmente antes de sua instalação.

Os cabos das diferentes funções do projeto apresentam distâncias e temperaturas de operação diferentes e para fins de cálculos sempre foi considerada a pior situação possível para o dimensionando dos cabos a serem utilizados em cada função.

A Tabela 12 apresenta o circuito e a seção transversal dos cabos utilizados no projeto, sendo o dimensionamento detalhado desses apresentados no Apêndice B.

Tabela 12 – Cabos dimensionados para os diferentes sistemas.

Circuito	Fase I Positivo (mm²)	Fase I Positivo (cor)	Fase II Negativo (mm²)	Fase II Negativo (cor)	Terra Verde (mm²)
Painéis superiores	2,5	Vermelho	2,5	Preto	4
Painéis inferiores	4	Vermelho	4	Preto	4
Microinversores	4	Amarelo	4	Amarelo	4
Iluminação interna	1,5	Amarelo	1,5	Amarelo	Não há
Iluminação externa	1,5	Vermelho ou Branco	1,5	Vermelho ou Branco	2,5
Comando e alarme	0,75	Vermelho	0,75	Preto	Não há
Arrefecimento externo	4	Amarelo	4	Amarelo	4
Inversor	6	Vermelho	6	Vermelho	6
Conexão com a rede	10	Preto	10	Preto	Não há

Fonte: Feito pelo autor.

4.2.4 Projeto dos sistemas de proteção

Seguindo o dimensionamento de cabos realizado na seção anterior e as recomendações dos fabricantes os disjuntores bipolares instalados na parte de corrente alternada são os listados na Tabela 13.

Tabela 13 – Lista dos disjuntores de corrente alternada instalados.

Circuito	Quadro	Identificação	Corrente nominal
Microinversor leste	Distribuição	5	10 A
Microinversor oeste	Distribuição	5	10 A
Microinversores geral	Distribuição	5	20 A
Ar Condicionado	Distribuição	5	20 A
Iluminação de emergência	Distribuição	5	16 A
Horímetro de geração	Distribuição	5	4 A
Horímetro total	Distribuição	5	4 A
Geral	Comando	4	50 A
Iluminação interna	Comando	4	10 A
Iluminação externa	Comando	4	16 A
Ventilação	Comando	4	10 A
Tomadas	Comando	4	25 A
Inversor	Inversor	3	25 A

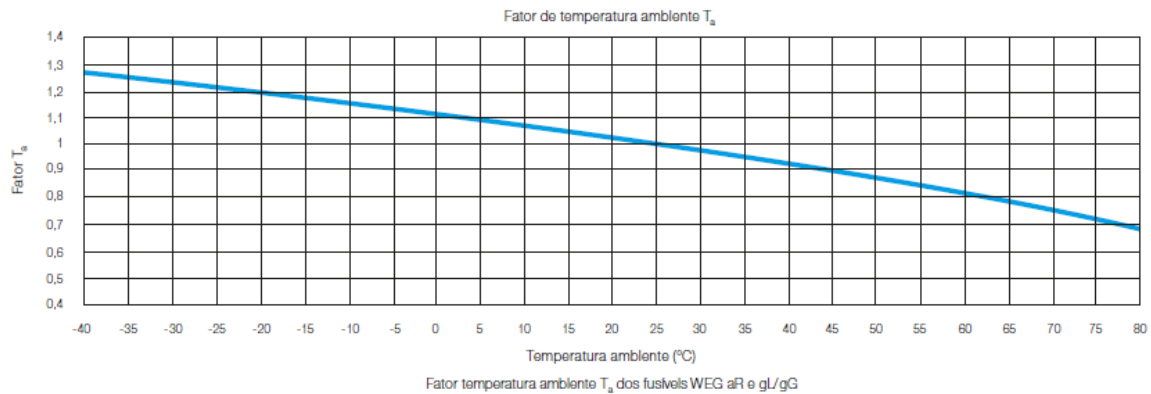
Fonte: Feito pelo autor.

Além dos disjuntores bipolares, na parte de corrente alternada foram usados quatro fusíveis do tipo NH00, sendo dois de 10 A no quadro de Comando (4) para a proteção do circuito de alarme, sendo escolhido para impedir o desarme em caso de invasão e dois de 25 A na saída do inversor no quadro do Inversor (3) antes do disjuntor para a prevenção contra qualquer tipo de curto-circuito que possa acarretar na injeção de corrente contínua na rede de corrente alternada em caso de falha do sistema de proteção interno do inversor, visto que o fusível utilizado é capaz de fornecer proteção tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada, enquanto o disjuntor tem proteção somente para corrente alternada.

Na proteção do sistema de corrente alternada foram utilizados fusíveis NH00 de 15 A, todos no quadro de Proteção (2), para a ligação série entre cada um dos painéis, permitindo, assim, uma proteção modularizada que torna mais simples o processo de aquisição de dados de tensão individual de cada painel fotovoltaico bem como a retirada de painéis do sistema em caso de falha dentro do próprio quadro através de um *by-pass*, sem a necessidade de alterações estruturais no sistema durante a manutenção do painel com defeito.

Tendo em vista a temperatura de operação máxima no quadro de proteção de 55 °C, de acordo com a curva do fusível utilizado apresentada na Figura 29, este tem um percentual de cerca de 15% entre a corrente nominal e a de atuação.

Figura 29 – Curva de correção dos fusíveis WEG em relação a temperatura ambiente.



Fonte: WEG (2017).

Os painéis são divididos em dois grupos de nove módulos em série, cada um com tensão de operação de 330 V em corrente contínua e corrente nominal de operação máxima de 9 A.

Cada um desses dois grupos é conectado a fusíveis Diazed de 16 A com a mesma curva apresentada na Figura 29 e a disjuntores de corrente contínua também de 16 A que permitem a manobra do sistema em plena carga, ambos os sistemas instalados no quadro de Proteção (2).

4.2.5 Sistemas de aquisição de dados

Os sistemas de aquisição de dados foram projetados para permitir a aquisição de dados e monitoramento do funcionamento de todas as etapas e quadros do sistema de geração da central.

Diversos medidores são analógicos de precisão para permitirem tanto a aquisição para a pesquisa, bem como a ilustração do funcionamento de forma didática para os visitantes que, em sua maioria, são leigos no assunto.

A tensão pode ser monitorada em cada um dos painéis fotovoltaicos individualmente, permitindo a análise de eficiência e a identificação de falhas, em cada um dos dois conjuntos de nove painéis, na entrada da rede, nos microinversores e, ainda, no circuito do ar condicionado.

A corrente pode ser monitorada em cada conjunto de painéis fotovoltaicos, na saída do inversor, na saída dos microinversores, no circuito do ar condicionado e no disjuntor geral.

No caso da temperatura, esta é aferida no quadro do inversor, no quadro de comando e na eletrocalha principal da central de geração e o aumento destas ativam sistemas independentes de ventilação forçada em diferentes pontos da central.

Além desses sistemas que permitem a aquisição presencial de dados e o controle de algumas funções, o inversor *on-grid* instalado registra os dados de tensão, corrente e potência de geração de forma remota em um sistema *on-line*.

Conforme apresentado na Figura 30, a maior parte dos mostradores dos sistemas de aquisição de dados ficam instalados nas tampas dos quadros de modo a facilitar a visualização e aumentar a segurança durante a aquisição destes.

Figura 30 – Interior da central de geração.



Fonte: O autor (2020).

Da esquerda para a direita na Figura 30 estão instalados os quadros de Medição (1), de Proteção (2), do Inversor (3), de Comando (4) e de Distribuição (5). Possuindo, ainda, o quadro de Iluminação (6) não mostrado na Figura.

Além de equipamentos de aquisição de dados, todos os quadros possuem sinaleiros luminosos que permitem a verificação do correto funcionamento ou da identificação de falhas em todos os estágios de funcionamento do sistema.

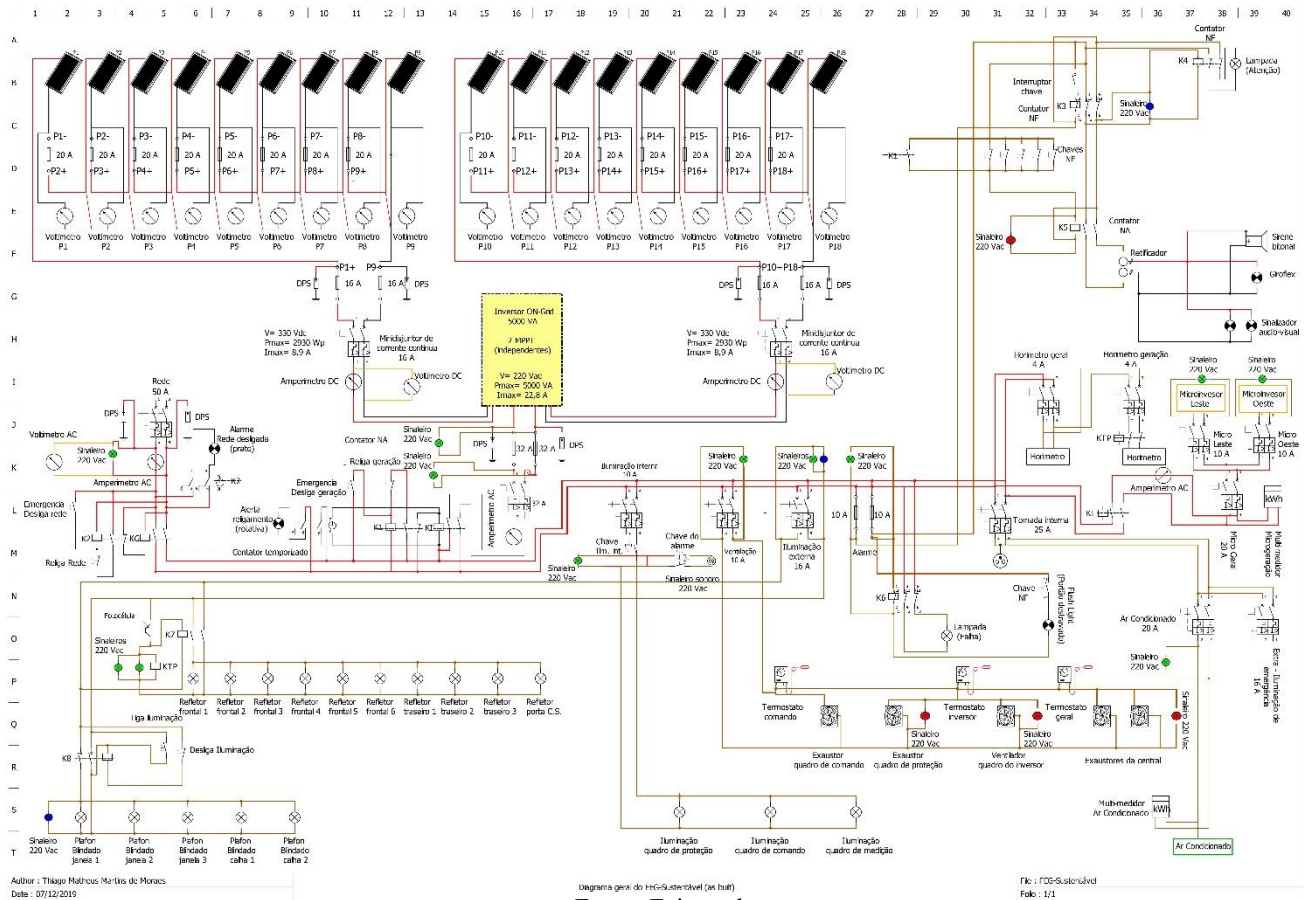
4.2.6 Projeto do sistema de controle e comando

O sistema de controle e comando da central de geração fotovoltaica foi projetado de modo que o funcionamento do sistema seja independente da interferência humana.

O acionamento do contator de iluminação externa é realizado por uma fotocélula e todos os seis sistemas de ventilação e arrefecimento possuem controladores de temperatura com religamento automático sem perda das configurações e acionamento automático do sistema.

Conforme apresentado no esquemático da Figura 31, todos os contadores de potência são capazes de fazer o religamento automático de todos os sistemas da central em caso de falta de energia elétrica sem a necessidade de qualquer comando externo, sendo que o religamento não ocorre caso qualquer botoeira de emergência esteja acionada.

Figura 31 – Diagrama geral do sistema de geração (ver no Anexo I em dimensões maiores).



As botoeiras de emergência podem desenergizar somente a geração ou toda a central permitindo o seccionamento do sistema com maior segurança.

O sistema de alarme em caso de violação do sistema não seccionado é capaz de funcionar independentemente da desenergização do sistema, com o propósito de proteger a vida e o patrimônio. Podendo ser desativado apenas com o uso de uma chave com segredo específico.

Na situação de acionamento da botoeira de emergência de desenergização do sistema, caso este não seja seccionado em 15 segundos, uma sirene tipo prato é disparada para alertar a possibilidade de religamento automático em caso de destravamento da botoeira.

