



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL



LETÍCIA MATTOS MACIEL

ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DE CENÁRIOS DE PLANEJAMENTO
ENERGÉTICO INTEGRADO PARA O CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

OURO PRETO

2020

Letícia Mattos Maciel

ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DE CENÁRIOS DE PLANEJAMENTO
ENERGÉTICO INTEGRADO PARA O CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção de Grau em Engenharia Ambiental.

Professor orientador: Prof. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura

Ouro Preto – MG

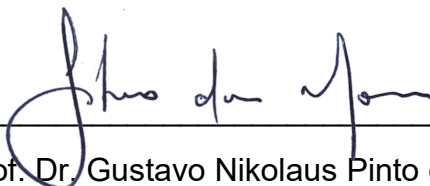
2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

Letícia Mattos Maciel

“ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DE CENÁRIOS DE PLANEJAMENTO
ENERGÉTICO INTEGRADO PARA O CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado no dia 20 de novembro de 2020 como pré-requisito parcial para obtenção do título de graduação em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Ouro Preto, submetida à aprovação da banca examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura
Escola de Minas – UFOP
Orientador

Defesa realizada à distância

Prof. Dra. Lívia Cristina Pinto Dias
Escola de Minas – UFOP

Defesa realizada à distância

Prof. Dra. Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino
Escola de Minas – UFOP

DEDICATÓRIA

Os anos de graduação em Engenharia Ambiental despertaram em mim a utopia do desenvolvimento sustentável. Todo o tempo de estudo dedicado à área ambiental me mostrou que é possível alcançar metas de desenvolvimento econômico e social com respeito ao meio ambiente e seus processos intrínsecos. O aprendizado técnico transcendeu os limites da vida profissional, e hoje levo comigo a missão de cuidar do meio ambiente como um propósito pessoal. Este trabalho foi pensado como uma forma de retornar à Universidade Federal de Ouro Preto um pouco do conhecimento adquirido durante a graduação. É uma forma de expressar minha gratidão por todo o aprendizado destes anos, e demonstrar que é possível que nossa universidade caminhe cada vez mais rumo à sustentabilidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao prof. Gustavo Moura pela orientação e principalmente pelo apoio desde a ideia inicial que deu origem a este trabalho.

Agradeço ao Sr. Paulo Viana, Eng. Eletricista da Prefeitura do Campus, e ao prof. Antonio Sanchez, pela ajuda com a disponibilização de informações vitais a este trabalho.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Ambiental da UFOP pela transmissão de todo o conhecimento que possibilitou que eu chegasse até aqui.

Agradeço aos meus pais por todo o apoio, incentivo e condições propiciadas a mim para que eu conseguisse concluir a graduação com excelência.

Agradeço às irmãs Utopianas por toda a compreensão durante os anos finais de graduação e por serem minhas principais incentivadoras nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos amigos da Engenharia Ambiental, em especial Marina, Cibele e Julio, pela parceria que vai além da vida acadêmica e profissional, e por estarem ao meu lado durante essa jornada.

Por fim, mas jamais menos importante, agradeço ao Yuri, por estar ao meu lado me fazendo acreditar que eu era capaz, quando sozinha eu achei que não seria. Seu apoio, carinho e companheirismo são essenciais para que eu continue alcançando meus objetivos.

“A utopia está lá no horizonte. Me aproximo dois passos, ela se afasta dois passos. Caminho dez passos, e o horizonte corre dez passos. Por mais que eu caminhe, jamais alcançarei. Para que serve a utopia? Serve para isso: para que eu não deixe de caminhar.”

Eduardo Galeano

RESUMO

É notável que fatores como o crescimento populacional e consequente desenvolvimento industrial e urbanização demandam cada vez mais energia, o que implica na busca por alternativas renováveis e sustentáveis. Ao partir do pressuposto de que a universidade possui um papel enquanto referência e modelo para a sociedade ao seu redor, o presente trabalho propõe uma melhoria para o setor energético do campus Morro do Cruzeiro da UFOP com a instalação de painéis fotovoltaicos, no sentido de torná-lo mais sustentável. Foi desenvolvido um Planejamento Energético Integrado – PEI, baseado em análise das faturas de energia elétrica do ano de 2018. Foram construídos dois cenários de PEI no modelo de otimização de sistemas energéticos híbridos HOMER Pro: um cenário referência considerando a situação energética atual do campus, e outro cenário alternativo solar, considerando a instalação de painéis fotovoltaicos para suprir o consumo e demanda de energia elétrica. A modelagem constatou uma viabilidade técnica e econômica para instalação dos painéis fotovoltaicos, onde o valor presente líquido do sistema ao longo dos 20 anos de tempo de projeto é reduzido em aproximadamente 28%, o custo da energia reduzido em 49% e o custo operacional foi reduzido em 46%; a instalação dos painéis pode ser adaptada nos telhados dos prédios do campus de acordo com o cálculo da área demandada. Em um segundo momento, os dois cenários foram avaliados sob a ótica de indicadores de sustentabilidade, o que identificou que a adoção do cenário alternativo solar traria maior sustentabilidade energética para o campus, além de ser uma oportunidade para otimização, racionamento e gerenciamento do uso de energia.

Palavras-chave: Planejamento Energético Integrado, Indicadores de Sustentabilidade, Geração Distribuída de Energia, Energia Solar Fotovoltaica.

ABSTRACT

It is notable that factors such as population growth and the consequent industrial development and urbanization demand more energy, which implies the search for renewable energy alternatives. Based on the assumption that the university has a role as a reference and model for the society around it, the present work proposes an improvement for the energy sector of the Federal University of Ouro Preto Morro do Cruzeiro campus with the installation of photovoltaic panels, in order to make it more sustainable. An Integrated Energy Planning - IEP was developed, based on an analysis of the electricity bills for the year 2018. Two IEP scenarios were built in the HOMER Pro hybrid energy system optimization model: a reference scenario considering the current energy situation of the campus, and another alternative solar scenario, considering the installation of photovoltaic panels to supply electricity consumption and demand. The modeling found a technical and economic feasibility for installing the photovoltaic panels, where the net present value of the system over the 20 years of project lifetime is reduced by approximately 28%, the energy cost reduced by 49% and the operational cost was reduced. reduced by 46%; the installation of the panels can be adapted on the roofs of the campus buildings according to the calculation of the required area. In a second moment, both scenarios were evaluated from the perspective of sustainability indicators, which identified that the adoption of the alternative solar scenario would bring greater energy sustainability to the campus, in addition to being an opportunity for optimization, rationing and management of the use of energy.

Keywords: Integrated Energy Planning, Sustainability Indicators, Distributed Energy Generation, Solar Photovoltaic Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - As etapas de funcionamento do Setor Elétrico Brasileiro	17
Figura 2 - Participação de cada fonte na geração centralizada em 2020.....	19
Figura 3 - Participação de cada fonte na geração distribuída em 2019	27
Figura 4 - Componentes de um sistema fotovoltaico on-grid e off-grid	28
Figura 5 - Classificação do campus Morro do Cruzeiro de acordo com a fatura de energia	31
Figura 6 – Interface inicial do HOMER Pro.....	47
Figura 7 - Dados da carga elétrica	47
Figura 8 - Interface de definição das tarifas de consumo	48
Figura 9- Interface de definição das tarifas de demanda.....	49
Figura 10 - Inserção do dado de emissão de CO ₂	49
Figura 11 - Dados do sistema fotovoltaico	50
Figura 12 - Curva de Carga do campus Morro do Cruzeiro.....	60
Figura 13 - Resultados da simulação do cenário referência.....	62
Figura 14 - Recurso solar para o campus Morro do Cruzeiro.....	62
Figura 15 - Resultados econômicos para o cenário alternativo solar	63

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Usinas Termelétricas em Operação no Brasil	23
Tabela 2 - Unidades consumidoras com geração fotovoltaica no segmento de serviços	32
Tabela 3 - Tarifa Horo-Sazonal Verde para consumidores do grupo A4 (Bandeira verde)	48
Tabela 4 – Síntese dos dados recolhidos nas faturas de energia de 2018	58
Tabela 5 – Comparação técnico-econômica entre os cenários.....	64
Tabela 6 – Valores de EROI para principais fontes energéticas da matriz elétrica brasileira.....	66
Quadro 1 –Indicadores de Sustentabilidade Energética	56
Quadro 2 – Resumo dos resultados obtidos na avaliação dos indicadores.	76