Ainda, no procedimento de religação uma sirene rotativa soa por 15 segundos enquanto o inversor é reinicializado para alertar sobre a injeção de corrente na rede elétrica.

4.2.7 Dados e análise da geração fotovoltaica

O sistema de aquisição de dados anteriormente citado possibilita a análise de diferentes parâmetros da geração fotovoltaica e sua comparação com as estimativas previamente

calculadas, o que permite determinar o desempenho do sistema e encontrar formas de aprimorá-lo.

4.2.7.1 Ajuste da corrente de entrada do inversor

Nas primeiras coletas de dados realizadas através do monitor instalado no inversor fotovoltaico da central de geração entre outubro e dezembro de 2019 notou-se, após o tratamento dos dados, que algum valor fornecido pelo sistema do inversor era incorreto, uma vez que o rendimento do equipamento, em alguns momentos, apresentava-se superior a 100%.

Assim, entre os meses de janeiro e fevereiro de 2020 foram realizadas 108 medições dos dados de tensão e corrente nas duas entradas MPPT do inversor e em sua saída utilizando um alicate amperímetro TRUE RMS de precisão, um multímetro TRUE RMS, os amperímetros e voltímetros analógicos instalados nos quadros da central de geração e o monitor de dados do inversor.

Deste modo, observou-se que, na saída do inversor, as medições de tensão e corrente apresentavam o mesmo valor em toda a instrumentação utilizada; enquanto na entrada do inversor, os valores de tensão eram os mesmos em toda a instrumentação e havia disparidades nos valores de corrente. Os amperímetros analógicos dos quadros e o alicate amperímetro apresentavam o mesmo valor de corrente, enquanto o monitor do inversor apresentava um valor distinto.

Com o aumento da corrente de entrada o erro proporcional de medição do monitor do inversor diminuía, demonstrando um erro de escala do amperímetro utilizado pelo fabricante do aparelho. Para a correção de tal problema, foram anotadas as correntes reais (através da medição pelos amperímetros) e as correntes fornecidas pelo monitor do inversor em toda a faixa de operação do sistema, de 0,4 A em sua partida até 10 A em sua plena capacidade de produção, conforme apresentado nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 – Correntes fornecidas pelo inversor e aferidas na entrada MPPT 1

(continua)

Inversor [A]	Real [A]	Delta [A]	Erro proporcional [%]
0	0,90	0,90	100
0	0,75	0,75	100
0	0,55	0,55	100
0,32	1	0,68	68
0,51	1	0,49	49
0,55	1,04	0,49	47
0,62	1,14	0,52	46
0,66	1,15	0,49	43
0,67	1,14	0,47	41
0,71	1,19	0,48	40
1,01	1,85	0,84	45
1,01	1,70	0,69	41
1,08	1,57	0,49	31
1,20	1,68	0,48	29
1,34	2,04	0,70	34
1,51	1,98	0,47	24
1,71	2,22	0,51	23
2,09	2,28	0,19	8
2,11	2,65	0,54	20
2,12	2,80	0,68	24
2,20	2,92	0,72	25
2,29	2,74	0,45	16
2,39	2,91	0,52	18
2,72	3,60	0,88	24
2,91	3,37	0,46	14
3,09	3,60	0,51	14
3,16	3,69	0,53	14
3,37	3,79	0,42	11
3,43	4,10	0,67	16

Tabela 14 – Correntes fornecidas pelo inversor e aferidas na entrada MPPT 1.
(continuação)

Inversor [A]	Real [A]	Delta [A]	Erro proporcional [%]
3,61	4,05	0,44	11
3,91	4,41	0,50	11
4,24	4,72	0,48	10
4,38	4,88	0,50	10
5,03	5,61	0,58	10
5,07	5,54	0,47	8
5,25	5,78	0,53	9
5,39	6,01	0,62	10
5,76	6,42	0,66	10
6,79	7,27	0,48	7
7,04	7,51	0,47	6
7,23	7,82	0,59	8
7,31	7,81	0,50	6
7,63	8,13	0,50	6
7,72	8,28	0,56	7
7,82	8,45	0,63	7
7,91	8,42	0,51	6
8,01	8,54	0,53	6
8,26	8,80	0,54	6
8,37	8,97	0,60	7
8,59	9,11	0,52	6
9,90	10,36	0,46	4

Fonte: Feito pelo autor.

Tabela 15 – Correntes fornecidas pelo inversor e aferidas na entrada MPPT 2

(continua)

Inversor [A]	Real [A]	Delta [A]	Erro Proporcional [%]
0	0,45	0,45	100
0	0,42	0,42	100
0	0,88	0,88	100
0	0,56	0,56	68
0,11	0,21	0,10	49
0,21	0,50	0,29	47
0,50	1,10	0,60	46
0,56	1,18	0,62	43
0,56	1,21	0,65	41
0,61	1,25	0,64	40
0,67	1,14	0,47	45
0,86	1,35	0,49	41
0,91	1,35	0,44	31
0,94	1,61	0,67	29
1,16	1,77	0,61	34
1,21	2,04	0,83	24
1,58	1,99	0,41	23
1,68	2,33	0,65	8
1,88	2,87	0,99	20
1,92	2,40	0,48	24
1,96	2,65	0,69	25
2,03	2,94	0,91	16
2,12	2,69	0,57	18
2,13	2,76	0,63	24
2,50	3,10	0,60	14
2,91	3,51	0,60	14
2,97	3,64	0,67	14
3,04	3,83	0,79	11
3,09	3,71	0,62	16

Tabela 15 – Correntes fornecidas pelo inversor e aferidas na entrada MPPT 2.

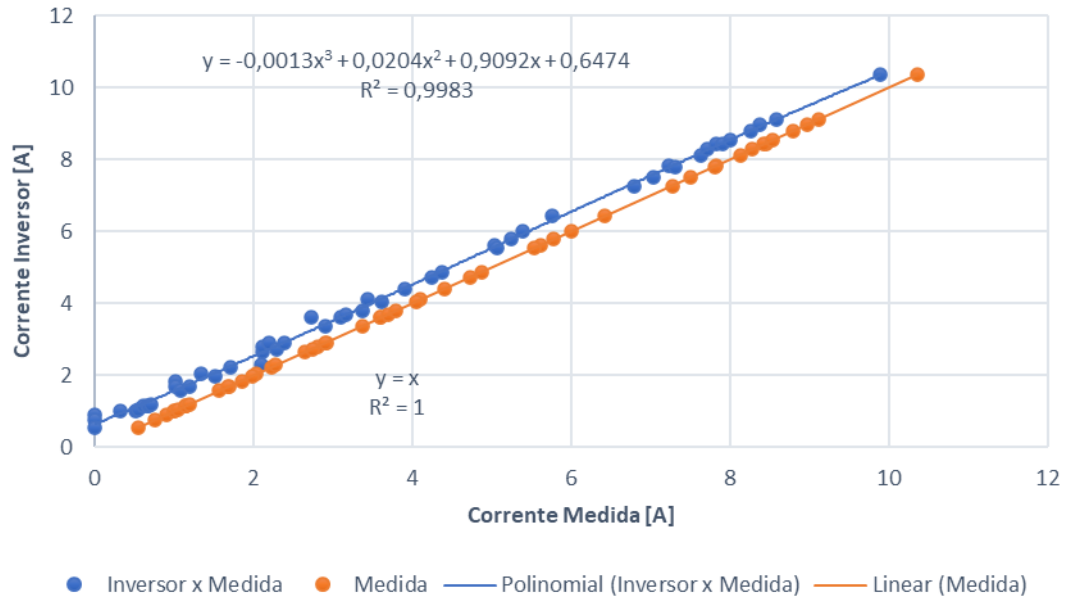
(continuação)

Inversor [A]	Real [A]	Delta [A]	Erro Proporcional [%]
3,42	3,90	0,48	11
3,63	4,26	0,63	11
3,85	4,56	0,71	10
3,93	4,59	0,66	10
4,26	4,84	0,58	10
4,44	5,07	0,63	8
5,05	5,64	0,59	9
5,21	5,88	0,67	10
5,62	6,43	0,81	10
6,88	7,46	0,58	7
6,99	7,55	0,56	6
7,25	7,93	0,68	8
7,34	7,95	0,61	6
7,66	8,26	0,60	6
7,74	8,36	0,62	7
7,83	8,43	0,60	7
7,89	8,54	0,65	6
8,01	8,59	0,58	6
8,19	8,77	0,58	6
8,33	8,94	0,61	7
8,47	9,01	0,54	6
9,81	10,54	0,73	4

Fonte: Feito pelo autor.

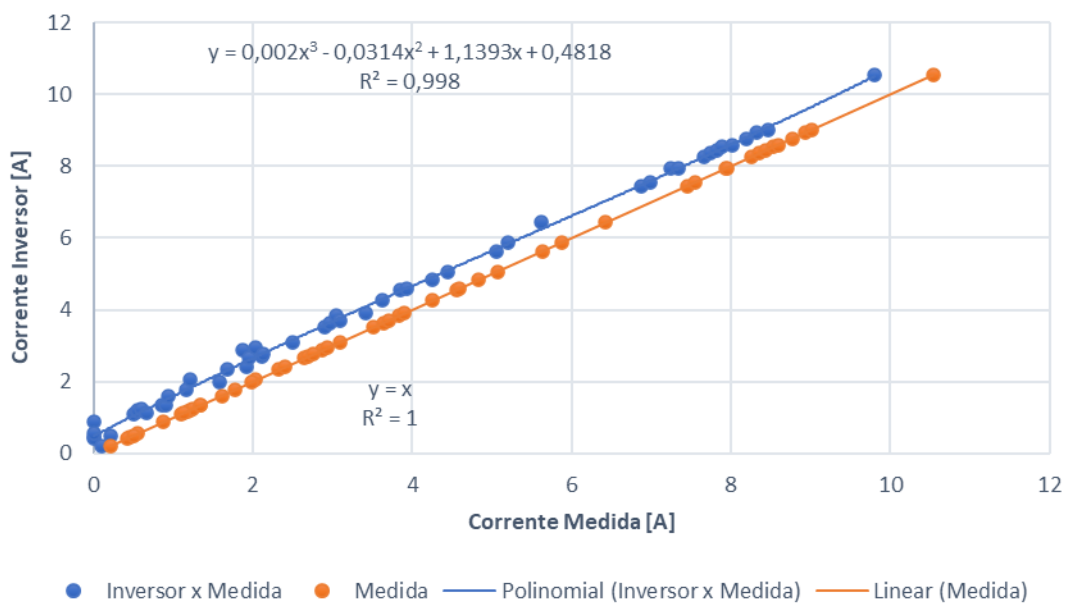
Com estes dados, foram plotados os gráficos da corrente do inversor pela corrente real (medida) e foram obtidas as equações de regressão linear para a correção da corrente medida pelo inversor fotovoltaico, conforme é apresentado nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 – Gráfico de correção e equação de regressão linear MPPT 1



Fonte: Feito pelo autor.

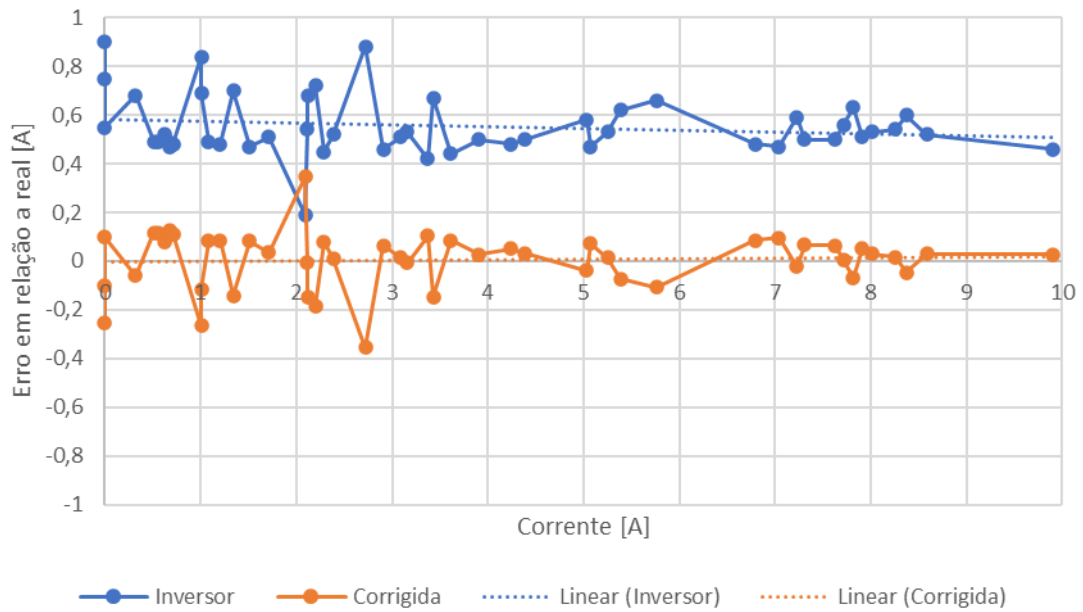
Figura 33 – Gráfico de correção e equação de regressão linear MPPT 2



Fonte: Feito pelo autor.