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS E QUADROS	viii
1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Justificativa.....	13
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo principal.....	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 O Setor Elétrico Brasileiro	16
2.1.1 Geração centralizada x distribuída.....	18
2.1.2 Consumo de energia no setor público.....	30
2.2 Sustentabilidade Ambiental e Energética.....	33
2.3 Indicadores de sustentabilidade.....	36
3 METODOLOGIA	43
3.1 O Planejamento Energético Integrado	43
3.2 Modelos Energéticos: O Modelo HOMER	46
3.3 Indicadores de sustentabilidade	51
3.3.1 Indicadores Econômicos	51
3.3.2 Indicadores Ambientais.....	53
3.3.3 Indicadores Humanos	54
3.3.4 Resumo dos Indicadores	56
4 PLANEJAMENTO ENERGÉTICO INTEGRADO DO CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO.....	57
4.1 Diagnóstico do consumo e da oferta de energia elétrica.....	57
4.2 Elaboração de cenários de PEI	60
4.2.1 Cenário referência.....	61
4.2.2 Cenário alternativo solar	62
4.2.3 Comparação técnico-econômica entre os cenários	64
5 AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE	66
5.1 Cenário referência.....	66

5.1.1	Indicadores econômicos	66
5.1.2	Indicadores ambientais	68
5.1.3	Indicadores humanos	70
5.2	Cenário alternativo solar	72
5.2.1	Indicadores econômicos	73
5.2.2	Indicadores ambientais	74
5.2.3	Indicadores humanos	75
5.3	Comparação do grau de sustentabilidade dos dois cenários	76
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

A Universidade Federal de Ouro Preto foi fundada em 21 de agosto de 1969, com a fusão das centenárias Escola de Minas e Escola de Farmácia, que existiam na cidade de Ouro Preto desde o fim do século XIX. Seu principal campus está localizado no Morro do Cruzeiro, que abriga 19 prédios, onde funcionam, além das salas de aula, inúmeros laboratórios, quadras poliesportivas, restaurante universitário, hospital aberto a comunidade, entre outras atividades.

É notável o papel da universidade como referência e modelo para a sociedade ao seu redor, uma vez que atua diretamente na produção de conhecimento, desenvolvimento de pensamento crítico, promoção de articulações, formação de cidadãos, profissionais e futuros líderes intelectuais. Visto isso, e aliando o conceito de desenvolvimento sustentável, que prevê o uso racional dos recursos naturais e é um tema em evidência atualmente, fica implícito o dever da universidade em buscar sempre a ampliação de políticas sustentáveis.

O Planejamento Energético Integrado (PEI) é uma oportunidade para aprimorar a relação entre a necessidade da energia para o desenvolvimento com a melhoria das condições para que esse aconteça, em conexão com a preservação do meio ambiente (EPE, 2005). No âmbito da universidade, a construção de uma cultura de gestão de energia traz consigo não só a otimização, racionamento e gerenciamento do uso de energia no campus, mas também uma diminuição de gastos que podem ser revertidos, por exemplo, na compra de novos equipamentos para laboratórios, promover melhoria na prestação de serviços como iluminação do campus e dos prédios e também abrir oportunidade para realização de ações de orientação da sociedade sobre padrões de consumo eficientes de energia (KURAHASSI, 2006).

O PEI se difere de um planejamento tradicional, que usualmente contemplava apenas uma análise de custo-benefício das opções de oferta de energia, por englobar simultaneamente as análises de demanda e oferta de energia elétrica. Ele contempla as diversas alternativas de oferta de energia,

medidas para gerenciar a demanda de energia de acordo com os objetivos e critérios definidos para o planejamento, e além disso, também traz o diferencial de possibilitar a abrangência de considerações políticas, ambientais, sociais e econômicas (EPE, 2005). Dentre as diversas possibilidades que o PEI traz, este trabalho focará apenas no planejamento da demanda e da oferta de energia elétrica para o campus Morro do Cruzeiro da UFOP.

A energia fotovoltaica é uma das opções de oferta de energia elétrica que vem crescendo bastante no Brasil, onde houve um aumento de 316% da oferta interna entre 2017 e 2018, que engloba a geração centralizada e, principalmente, a geração distribuída (EPE, 2019). A energia solar fotovoltaica representa 63% das fontes de energia na geração distribuída, e tende a aumentar à medida que ocorre uma expansão média anual da potência instalada de no mínimo 1000 MW (MME/EPE, 2019). Um dos motivos da expansão desta energia é que o país recebe alta incidência solar em quase todo seu território até mesmo no inverno. Na região onde se encontra o campus Morro do Cruzeiro, a taxa de irradiação média anualmente é de 4.272 Wh/m².dia (INPE, 2020).

Outro aspecto importante é que o crescimento da geração distribuída de energia vem sendo amparado por uma política de inserção da mesma no Brasil, prevista nas resoluções nº 482/2012 e nº 687/2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Tais resoluções preveem uma série de ações regulatórias que trazem vários benefícios para o consumidor, como por exemplo o sistema de *net metering*, onde é dada a possibilidade de utilização da rede como bateria, ou seja, a energia que o cliente produzir e não utilizar para suprir sua demanda naquele momento poderá ser armazenada na rede em forma de créditos e resgatada mais uma vez quando sua produção não suprir a demanda.

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma análise do perfil de consumo de energia elétrica no campus Morro do Cruzeiro, a partir da construção de dois cenários utilizando o modelo de sistemas energéticos HOMER: o primeiro, retratando a situação atual do campus, como consumidor de energia da rede da concessionária distribuidora; o segundo, com a instalação de painéis fotovoltaicos que supram parcialmente a demanda de energia elétrica do campus. Após a construção dos cenários, é feita uma análise qualitativa de

indicadores econômicos, ambientais e sociais, a fim de avaliar o grau de sustentabilidade do sistema energético proposto (FUJII, 2015).

1.1 Justificativa

A UFOP, enquanto Instituição Federal, é obrigada por lei, desde 2012, a adotar critérios e práticas para promoção do desenvolvimento sustentável (BRASIL, 2012). É possível relacionar a questão energética e a sustentabilidade dentro das instituições federais a partir do Decreto nº 7746 de 5 de junho de 2012 e da Instrução Normativa nº 10 de 12 de novembro de 2012, o que é melhor explorado nos parágrafos a seguir.

O Decreto nº 7746 de 5 de junho de 2012 estabelece critérios e práticas para a promoção do desenvolvimento nacional sustentável nas contratações realizadas pela administração pública federal direta, autárquica e fundacional e pelas empresas estatais dependentes. Dessa maneira, a UFOP se enquadra como uma entidade regida por administração pública federal, sendo obrigada a seguir tal decreto (BRASIL, 2012).

Em seu artigo 2º, o decreto dispõe que:

“na aquisição de bens e na contratação de serviços e obras, a administração pública federal direta, autárquica e fundacional e empresas estatais dependentes adotarão critérios e práticas sustentáveis nos instrumentos convocatórios, observado o disposto neste decreto”. (BRASIL, 2012)

Tais critérios e práticas sustentáveis são descritos no artigo 4º do decreto, sendo considerados: baixo impacto sobre recursos naturais como flora, fauna, ar, solo e água; maior eficiência na utilização de recursos naturais como água e energia; e uso de inovações que reduzam a pressão sobre recursos naturais (BRASIL, 2012).

O Decreto nº 7746 trata em seu artigo 16º sobre a obrigatoriedade de elaboração e implementação de Planos de Logística Sustentável - PLS nas

instituições. A Instrução Normativa nº 10 de 12 de novembro de 2012 estabelece as regras para elaboração dos PLS, tratando em seu artigo 5º que os PLS deverão conter no mínimo, práticas de sustentabilidade e racionalização do uso de materiais e serviços (entre outros itens). No seu artigo 8º, a instrução normativa determina que as práticas de sustentabilidade e racionalização do uso de materiais e serviços deverão abranger, entre outros temas, a energia elétrica (BRASIL, 2012).

Desse modo, este estudo viabiliza a inclusão da UFOP dentro destes requisitos do Decreto nº 7746 e da Instrução Normativa nº 10, o que justifica a realização deste trabalho.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

Elaborar cenários para o Planejamento Energético Integrado no campus Morro do Cruzeiro da UFOP e avaliar o grau de sustentabilidade ambiental, energética e econômica de ambos cenários.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar revisão bibliográfica sobre os fatores a serem levados em consideração dentro do Planejamento Energético Integrado (PEI) e a sustentabilidade ambiental e energética;
- Analisar a importância da gestão da energia no setor público no Brasil, em especial nas universidades federais;
- Fazer uma conexão entre PEI e sustentabilidade energética e ambiental;
- Diagnosticar e analisar o perfil de consumo de energia elétrica do campus Morro do Cruzeiro;
- Elaborar cenários de PEI utilizando o modelo HOMER;

- Estudar a viabilidade técnico-econômica da instalação de painéis fotovoltaicos no campus Morro do Cruzeiro;
- Avaliar os cenários de acordo com indicadores ambientais, energéticos, econômicos e sociais;
- Estimar o grau de sustentabilidade dos cenários a partir da avaliação dos indicadores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Setor Elétrico Brasileiro