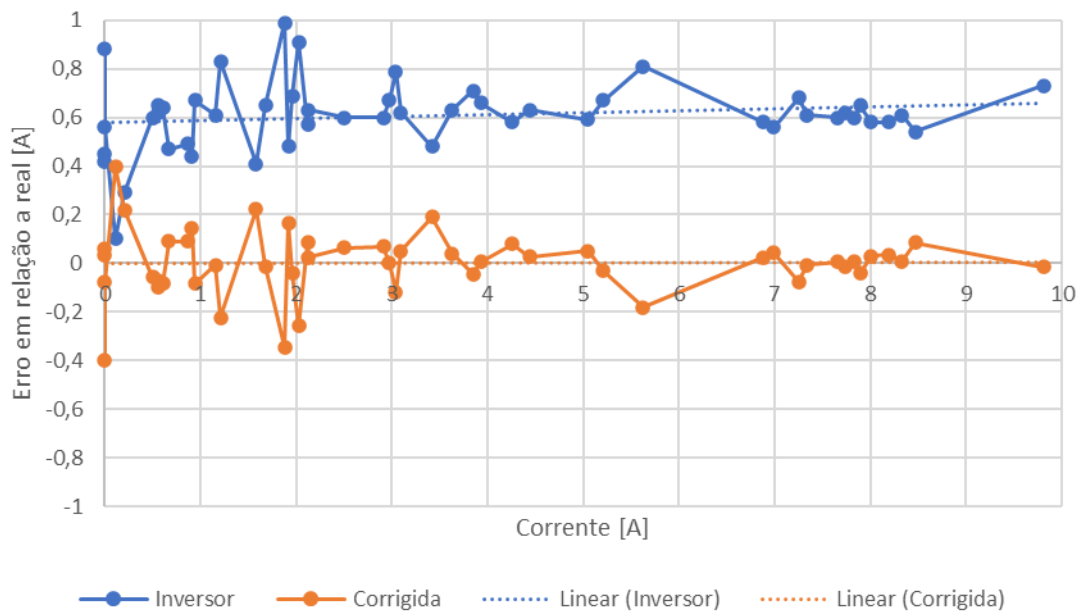
Conforme apresentado nos gráficos das Figuras 34 e 35, após a aplicação da equação de regressão linear nos valores de corrente das entradas MPPT do inversor o erro médio em relação a corrente real (medida) caiu de 0,52 A para 0,03 A na entrada MPPT 1 e de 0,61 A para 0,01 A na entrada MPPT 2.

Figura 34 – Gráfico de erros de medição de corrente antes e depois da aplicação da equação de correção da entrada MPPT 1



Fonte: Feito pelo autor.

Figura 35 – Gráfico de erros de medição de corrente antes e depois da aplicação da equação de correção da entrada MPPT 2



Fonte: Feito pelo autor.

Deste modo, as equações de correção da corrente das duas entradas MPPT do inversor foram utilizadas para todas as análises subsequentes que utilizavam estes dados de corrente.

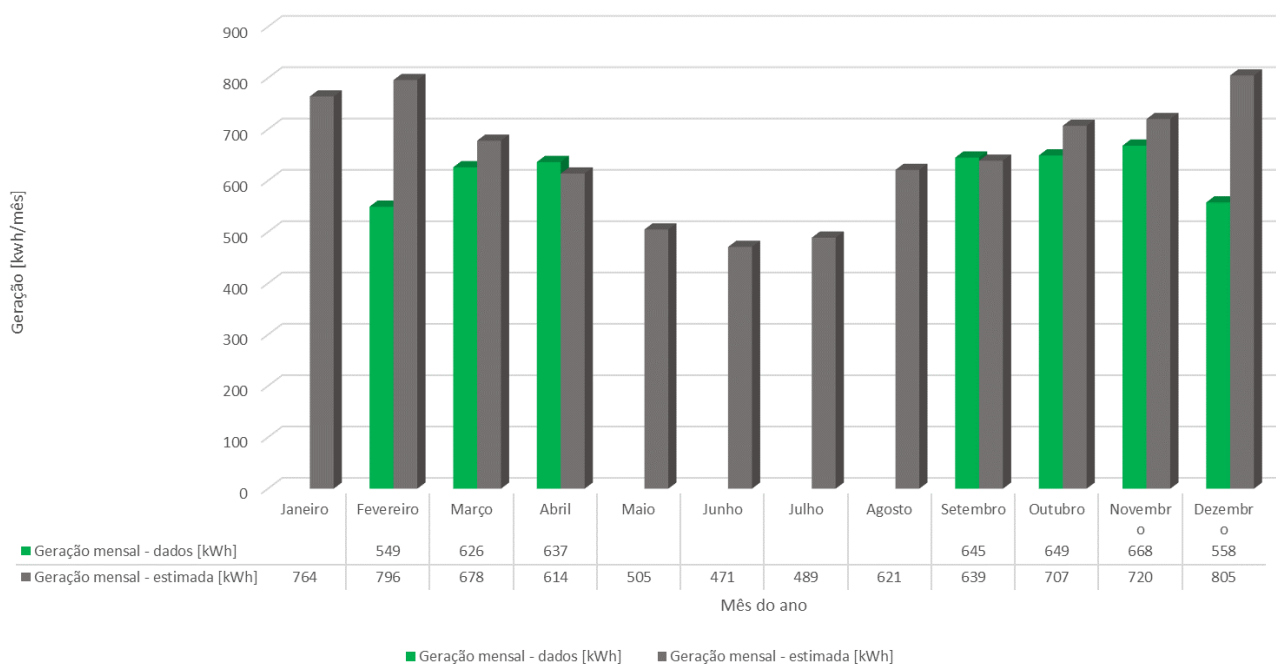
4.2.7.2 Análise da geração e comparação com a estimativa

Os dados obtidos pelo sistema *on-line* do inversor da central de geração fotovoltaica abrangem 143 dias desde o início da operação da usina em 21 de setembro de 2019, devido à intermitência no funcionamento do sistema de internet sem fio no entorno da instalação causado por problemas técnicos na rede do Campus solucionados somente em abril de 2021.

Todavia, tais dados permitiram a comparação entre a geração mensal estimada e a geração obtida nos meses de fevereiro a abril e setembro a dezembro, sendo que durante os 210 dias destes meses, somente 139 dias foram obtidos dados de geração diária, permitindo o cálculo da geração mensal obtida nestes períodos, conforme apresentado na Figura 36.

Tal cálculo foi possível realizando a média diária de geração em cada um dos meses supracitados com os dados obtidos pelo sistema de aquisição do inversor e multiplicando o valor obtido pelo número de dias no mês.

Figura 36 – Comparação entre a geração estimada e a geração real no ano de 2020.

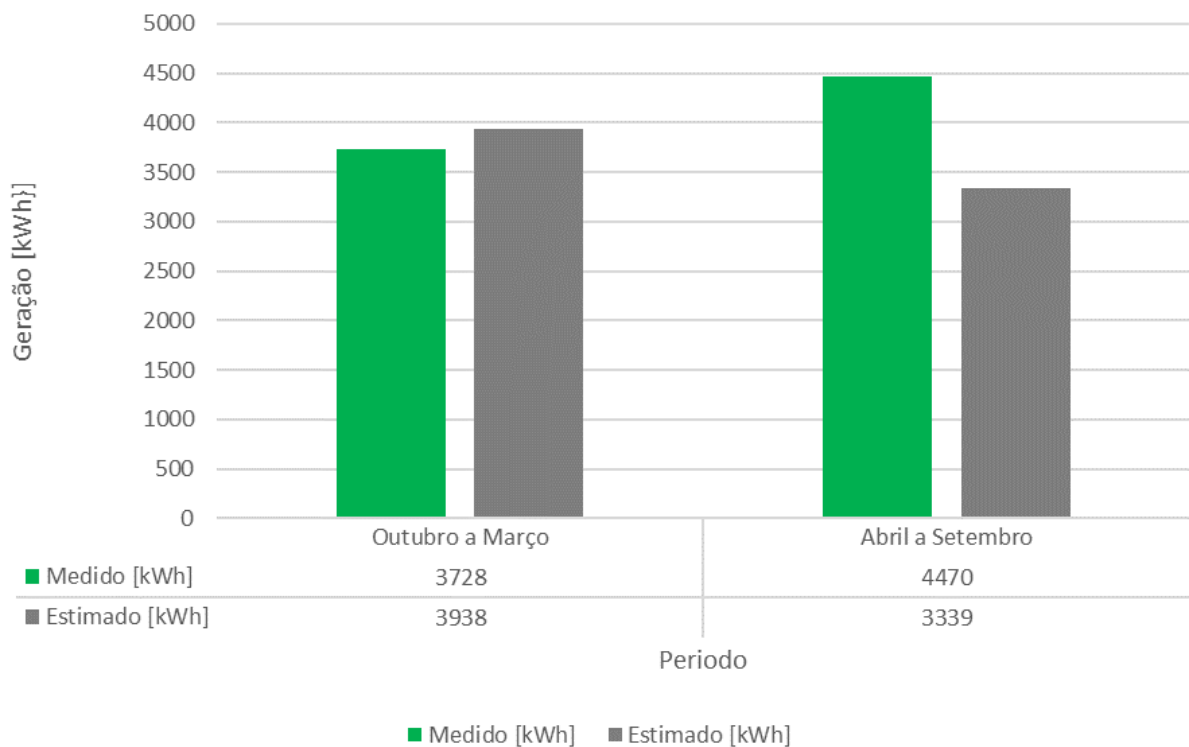


Fonte: Feito pelo autor.

Também, com a capacidade do sistema em informar os dados de geração anual acumulada e geração total acumulada, cujo valor até abril de 2021 era superior a 11 MWh, foi possível obter a geração por período; separando os dados de geração entre os meses de outubro a março e abril a setembro.

Tal análise revelou, conforme apresentado na Figura 37, que a geração no período de abril a setembro está 17,94% superior a estimativa previa e no período de outubro a março está 16,59% inferior a estimativa previa.

Figura 37 – Geração entre os períodos de outubro a março e abril a setembro com dados de 2020 e 2021.



Fonte: Feito pelo autor.

Ainda, a geração durante o ano de 2020, único ano em que a central de geração fotovoltaica operou por 12 meses, até o momento em que este texto foi redigido, foi obtida uma geração anual de 7.667 kWh, 1,82 % inferior à estimativa de geração anual de 7.809 kWh, o que equivale a 7 dias a menos de geração estimada.

Durante a análise para a definição da diferença entre a geração e a estimativa foi levado em consideração o estudo de Gostein et al. (2014) apresentado na seção 4.2.2 deste trabalho e as condições da central de geração, visto que, devido a pandemia do COVID-19, entre os meses de Março e Setembro de 2020 não foram realizadas as limpezas trimestrais dos painéis fotovoltaicos, prevista no plano de manutenção da usina, bem como não foram realizados os serviços de jardinagem na área aberta do local, o que gerou áreas de sombra e grande acúmulo de sujeira sobre os painéis.

Ainda, foi possível observar que a geração em dias e períodos mais frios era superior àquelas registradas com maiores temperaturas. Tal análise foi possível não somente pelos dados de geração obtidos pelo sistema *on-line*, mas também pela observação diária da usina realizada entre os anos de 2019 e 2021.

4.2.7.3 *Influência da temperatura no rendimento do sistema*

Conforme indicado pelo fabricante dos painéis fotovoltaicos, estes têm uma queda de 0,40% a 0,45% no rendimento para cada grau celsius acima da temperatura base de funcionamento do módulo que é de 40 °C (UPSOLAR, 2021). Com as altas temperaturas na cidade de Guaratinguetá, os módulos chegam a temperaturas de funcionamento de até 58 °C com temperaturas ambientes próximas aos 40 °C, conforme aferido com termômetro infravermelho entre os meses de setembro a dezembro de 2020, representando uma queda de rendimento de até 8,1% por painel, o que equivale a uma perda de 26 W por painel.

Assim, um dos motivos para a geração superior a estimada nos meses mais frios e inferior a estimada nos meses mais quentes é que nos cálculos, conforme a literatura, não foram consideradas as perdas pela temperatura dos painéis fotovoltaicos, bem como o fato de que na região de Guaratinguetá os meses mais quentes tem maior presença de nuvens, o que também impacta na geração.

O estudo dos dados de tensão e corrente de entrada e saída do inversor fornecidos pelo sistema e corrigidos pelo método apresentado na seção 4.2.7.1, ainda mostram uma relação entre a eficiência do inversor e a temperatura não descrita pelo fabricante ou na literatura consultada.

Para melhor avaliação deste rendimento do aparelho em relação a temperatura, foi instalado um termômetro com capacidade de armazenamento de dados que faz medições no mesmo intervalo de tempo que o sistema no interior quadro do inversor. Assim, os dados de temperatura puderam ser associados aos dados de eficiência do inversor.

Como a eficiência do inversor é, também, diretamente proporcional a sua potência de trabalho em relação a sua potência nominal, calculada na seção 4.2.2, os dados de geração foram divididos em 10 faixas de 500 W para melhor estudo de seu rendimento em relação a temperatura, especialmente porque as menores potências ocorrem no período do início da manhã e final da tarde, quando a insolação e a temperatura são menores, e as maiores no meio do dia quando a insolação é máxima, conforme demonstrado na Figura 38, que traz os gráficos de potência do sistema ao longo de uma semana de geração.

Sendo possível notar que os maiores picos de potência ocorrem em dias com maior presença de nuvens – que causam redução na potência de geração – que, geralmente, estão associadas as menores temperaturas ambiente e nos painéis.

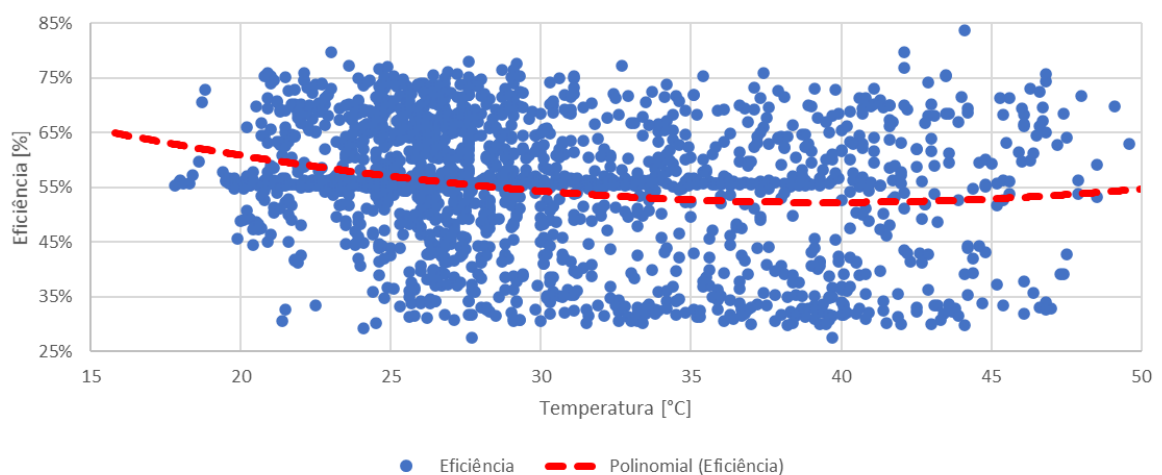
Figura 38 – Gráfico de potência semanal do sistema em março de 2021.



Fonte: Sistema Ponto Iluminado – do autor.

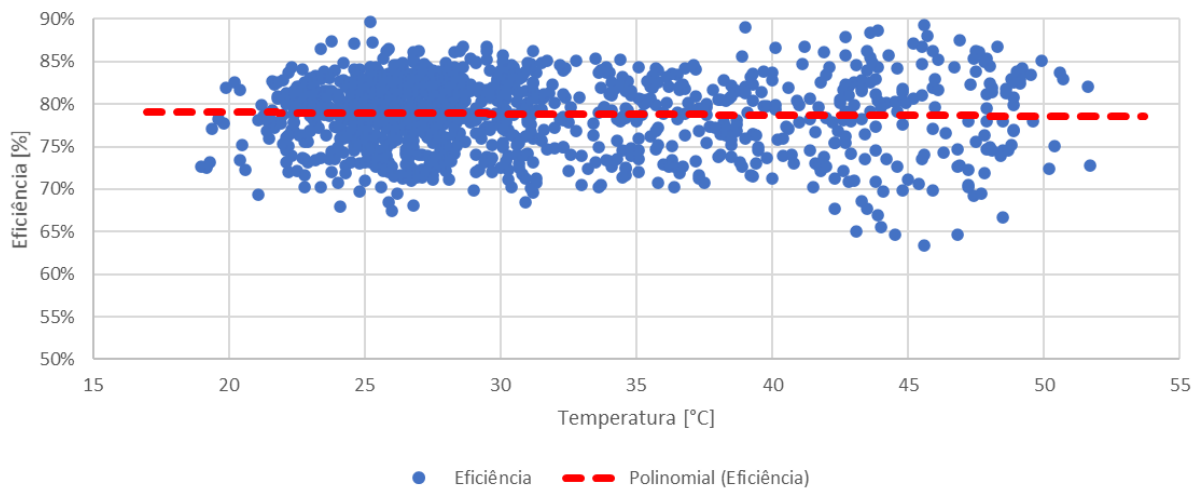
Dos 8.379 dados de tensão e corrente de entrada e saída e temperatura fornecidos pelo sistema do inversor e pelo termômetro instalado, 59 % estão nas faixas de potência de 0 W a 1.000 W e 3.500 W a 4.500 W. Conforme apresentam as Figuras 39 a 42, a avaliação destas faixas de potência com maior número de dados revelou uma queda na eficiência do inversor com o aumento da temperatura ambiente, mesmo a eficiência do inversor sendo diretamente proporcional a sua potência de trabalho e as maiores insolações estarem comumente associadas a maiores temperaturas.

Figura 39 – Gráfico da eficiência do inversor pela temperatura na faixa de 0 W a 500 W.



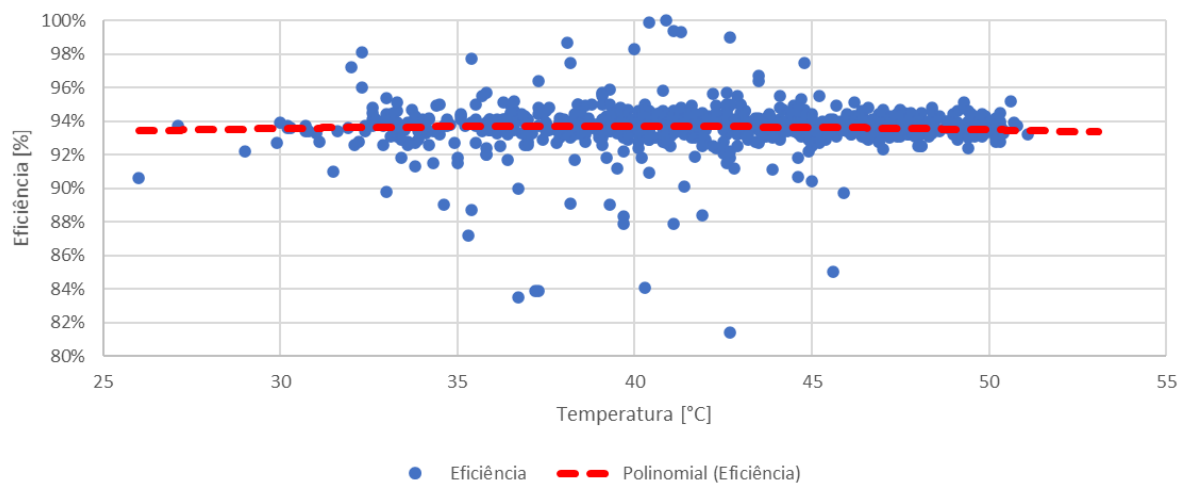
Fonte: Feito pelo autor.

Figura 40 – Gráfico da eficiência do inversor pela temperatura na faixa de 500 W a 1000 W.



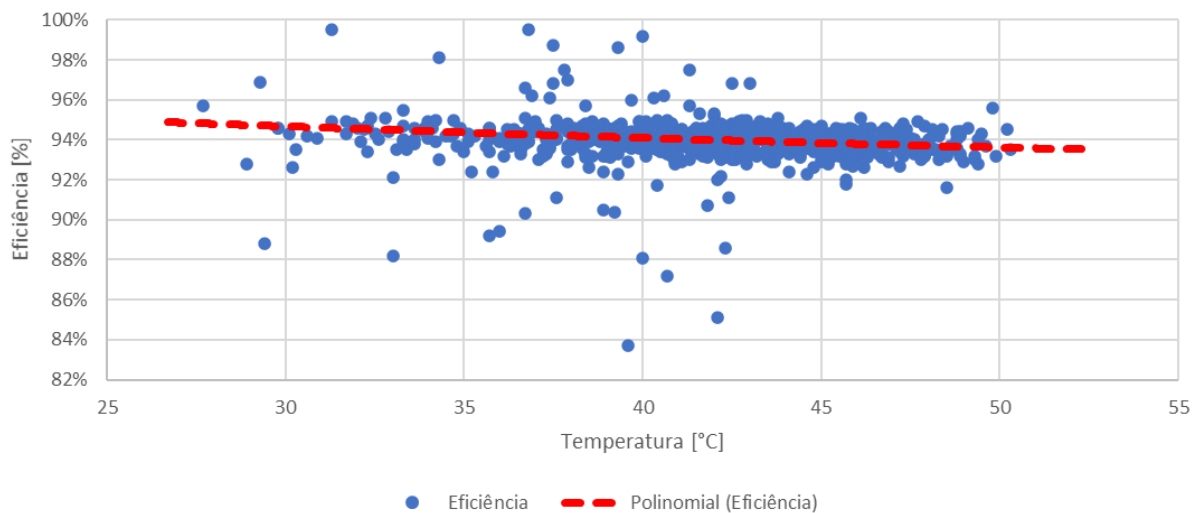
Fonte: Feito pelo autor.

Figura 41 – Gráfico da eficiência do inversor pela temperatura na faixa de 3500 W a 4000 W.



Fonte: Feito pelo autor.

Figura 42 – Gráfico da eficiência do inversor pela temperatura na faixa de 4000 W a 4500 W.



Fonte: Feito pelo autor.

Conforme apresentado na seção 4.2, o projeto da central de geração prevê a instalação de um aparelho de ar condicionado *inverter* e possui um sistema de medição de consumo instalado exclusivo para este com o intuito tanto de avaliar futuramente o desempenho do sistema de geração como um todo, em diferentes faixas de temperatura, quanto para avaliar os ganhos de eficiência em relação ao consumo do aparelho. O aparelho especificado, ainda, possui comando por Wi-Fi para que possa ser acionado e desligado remotamente ao longo das avaliações.

4.3 ECONOMIA DE ENERGIA

Conforme os dados apresentados no item 4.1.1, as lâmpadas de vapor de sódio do Campus apresentam uma potência média em regime permanente de 412 VA por poste e tempo médio de funcionamento de 12 horas diárias, sendo acionadas, em média, às 18 h 30 min e desligadas às 06 h 30 min.

Foram considerados os tempos médios dos diversos sistemas de acionamento em áreas mais ou menos expostas a luz do sol que fazem com que os horários de acionamento e desligamento não sejam padrões no Campus e nas diferentes épocas do ano, sendo que no inverno algumas áreas ficam mais de 14 horas em funcionamento e em outras áreas no verão o tempo de funcionamento cai para até 10 horas.

As lâmpadas LED de aplicação externa utilizadas na modernização de 124 postes, conforme os dados apresentados no item supracitado, possuem potência média de 44,5 VA. Assim, a economia diária média por essa ação é de 546,84 kWh e, consequentemente, a economia mensal média é de 16.405 kWh.

No que se refere a substituição das 332 lâmpadas tubulares de fluorescentes com potência média de 43,5 VA para LED com potência média de 19,5 VA, por terem um tempo médio de funcionamento de 12 horas diárias e um fator de utilização médio de 40%, a economia média diária dessa ação é de 38,3 kWh e, consequentemente, a economia mensal é de 1.150 kWh.

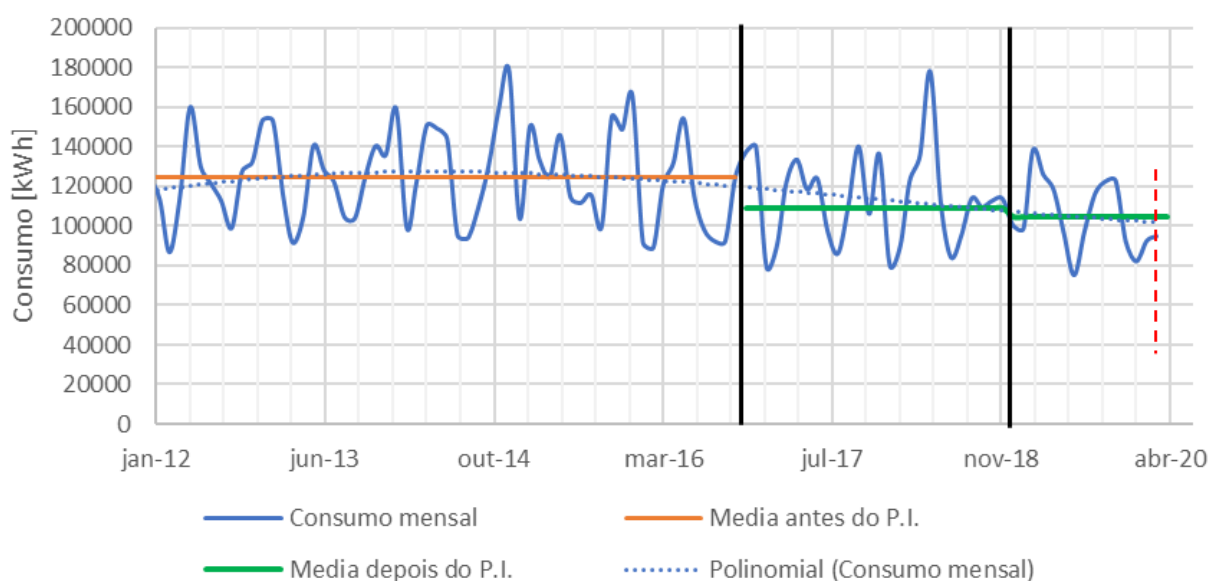
As ações de modernização estiveram sempre associadas a campanhas de conscientização da comunidade local para a redução do consumo e técnicas de uso consciente de energia.

A implementação dessas ações de eficiência energética e conscientização da comunidade tiveram início no mês de outubro de 2016 e foram gradualmente implementadas até outubro de 2019, sendo que mais de 60 % das modernizações dos sistemas de iluminação foram realizadas ao longo do ano de 2018 e a central de geração fotovoltaica foi acionada em 21 de setembro de 2019.

A economia média mensal com as ações de eficiência energética e a geração fotovoltaica *on-grid* com os dados apresentados foi estimada em 18,3 MWh.

Conforme apresentado na Figura 43, o consumo de energia elétrica médio do campus após a implementação parcial do projeto entre 2017 e 2018 foi 12,3 % inferior em relação ao consumo médio anterior e, com a implementação de todas as ações acima descritas, a economia mensal média registrada entre janeiro de 2019 e março de 2020 foi de 15,8 %, uma redução de quase 20 MWh mensais na fatura de energia elétrica em relação à média de consumo antes da implementação do projeto.

Figura 43 – Gráfico de consumo de energia da FEG – UNESP.



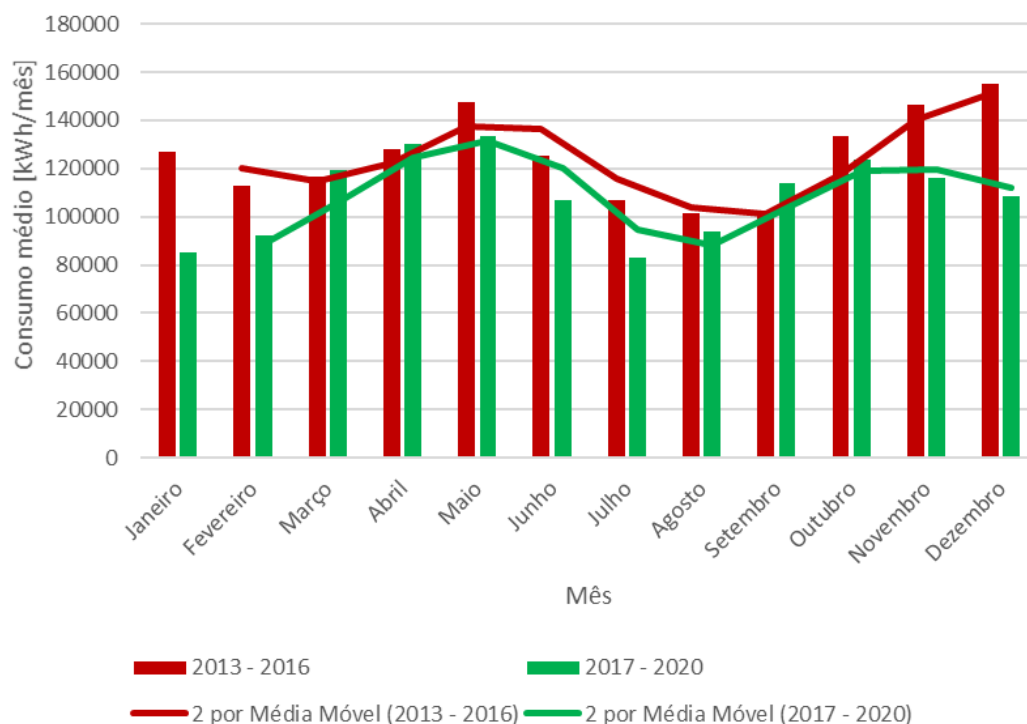
Fonte: Feito pelo autor.

Os dados a partir de abril de 2020 foram desconsiderados nos cálculos em virtude do fechamento do Campus pela pandemia do vírus Sars-CoV-2 (Covid-19).

Realizando uma análise da média de consumo mensal do mesmo período de tempo antes e depois do início da implementação projeto é possível notar a redução do consumo, mesmo durante o período de análise o Campus tendo aumento de carga com a construção de um novo prédio para o Departamento de Matemática.

Ainda, conforme apresenta o gráfico da Figura 44, a redução de consumo é mais significativa nos meses mais frios, período em que se utiliza os aparelhos de ar condicionado com menor frequência e que o sistema de iluminação funciona por mais tempo e, também, nos meses de férias, nos quais a iluminação externa e parte da interna permanecem em funcionamento, mas o consumo de refrigeração das salas de aula diminui.

Figura 44 – Gráfico do consumo médio mensal antes (2013 a 2016) e depois (2017 a 2020) do projeto.



Fonte: Feito pelo autor.

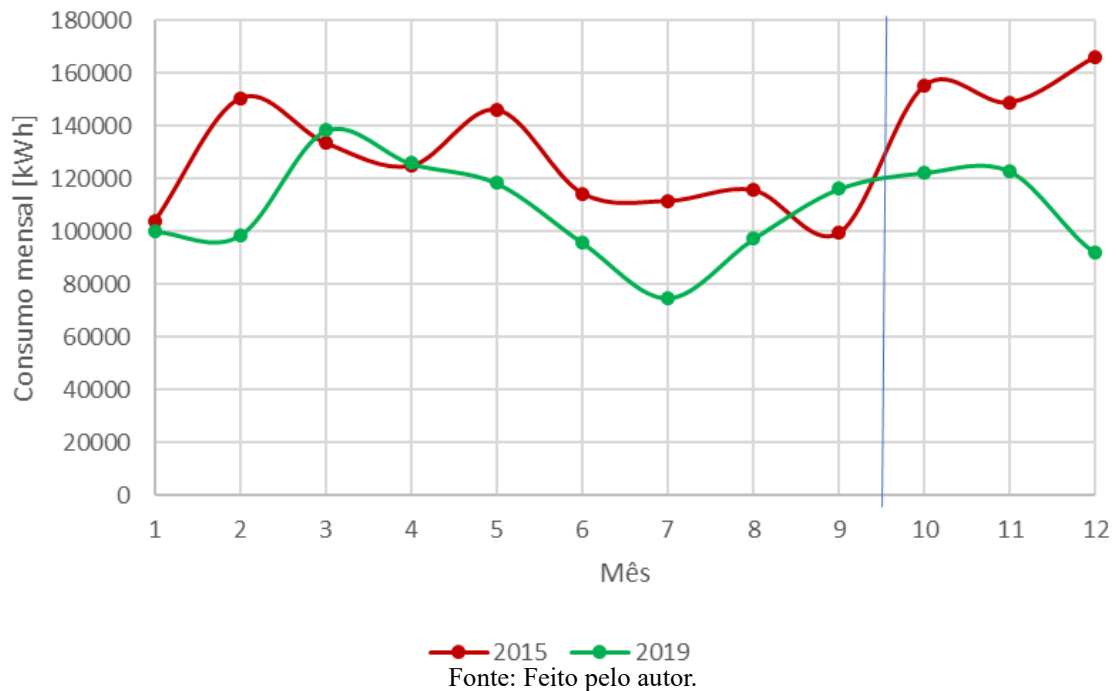
Realizando uma média do valor pago por kWh consumido da rede pela FEG entre outubro de 2016, início da implementação das ações do projeto, e junho de 2020, tem-se um valor pago, em média, R\$ 0,49 por kWh no período.

Entre janeiro de 2013 e março de 2016 o Campus consumiu um total de 4.921 MWh, já entre janeiro de 2017 e março de 2020 o consumo total foi de 4.260 MWh, uma economia de 661 MWh, o que representa uma redução de gastos de quase R\$ 330.000,00 no período.

Considerando os meses de pandemia, nos quais a economia obtida pelo projeto torna-se ainda mais expressiva visto que a central de geração fotovoltaica permanece em operação e o maior consumo de energia elétrica é com o sistema de iluminação, principalmente o externo, tem-se que a economia comparando o consumo entre janeiro de 2013 e junho de 2016 e janeiro de 2017 e julho de 2020 foi de 909 MWh, representando uma redução de gastos de R\$ 440.000,00 no período.

Ainda, realizando uma análise do sistema no ano imediatamente anterior ao início da implementação do projeto, 2015, e do último ano completo de análise, 2019, é possível notar a diferença de consumo obtida pelo projeto, especialmente após o acionamento da central de geração fotovoltaica em 21 de setembro de 2019, conforme mostra o gráfico da Figura 45.

Figura 45 – Gráfico de comparação de consumo de 2015 e 2019.



Ressalta-se que no ano de 2015 o Campus ainda não possuía o prédio do Departamento de Matemática com 532 lâmpadas e 32 aparelhos de ar condicionado.

4.4 IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS

Os impactos socioambientais gerados pelo projeto são, em parte, mensuráveis, como a redução de emissão de poluentes e, em parte, não mensuráveis, como a conscientização da comunidade a respeito do uso racional de energia.

Na implementação do novo sistema de iluminação ajustes foram feitos para que o este reduzisse a poluição luminosa, conforme apresentado na Figura 46, melhorando as condições de sobrevivência da fauna e da flora no Campus e reduzindo o desperdício de energia elétrica para iluminar áreas desnecessárias.

Ainda no aspecto da modernização, todas as lâmpadas utilizadas não emitem radiação UV, diferentemente das anteriores, reduzindo, assim, a incidência de alguns tipos de câncer naqueles que ficam expostos a estes sistemas de iluminação por longos períodos (LED TECHNOLOGY BRASIL, 2017).

Todas as lâmpadas utilizadas não possuem metais pesados e todos os aparelhos de ar condicionado previstos para a substituição dos existentes não possuem gases tóxicos ou que agredem o meio ambiente garantindo, assim, maior sustentabilidade e facilidade no futuro descarte.

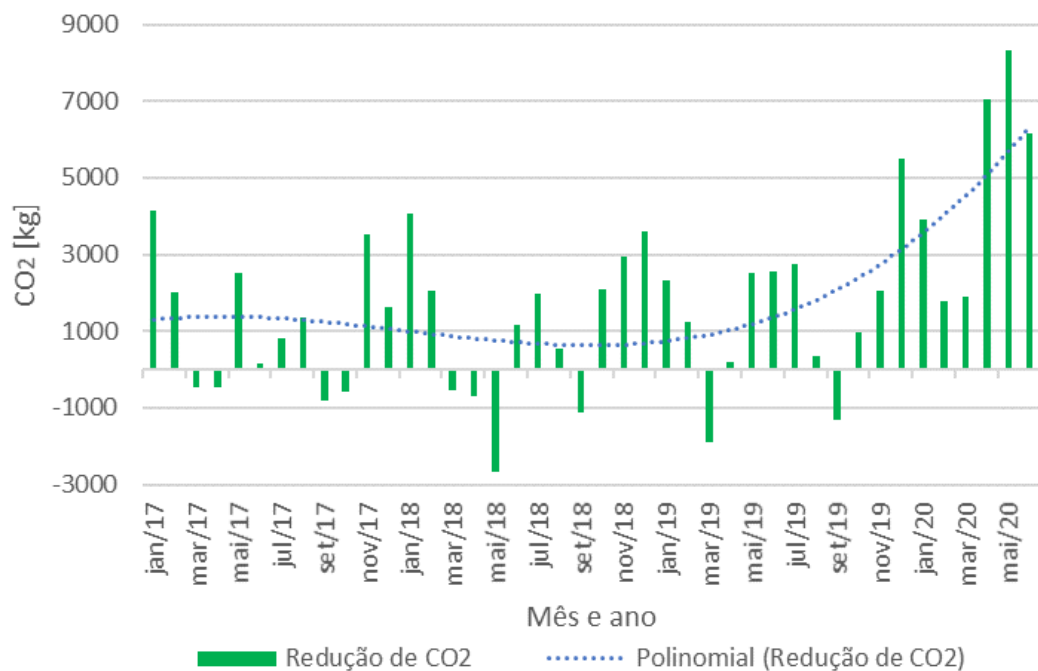
Figura 46 – Comparação dos sistemas de iluminação quanto a poluição luminosa.



Fonte: O autor (2018).

Conforme apresentado no item 3.2, o consumo de cada kWh da rede elétrica no Brasil equivale a 86,7654 gramas de CO₂ emitidas na atmosfera. Utilizando a equação (4), foi gerado o gráfico de redução de emissão de CO₂ mensal apresentado na Figura 47.

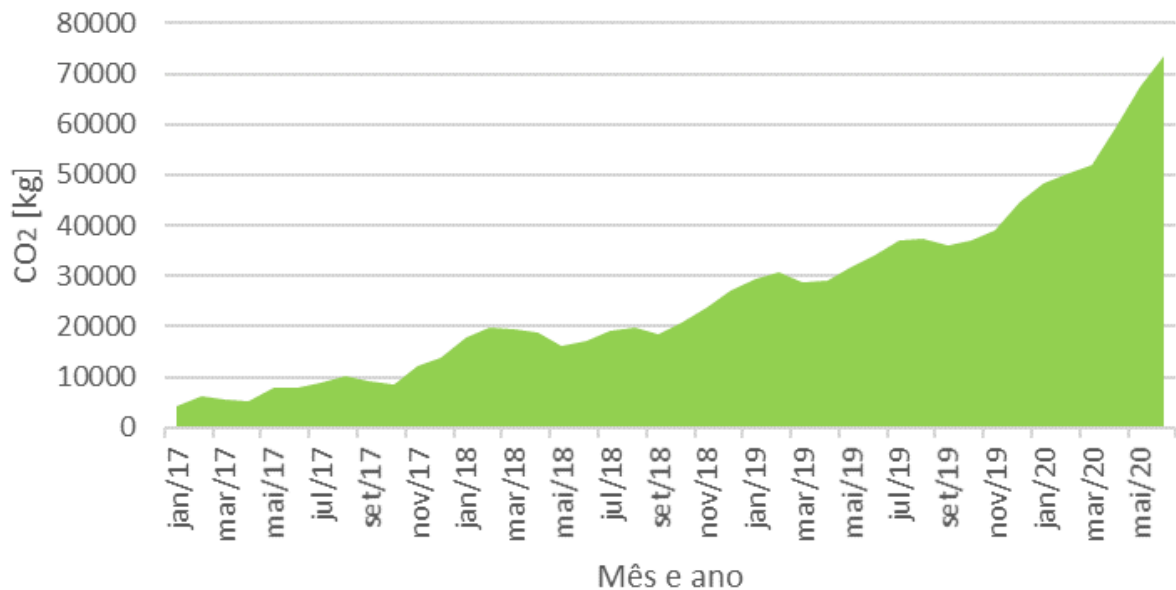
Figura 47 – Redução mensal de emissão de CO₂ após o início do projeto.



Fonte: Feito pelo autor.

Na Figura 48 é apresentada a redução acumulada de CO₂, sendo que desde o início da implementação do projeto quase 74 toneladas de dióxido de carbono deixaram de ser emitidas na atmosfera pela redução no consumo de energia elétrica na FEG proveniente da rede elétrica convencional.

Figura 48 – Redução acumulada de emissão de CO₂.



Fonte: Feito pelo autor.

Ainda, utilizando a equação (5) é possível determinar que, com a redução de emissão média de 21,1 toneladas de CO₂ por ano, em 25 anos o impacto do projeto no meio ambiente será o equivalente ao plantio de mais de 3.200 árvores de grande porte.

Além destes impactos visíveis e mensuráveis, o projeto gera um ciclo virtuoso de sustentabilidade dentro da instituição e da sociedade, no qual ações que trazem impactos ambientais positivos e conscientizam a comunidade também trazem retornos financeiros positivos que possibilitam novos investimentos em projetos sustentáveis.

A conscientização da comunidade por meio de visitas e palestras e pela própria divulgação presencialmente e nos meios de mídia das ações realizadas sensibilizam a população quanto ao uso racional de recursos e seus impactos no meio ambiente, na saúde e nas condições socioeconômicas da população.

Visando explicações de forma didática a respeito de eficiência energética e a aproximação entre o presente projeto e a comunidade na qual está inserido, foi criada a Central de Sustentabilidade apresentada na Figura 49 que, também, tem a função de Laboratório de Eficiência Energética para a realização de ensaios dos materiais utilizados na aplicação do projeto, coleta dos dados para as análises anteriores a aplicação e aprimoramento dos alunos da FEG a respeito do tema.

Figura 49 – Bancada da Central de Sustentabilidade.



Fonte: O autor (2020).

A bancada de testes apresentada na Figura 49 apresenta aos visitantes as comparações de consumo entre nove diferentes sistemas de iluminação e de um chuveiro nas funções verão e inverno, além de expor formas de onda, tipos de cabos, sistemas de proteção e de controle.

Conforme apontado na seção 2.8 deste trabalho, as pessoas e seu envolvimento no processo são fundamentais para a aplicação de um sistema com base no conceito do “tripé da sustentabilidade” que, de acordo com Elkington (1997), as áreas social, ambiental e econômica devem ter o mesmo nível de importância na implementação de projetos sustentáveis.

5 CONCLUSÃO

Conforme o objetivo inicial deste trabalho, o qual é a avaliação conceitual e operacional de um sistema fotovoltaico *on-grid*, suportado por estratégias de uso racional da energia, foram realizadas diferentes análises conceituais e operacionais tanto do sistema fotovoltaico *on-grid* instalado quanto das intervenções a este associadas que visavam o uso racional de energia.

Análises estas que possibilitaram atingir os objetivos específicos da pesquisa e, ainda, trouxeram informações relevantes sobre as tecnologias utilizadas. O primeiro destes era estudar sistemas que permitam a redução do consumo de energia elétrica, levando em consideração variáveis climáticas, tecnológicas, econômicas e ambientais, o que foi realizado por meio da análise dos dados tanto de geração fotovoltaica quanto do consumo de eletricidade dos sistemas de iluminação implementados.

Análise que também contemplou o segundo objetivo específico ao analisar os dados referentes à economia de energia e redução de emissões de gases de efeito estufa, realizado por meio do acompanhamento das contas de energia elétrica e cálculos de redução de emissões equivalentes pela redução do consumo de energia da rede elétrica convencional.

O terceiro e último objetivo específico visou envolver a comunidade nas ações técnicas previstas para criar uma consciência coletiva a respeito do correto uso dos recursos disponíveis e sobre a importância da sustentabilidade, o que foi atingido envolvendo a participação ativa da comunidade local nas ações relacionadas a este projeto.

No decorrer dos estudos realizados na Central de Geração Fotovoltaica duas variáveis tecnológicas relacionadas à geração se mostraram bastante importantes, dentre elas, a sensibilidade do sistema de medição de corrente do inversor, a qual causava erros de medição no aparelho em correntes menores e que foi corrigida por meio de equações de regressão lineares, obtidas a partir de curvas de calibração, e a relação entre a eficiência do sistema e a temperatura ambiente. É digno de nota que nenhuma dessas consta na documentação técnica dos equipamentos ou na literatura consultada.

O erro de corrente foi identificado como um problema de sensibilidade do sensor de corrente por intermédio da análise dos dados de corrente aferidos e do erro proporcional de medição que era inversamente proporcional a amplitude do valor de corrente, conforme apresentado neste trabalho.

Em relação à eficiência associada à temperatura ambiente, esta se dá pelo aumento da resistividade dos condutores e semicondutores tanto dos painéis fotovoltaicos quanto dos cabos do sistema e circuitos do inversor fotovoltaico, a qual é diretamente relacionada à temperatura,

ou seja, há o aumento da resistividade destes com o aumento da temperatura, o que causa mais perdas no sistema.

Assim, foi possível notar que as variáveis climáticas tinham influência direta no sistema, uma vez que as baixas temperaturas durante o inverno, mesmo que associadas a menores períodos de insolação diária, proporcionaram um aumento da geração de 17,94% em relação a estimativa; fato que possibilitou uma maior compensação do consumo do sistema de iluminação modernizado que funciona por maiores períodos de tempo no inverno em virtude dos horários do nascer e do pôr do sol.

O sistema de iluminação modernizado possibilitou tanto reduções de consumo, que chegaram a mais de 89% nos postes de iluminação das vias do Campus, quanto maior facilidade de manutenção e melhor iluminação do campus, com aumento na fidelidade na reprodução de cores e diminuição da poluição luminosa.

A associação do sistema de geração com a modernização de parte do sistema de iluminação do Campus e as medidas de uso racional de energia junto à comunidade resultaram na redução de 15,8% no consumo de energia elétrica e consequente economia superior a 100 mil reais por ano, que possibilitou novos investimentos da unidade em novas ações de eficiência energética, as quais podem gerar maiores retornos, gerando um ciclo virtuoso de investimentos que trazem retornos que possibilitam novos investimentos.

Esta redução do consumo de energia elétrica da rede teve como um de seus resultados a proporcional mitigação da poluição equivalente gerada pelo Campus, que supera 21 toneladas de CO₂ a menos por ano, uma vez que a produção de energia elétrica de fontes convencionais está diretamente associada a emissão de gases poluentes na atmosfera, especialmente os que intensificam o efeito estufa.

A implementação das ações sempre esteve associada à conscientização da comunidade local a respeito do uso racional dos recursos naturais e da importância da sustentabilidade energética e ambiental. Em todas as etapas de implementação pessoas chave da comunidade estudantil do Campus estiveram presentes e a participação da comunidade local, envolvendo agentes internos e externos à academia, foi ainda maior durante as palestras, eventos e visitas nas quais os temas da pesquisa eram discutidos no contexto deste trabalho.

Todas as estruturas associadas a esta pesquisa, desde os postes de iluminação até a Central de Geração Fotovoltaica com cercas e janelas de vidro e a Central de Sustentabilidade foram projetadas para receber, envolver e sensibilizar a comunidade quanto aos tópicos relacionados a sustentabilidade e a importância da participação de cada elemento do sistema pesquisado e desenvolvido.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios**. Brasília: ANEEL, 2017. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/10184/15266087/painel+3+ap+7+2017.10.19+ABSOLAR+-+Energia+Solar+Fotovoltaica+-+Dr.+Rodrigo+Lopes+Sauaia.pdf/54f8b161-751b-0639-bd04-77a60cac45c3>. Acesso em: 09 nov. 2019.
- ALHADDI, Hanan. Triple Bottom Line and Sustainability: A Literature Review. **Business and Management Studies**, [S.l.], v. 1, n. 2, p. 6-10, apr. 2015. ISSN 2374-5924. Disponível em: <http://redfame.com/journal/index.php/bms/article/view/752>. Acesso em: 28 fev. 2021.
- ALVIM, C. F. *et al.* Características dos sistemas elétricos integrados do Brasil e sua projeção até o horizonte de 2035. **Economia e Energia**, ano 9, n. 49, abr./maio 2005. Disponível em: https://ecen.com/eee49/eee49p/porto_destino_sist_eletr.htm. Acesso em: 20 nov. 2019.
- AMERICA DO SOL. **Potencial solar no Brasil**. São Paulo, 2017. Disponível em: <http://americadosol.org/potencial-solar-no-brasil/#toggle-id-1.html>. Acesso em: 16 fev. 2020.
- ARBEX *et al.* A poluição do ar e o sistema respiratório. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, p. 643-655, 2012. Disponível em: <https://www.jornaldepneumologia.com.br/details/79/en-US/a-poluicao-do-ar-e-o-sistema-respiratorio>. Acesso em: 16 fev. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5410: instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BARROS, B. F. **Eficiência Energética: técnicas de aproveitamento, gestão de recursos e fundamentos**. São Paulo: Érica, 2015. 152 p.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482**. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2020
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Programa de Eficiência Energética**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/programa-eficiencia-energetica>. Acesso em: 26 ago 2018.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Bandeiras Tarifárias**. Brasília, DF, 2018d. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 09 nov. 2019.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <http://www.coronasolar.com.br/Ebook/NotaTecnica-Aneel5617.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional**. Rio de Janeiro, 2019a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2019.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional**. Rio de Janeiro, 2018b. Disponível em: http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf. Acesso em: 03 nov. 2019.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, 2018c. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2019.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, 2019b. Disponível em: <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/resenha-mensal-do-mercado-de-energia-eletrica>. Acesso em: 03 nov. 2019.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas)**. Rio de Janeiro, 2019c. Disponível em: <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-mensal-de-energia-eletrica-por-classe-regioes-e-subsistemas>. Acesso em: 09 nov. 2019.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **World Energy Outlook 2018**. Rio de Janeiro, 2019d. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/12%20April%20_%20EPE%20WEO%20launch_Clean%20\(002\).pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/12%20April%20_%20EPE%20WEO%20launch_Clean%20(002).pdf). Acesso em: 15 mar. 2020.

BRASIL. **LEI Nº 10.295**. Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Brasília, DF: 2001. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/10295.htm. Acesso em: 26 ago. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Efeito Estufa e Aquecimento Global**. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global>. Acesso em: 15 mar. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Matriz Elétrica do Brasil: Contexto Atual e Futuro**, 2018a, Brasília. Disponível em: https://www.defesa.gov.br/arquivos/ciencia_tecnologia/acumuladores_energia/mme.pdf. Acesso em: 03 nov. 2019.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Brasília, DF, 2011. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/plano-nacional-de-eficiencia-energetica>. Acesso em: 26 ago 2018.

BRASIL. Senado Federal. **Problemas no setor elétrico aumentam custos e exigem mais investimento em fontes renováveis**. Brasília, DF, 2014. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2014/02/20/problemas-no-setor-eletrico-aumentam-custos-e-exigem-mais-investimento-em-fontes-renovaveis>. Acesso em: 09 nov. 2019.

BRAZILIAN TIMES. **Poluição do ar pode causar câncer de pulmão, diz estudo**. 2017. Disponível em: <https://www.braziliantimes.com/mundo/2017/05/18/poluio-do-ar-pode-causar-cncer-de-pulmo-diz-estudo.html>. Acesso em: 16 fev. 2020.

BRUNDTLAND, G. **Our common future**: The world commission on environment and development. Oxford, England: Oxford University Press, 1987. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2019.

CICLO VIVO. **Quanto vale cada árvore**. 2016. Disponível em: <http://ciclovivo.com.br/noticia/cada-arvore-da-mata-atlantica-chega-a-retirar-163-kg-de-co2-da-atmosfera/>. Acesso em: 25 nov. 2019.

CRECESB. **Insolação diária**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acesso em: 06 jul. 2020.

CRECESB. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=2>. Acesso em: 09 jul. 2020.

DATZ, T. **Green office environments linked with higher cognitive function scorers**. Harvard, 2015. Disponível em: <https://www.hsph.harvard.edu/news/press-releases/green-office-environments-linked-with-higher-cognitive-function-scores/>. Acesso em: 14 jun. 2019.

DIDONE, E. L.; WAGNER, Andreas; PEREIRA, F. O. R.. Avaliação da influência do contexto urbano na radiação solar para geração de energia. urbe, **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Curitiba, v. 9, supl. 1, p. 408-424, Out. 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2175-33692017000400408&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 26 ago. 2018.

ELKINGTON, J. **Cannibals with Forks**: the triple bottom line of 21st century business. Mankato, MN: Capstone, 1997.

ELKINGTON, J. Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business. **Environmental Quality Management**, v. 8, n.1, p. 37-51, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/tqem.3310080106>. Acesso em: 22 maio 2021.

ENEL. **Tarifa de Energia Elétrica**. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.eneldistribuiçao.com.br/para-sua-casa/tarifa-de-energia-eletrica>. Acesso em: 25 nov. 2019.

EXAME. **Brasil cai para a posição de 9ª economia do mundo**. São Paulo, 2016. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/economia/pib-em-dolar-cai-25-e-brasil-cai-para-a-posicao-de-9a-economia-do-mundo/>. Acesso em: 16 fev. 2020.

FERREIRA, Agmar. *et al.* Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 81, p. 181–191, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.102>. Acesso em: 17 jul. 2020.

FIRJAN. **Pesquisas e Estudos Socioeconômicos**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=2C908A8A5A5BEAA7015A6C9EF6B932C3>. Acesso em: 16 fev. 2020.

GOH, Cheng Siew *et al.* Revisiting triple bottom line within the context of sustainable construction: A systematic review. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119884>. Acesso em: 22 maio 2021

GOSTEIN, M.; CARON, J.R.; LITTMANN, B. Measuring soiling losses at utility-scale PV power plants. In: PHOTOVOLTAIC SPECIALIST CONFERENCE (PVSC), 40., 2014, Denver. **Proceedings** [...]. Denver: IEEE, pp.0885-0890, 8-13 June 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6925056>. Acesso em: 09 jul. 2020.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 7-20, Abr. 2007. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142007000100003&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 15 mar. 2020.

HAMMER, Janet; PIVO, Gary. The Triple Bottom Line and Sustainable Economic Development Theory and Practice. **Economic Development Quarterly**, v. 31, n. 1, p. 25–36, 2017. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0891242416674808>. Acesso em: 23 maio 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Brasil em Síntese**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio.html>. Acesso em: 16 fev. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE e TECNOLOGIA. **Programa Brasileiro de Etiquetação**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <http://www2.inmetro.gov.br/pbe/>. Acesso em: 26 ago 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2020 – Solar PV**. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020/solar-pv>. Acesso em: 22 maio 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Electricity consumption per capita, World 1990-2017**. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=Electricity%20consumption%20per%20capita>. Acesso em: 21 fev. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Explore energy data by category, indicator, country or region**. 2020b. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD&energy=Electricity&year=2017>. Acesso em: 21 fev. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Brazil CO2 emissions**. 2010. Disponível em: https://www.sunearthtools.com/pt/tools/CO2-emissions-calculator.php#txtCO2_16. Acesso em: 25 nov. 2019.

KABIR E, KUMAR P, KUMAR S, ADELODUN AA and KIM K. 2018. Solar energy: Potential and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, part 1, p. 894-900, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117313485>. Acesso em: 09 nov. 2019.

LEÃO, F. B.; KUROKAWA, S. **Medidas Elétricas**. Universidade de São Paulo. São Paulo, s.a. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/capitulo-1_medidas-eletricas_fabiobleao_2.pdf. Acesso em: 23 set. 2020.

LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; ANTUNES, F. L. M. **Harmônicos em sistemas elétricos**. Rio de Janeiro: Campus, 2014. 354p.

LED TECHNOLOGY BRASIL. **O led na iluminação**: aspectos a serem considerados na decisão de compra. 2017. Disponível em: <http://www.ledtecbrasil.com/wp-content/uploads/2015/11/ASPECTOS-A-SEREM-CONSIDERADOS-NA-DECIS%C3%83ODE-COM-PRA4.pdf>. Acesso em: 23 set. 2020.

LIRA, Marcos Antonio Tavares *et al.* Contribuição dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica para a Redução de CO₂ no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 3, p.389-397, 2019. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v34n3/0102-7786-rbmet-34-03-0046.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2020

LOVISCEK, V. Triple Bottom Line toward a Holistic Framework for Sustainability: A Systematic Review. **Revista de Administração Contemporânea**, Curitiba, v. 25, n. 3, e200017, 2021. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-65552021000300701&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 28 fev. 2021.

LOWE, R. J.; GESHE, M. H.; ORESZCYN, T. Possible future impacts of elevated levels of atmospheric CO₂ on human cognitive performance and on the design and operation of ventilation system in buildings. **Building Services Engineering Research & Technology**, v.39, n.6, p.698-711, 2018. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0143624418790129>. Acesso em: 14 abr. 2019

MARQUES, M. C. **Projeto civil do FEG-Sustentável**. Guaratinguetá, 2018. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Departamento de Engenharia Civil. Guaratinguetá, SP.

MATEUS, V. **Fator de Potência**. Cuiabá, 2021. Universidade Federal de Mato Grosso. Disponível em: <http://www.ejm.com.br/download/FP.PDF>. Acesso em: 17 jul. 2020.

MENICONI, T.; BARRA, M.; FRASÃO, L. **Entenda como a geração de energia elétrica afeta o meio ambiente**. 2011. Disponível em: <http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2011/03/entenda-como-geracao-de-energia-eletrica-afeta-o-meio-ambiente.html>. Acesso em: 15 mar. 2020.

NEO SOLAR. **Gerador Solar 2,31kWp - telha cerâmica - sinosola - growatt - mono 220v**. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/gerador-solar-2-31kwp-sinosola-growatt-cer-m220.html>. Acesso em: 25 nov. 2019.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Mapa Dinâmico do SIN**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em: 16 fev. 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Conheça os novos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU**. 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/conheca-os-novos-17-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-da-onu/>. Acesso em: 09 nov. 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **População mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050, diz relatório da ONU**. 2019. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/populacao-mundial-deve-chegar-a-97-bilhoes-de-pessoas-em-2050-diz-relatorio-da-onu/>. Acesso em: 21 fev. 2020.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Air pollution, climate and health**. 2018. Disponível em: https://www.who.int/sustainable-development/AirPollution_Climate_Health_Factsheet.pdf. Acesso em: 14 abr. 2019

PEREIRA, Marcio Giannini *et al.* The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n.6, p. 3786–3802, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.024>. Acesso em: 12 abr. 2019.

PORTAL BRASIL. **Rede de transmissão supera 107 mil quilômetros**. 2014. Disponível em: <https://goo.gl/fZX8pR> . Acesso em: 14 jul. 2018.

PROCEL. **O Programa**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?Team=%7B505FF883%2DA273%2D4C47%2DA14E%2D0055586F97FC%7D>. Acesso em: 15 mar. 2020.

ROSA, M. **Quanto vale cada árvore**. 2013. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/pla-neta/meio-ambiente/cada-arvore-da-mata-atlantica-chega-a-retirar-163-kg-de-co2-da-atmosfera/>. Acesso em: 10 jul. 2020.

SÃO PAULO. **Energia Solar Paulista**: levantamento do potencial. São Paulo, 2013. Disponível em: http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalsev2/intranet/BiblioVirtual/renovaveis/atlas_energia_solar.pdf. Acesso em: 25 nov. 2019.

SÃO PAULO. **Retratos de São Paulo**. São Paulo, 2019a. Disponível em: <http://produtos.seade.gov.br/produtos/retratosdesp/view/index.php?temaId=4&locId=1000&porTema=true>. Acesso em: 20 nov. 2019.

SÃO PAULO. **PIB**. São Paulo, 2019b. Disponível em: <https://www.investe.sp.gov.br/porque-sp/economia-diversificada/pib/>. Acesso em: 25 nov. 2019.

SILVA, V. S. M. **Serviço público de energia elétrica, na ótica do direito do consumidor**: um estudo crítico sobre a reparação civil em caso de ineficácia na prestação do serviço. 2014. Disponível em: <https://ambitojuridico.com.br/edicoes/revista-123/servico-publico-de-energia-eletrica-na-otica-do-direito-do-consumidor-um-estudo-critico-sobre-a-reparacao-civil-em-caso-de-ineficacia-na-prestacao-do-servico/>. Acesso em: 15 mar. 2020.

SINDIENERGIA. **Avanço da GD deve mudar modelo tradicional e distribuidoras serão gestoras de sistemas, afirmam profissionais em Fórum sobre tema**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: http://www.sindienergia.org.br/noticia.asp?cod_not=4114. Acesso em: 03 nov. 2019.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects 2019**. 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Graphs/DemographicProfiles/Line/900>. Acesso em: 21 fev. 2020.

UPSOLAR. **UP-M320-360P**. 2021. Disponível em: <http://www.upsolar.com/productinfo/23417.html>. Acesso em: 11 abr. 2021.

VALOR. **Energia solar supera nuclear em capacidade instalada no Brasil**. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://valor.globo.com/brasil/noticia/2019/03/12/energia-solar-supera-nuclear-em-capacidade-instalada-no-brasil.ghtml>. Acesso em: 09 nov. 2019.

VEJA. **Brasil piora em ranking e passa a ser o 6° com a energia mais cara do mundo**. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/blog/impavido-colosso/brasil-piora-em-ranking-e-passa-a-ser-o-6-com-a-energia-mais-cara-do-mundo/>. Acesso em: 09 nov. 2019.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.

WEG. **Fusíveis aR e gL/gG Tipo NH Contato Faca, NH Flush End e Diametral**. Jaraguá do Sul, 2017. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h0a/h63/WEG-fusiveis-ar-e-gl-gg-50009817-catalogo-portugues-br-dc.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2020.

ZHANG, X.; CHEN, X.; ZHANG, X. The impact of exposure to air pollution on cognitive performance. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.115, n.37, p.9193-9197, 2018. Disponível em: <https://www.pnas.org/content/115/37/9193>. Acesso em: 14 jul. 2019.

APÊNDICE A – Geração *off-grid*

Dentro da iniciativa Ponto Iluminado inicialmente foi criada uma central de geração de 140 Wp *off-grid* (desacoplada da rede).

Essa estrutura *off-grid* foi desenvolvida para a alimentação das cargas de iluminação instaladas no ponto de ônibus ao lado da estrutura e de um sistema localizado em parte da calçada.

Conforme apresenta a Figura 50, a estrutura localizada a latitude 22°48'16" S e a longitude 45°11'28' O é formada por um painel fotovoltaico de 140 Wp instalado sobre um poste metálico de 4 metros de altura em relação ao solo, mantendo o painel acima da vegetação do local.

Figura 50 – Estrutura de geração *Off-Grid* “Ponto Iluminado”.



Fonte: O autor, 2019.

Este painel fotovoltaico é conectado ao quadro de proteção, comando e armazenamento também apresentado na Figura 50, de onde saem as alimentações das cargas para os pontos supracitados.

A localização foi pensada de forma que estivesse dentro de uma região próxima da carga e protegida de ações de vandalismo estando dentro do terreno da universidade.

O método de cálculo utilizado para o projeto foi o da corrente máxima e, de acordo com o Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRECESB) do Ministério de Minas e Energia do Governo Brasileiro, o período de insolação média é de 7h, porém por ser um dado genérico para uma área muito ampla a geração ficou abaixo da esperada, uma vez que a média da insolação diária aferida foi de 5 horas.

APÊNDICE B – Dimensionamento dos cabos

1. Cabos dos painéis superiores

Todos os painéis que servem como cobertura da estrutura de alvenaria possuem corrente nominal de operação de 8,61 A, corrente de curto-circuito de 8,98 A, tensão operacional de 36,6 V e tensão de circuito aberto de 45,1 V.

Assim, para fins de cálculos foram consideradas as piores situações hipotéticas para os cabos, ou seja, o painel em tensão de operação e corrente de curto-circuito; garantindo, assim, a correta operação em qualquer hipótese por mais anômala que seja.

Utilizando a equação (7) com os parâmetros acima apresentados, admitindo-se a máxima queda de tensão nos cabos de 5% e utilizando a distância do painel mais distante do quadro de proteção, ou seja, a pior situação, tem-se:

$$S_A = \frac{200 \cdot \rho \cdot L_c \cdot I_c}{\Delta V_c \cdot V_c} = \frac{200 \cdot \frac{1}{56} \cdot 12 \cdot 8,98}{5 \cdot 36,6}$$

$$S_A = 2,10 \text{ mm}^2$$

Utilizando a equação (6) com os parâmetros acima apresentados, considerando o agrupamento de mais de 10 circuitos na eletrocalha e 5 no eletroduto e a temperatura ambiente máxima de 55°C na eletrocalha e 50 °C no eletroduto, ou seja, a pior situação com o sistema de ventilação forçada inoperante e com pouca ou nenhuma ventilação natural, tem-se na bandeja perfurada:

$$I'_B = \frac{I_B}{F_t \cdot F_a} = \frac{8,98}{0,71 \cdot 0,72}$$

$$I'_B = 20,44 \text{ A}$$

E no eletroduto aparente:

$$I'_B = \frac{I_B}{F_t \cdot F_a} = \frac{8,98}{0,71 \cdot 0,6}$$

$$I'_B = 21,1 \text{ A}$$

Sabendo-se que o método de instalação dos cabos é, em parte do caminho F, em parte B2 e em parte B1, as tabelas da NBR 5410 (ABNT, 2004) mostram que no método de instalação F os condutores unipolares deveriam ter seção transversal mínima de 1,5 mm² e nos métodos de instalação B1 e B2 seção transversal mínima de 2,5 mm².

Assim, foram escolhidos cabos de 2,5 mm² para toda a instalação destes painéis, sendo na cor vermelha para o positivo e na cor preta para o negativo. E o aterramento foi realizado com cabos verdes de 4 mm².

2. Cabos dos painéis inferiores

Os painéis fotovoltaicos inferiores apresentam características idênticas às apresentadas no item 4.2.3.1 e o mesmo método foi aplicado para os cálculos.

Utilizando a equação (6) com os parâmetros apresentados, admitindo-se a máxima queda de tensão nos cabos de 5% e utilizando a distância do painel mais distante do quadro de proteção, ou seja, a pior situação, tem-se:

$$S_A = \frac{200 \cdot \rho \cdot L_c \cdot I_c}{\Delta V_c \cdot V_c} = \frac{200 \cdot \frac{1}{56} \cdot 21 \cdot 8,98}{5 \cdot 36,6}$$

$$S_A = 3,68 \text{ mm}^2$$

Utilizando a equação (6) com os parâmetros acima apresentados, considerando o agrupamento de mais de 10 circuitos no eletroduto subterrâneo e a temperatura no solo sob a sombra de 50°C, ou seja, a pior situação com o sistema operando em condições extremas pouco prováveis, tem-se:

$$I'_B = \frac{I_B}{F_t \cdot F_a} = \frac{8,98}{0,63 \cdot 0,72}$$

$$I'_B = 19,8 \text{ A}$$

Sabendo-se que o método de instalação dos cabos é, em parte do caminho D e em parte B2, as tabelas da NBR 5410 (ABNT, 2004) mostram que no método de instalação D os condutores unipolares deveriam ter seção transversal mínima de 1,5 mm² e no método de instalação B2 seção transversal mínima de 2,5 mm².

Assim, foram escolhidos cabos de 4 mm² para toda a instalação destes painéis, sendo na cor vermelha para o positivo e na cor preta para o negativo. E o aterramento foi realizado com cabos verdes também de 4 mm².

Ademais, a instalação dos eletrodutos enterrados foi realizada de modo que fiquem a maior parte do tempo na sombra. Conforme mostra a Figura 51, os eletrodutos foram instalados sob a sombra dos painéis fotovoltaicos e seguem um caminho sob a sombra do prédio da biblioteca durante toda a manhã e parte da tarde, garantindo um solo com até 5°C a menos no final do dia em relação ao exposto a luz solar, conforme medições aleatoriamente realizadas.

Figura 51 – Áreas de sombra sobre os eletrodutos enterrados.



Fonte: O autor, 2019.

3. Cabos dos microinversores

O microinversor projetado para uso nos oito painéis de solo adicionais possui potência máxima nominal de 1.200 W, tensão de operação de 220 V (bifásico) e fator de potência igual ou maior a 0,98, assim possuindo uma corrente nominal de operação de 5,6 A.

Utilizando a equação (7) com os parâmetros apresentados, admitindo-se a máxima queda de tensão nos cabos de 5% e utilizando a distância do microinversor mais distante do quadro de proteção, ou seja, a pior situação, tem-se que a seção transversal mínima deverá ser de 0,82 mm².

Utilizando a equação (6) com os parâmetros acima apresentados, considerando o agrupamento de mais de 10 circuitos no eletroduto subterrâneo e a temperatura no solo sob a sombra de 50°C, ou seja, a pior situação com o sistema operando em condições extremas pouco prováveis, tem-se que a corrente de projeto será de 12,3 A.

Sabendo-se que o método de instalação dos cabos é, em parte do caminho D e em parte B2, as tabelas da NBR 5410 (ABNT, 2004) mostram que no método de instalação D os condutores unipolares deveriam ter seção transversal mínima de 0,75 mm² e no método de instalação B2 seção transversal mínima de 1 mm².

Visando a redução de perdas, a disponibilidade de cabos e as normas vigentes, foram escolhidos cabos de 4 mm² para toda a instalação destes painéis, sendo na cor amarela para ambas as fases. E o aterramento foi realizado com cabos verdes também de 4 mm².

4. Cabos de iluminação

Todo o circuito de iluminação é feito com lâmpadas e refletores LED, sendo as lâmpadas de potência nominal de 9 W e os refletores de 30 W e 50 W. Para fins de cálculos das seções transversais dos condutores, será considerada a pior situação, ou seja, o refletor de 50 W mais distante do quadro de acionamento da iluminação.

Utilizando a equação (7) com os parâmetros apresentados, admitindo-se a máxima queda de tensão nos cabos de 5% e utilizando a distância do refletor LED mais distante do quadro de acionamento da iluminação com um fator de potência de 0,8, ou seja, a pior situação, tem-se que a seção transversal mínima seria de $0,02 \text{ mm}^2$.

Utilizando a equação (6) com os parâmetros acima apresentados, considerando o agrupamento de mais de 10 circuitos na eletrocalha perfurada e a temperatura ambiente de 55°C , ou seja, a pior situação com o sistema de ventilação forçada inoperante e com pouca ou nenhuma ventilação natural, tem-se que a corrente de projeto é de 0,7 A.

Sabendo-se que o método de instalação dos cabos é, em parte do caminho B2, em parte F e em um pequeno trecho D, as tabelas da NBR 5410 (ABNT, 2004) mostram que no método de instalação B2 os condutores unipolares deveriam ter seção transversal mínima de $0,5 \text{ mm}^2$, no método de instalação F seção transversal mínima de $0,5 \text{ mm}^2$ e no método de instalação D seção transversal mínima de $0,5 \text{ mm}^2$.

Cumprindo as normas da NBR 5410 (ABNT, 2004), foram escolhidos cabos de $1,5 \text{ mm}^2$ para toda a instalação de iluminação, sendo utilizada a cor amarela para ambas as fases do sistema e iluminação interno dos quadros de comando e a cor vermelha para ambas as fases do restante de sistema de iluminação. E o aterramento foi realizado com cabos verdes também de $1,5 \text{ mm}^2$.

5. Cabos de comando, alarme e segurança

Toda a parte de controle e comando, sistemas de alarme e de segurança do sistema possuem correntes inferiores a 0,5 A e, utilizando os mesmos métodos de cálculos das seções anteriores, foram utilizados cabos de duas vias vermelho e preto de $0,75 \text{ mm}^2$ para a instalação de todos estes circuitos e sistemas.

6. Cabos do sistema de arrefecimento

O sistema de arrefecimento da central de geração fotovoltaica é composto por dois exaustores de 60 W e um ar condicionado de 1.550 W, considerando o fator de potência mínimo de 0,8, a corrente nominal máxima deste sistema de arrefecimento é de 9,5 A.

Utilizando as equações (6) e (7) com os parâmetros acima apresentados, admitindo-se a máxima queda de tensão nos cabos de 5%, utilizando a distância do equipamento mais distante

do quadro de comando, considerando o agrupamento de mais de 10 circuitos na eletrocalha e a temperatura ambiente máxima de 55°C, ou seja, a pior situação com o sistema de ventilação forçada inoperante e com pouca ou nenhuma ventilação natural, tem-se que a corrente corrigida é de 21,6 A e a seção mínima para a queda de tensão de 5% é de 0,37 mm².

Sabendo-se que o método de instalação dos cabos é, em parte do caminho F e em parte B2, as tabelas da NBR 5410 (ABNT, 2004) mostram que no método de instalação F os condutores unipolares deveriam ter seção transversal mínima de 2,5 mm² e no método de instalação B2 seção transversal mínima de 2,5 mm².

Visando a redução de perdas e a disponibilidade de cabos, foram escolhidos cabos de 4 mm² para toda a instalação destes equipamentos, sendo na cor amarela para ambas as fases. E o aterramento foi realizado com cabos verdes também de 4 mm².

7. Cabos de saída do inversor

A saída do inversor de potência nominal de 5.000 W e fator de potência igual ou maior que 0,99 tem uma corrente máxima de 22,8 A.

Utilizando a equação (7) com os parâmetros apresentados, admitindo-se a máxima queda de tensão nos cabos de 5% e utilizando a distância do inversor até o contator principal, tem-se:

$$S_A = \frac{200 \cdot \rho \cdot L_c \cdot I_c}{\Delta V_c \cdot V_c} = \frac{200 \cdot \frac{1}{56} \cdot 5 \cdot 22,8}{5 \cdot 220}$$

$$S_A = 0,37 \text{ mm}^2$$

Utilizando a equação (6) com os parâmetros acima apresentados, considerando o agrupamento de mais de 5 circuitos dentro do quadro com ventilação forçada de 3 redundâncias e ventilação forçada do ambiente em que se encontra e a temperatura ambiente de 50°C, tem-se:

$$I'_B = \frac{I_B}{F_t \cdot F_a} = \frac{23}{0,71 \cdot 0,8}$$

$$I'_B = 40,1 \text{ A}$$

Sabendo-se que o método de instalação dos cabos é o D, as tabelas da NBR 5410 (ABNT, 2004) mostram que a seção transversal mínima de 4 mm².

Cumprindo as normas da NBR 5410 (ABNT, 2004) e visando a segurança em caso de falha de todos os sistemas de ventilação, mesmo o inversor possuindo sistema de desligamento automático em caso de sobreaquecimento, foram escolhidos cabos de 6 mm² para a ligação deste com o contator principal, sendo utilizada a cor vermelha para ambas as fases.

8. Cabos de conexão com a rede

A conexão entre o contator principal e o disjuntor de entrada de 50 A passa por um amperímetro e está em um quadro com ventilação forçada, mesmo assim, foi considerada uma temperatura de operação máxima de 45 °C e instalado com o método de instalação D.

Assim, utilizando a mesma metodologia dos itens anteriores, definiu-se o cabo de 10 mm² na cor preta para esta conexão.

Já o cabo de conexão entre o disjuntor geral da central de geração e a caixa de passagem subterrânea é vermelho de 25 mm², possibilitando ampliação.

O cabo entre a caixa de passagem e a subestação do campus é de 35 mm², em virtude da distância de 100 m.

ANEXO I – Diagrama geral do sistema de geração