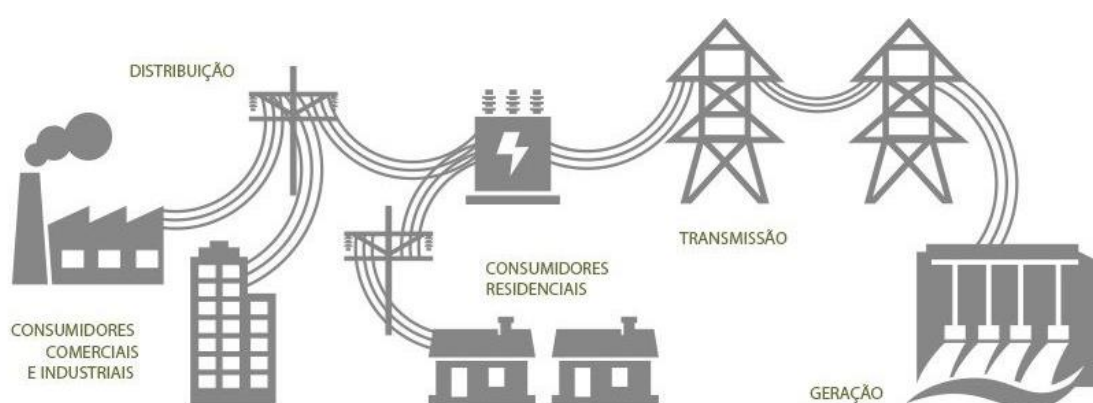
O Setor Elétrico Brasileiro (SEB) funciona essencialmente por meio de quatro segmentos: a geração, a transmissão, a distribuição e a comercialização de energia elétrica. A geração é onde ocorre a produção de energia, como por exemplo, nas usinas hidrelétricas; em uma segunda etapa, a energia gerada pelas usinas é transmitida para os grandes centros de carga, que é uma das muitas funções realizadas pela rede de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN) (EPE, 2019). Após a transmissão, ocorre a comercialização da energia elétrica e sua entrega ao consumidor final por meio do segmento de distribuição, que é composto pelas concessionárias e permissionárias de energia elétrica.

Para contextualizar melhor a relação entre os segmentos de distribuição e comercialização de energia elétrica, é interessante relembrar sobre alguns fatos históricos. Nos anos de 2001 e 2002 ocorreu no Brasil uma crise de racionamento de energia, período em que a oferta de energia no país foi prejudicada devido à uma série de fatos combinados, que tiveram início ainda na década de 1980: desinteresse em manter investimentos na geração e transmissão de energia, profundo corte de empregos de engenheiros especializados (aporte de conhecimento de tecnologia dos EUA), aliados à questão do endividamento externo e alta inflação, a estatal (Eletrobrás) passou a ser vista como não lucrativa e passou a sofrer ataques em relação à necessidade de privatização. Além disso, o bem social – a energia elétrica - passou a ser visto como mercadoria pela nova visão neoliberal introduzida com afinco no então Governo Federal.

Após a crise, mais precisamente no ano de 2004, o Governo Federal promulgou a lei do Novo Modelo do Setor Elétrico (Lei Federal nº 10.848/2004) visando a reestruturação deste, bem como oferecer incentivo aos setores públicos e privados de maneira a consolidar a geração e o fornecimento de energia no país com tarifas reduzidas por meio do processo de leilões públicos

de energia elétrica, os quais são regulados pela ANEEL. Nessa circunstância, o mercado de energia foi dividido em dois ambientes paralelos: o Ambiente de Contratação Regulada – ACR, onde se enquadra a contratação de energia elétrica pelas empresas de distribuição, que ocorre por meio dos leilões públicos que garantem que todo o mercado seja atendido, e o Ambiente de Contratação Livre – ACL, onde consumidores livres, comercializadores e demais agentes não regulados se adequam na compra de energia (ENERGISA, 2020). A Figura 1 ilustra o processo de funcionamento do Setor Elétrico Brasileiro.

Figura 1 - As etapas de funcionamento do Setor Elétrico Brasileiro



Fonte: Oliveira Miguel, 2020

As etapas de geração e transmissão possuem sua coordenação e controle de operação realizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que também é responsável por planejar a operação dos sistemas isolados do país, sendo a ANEEL responsável por fiscalizar e regulamentar sua atuação (ONS, 2020).

O SIN, por sua vez, é constituído de quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e grande parte da região Norte, que são definidos de acordo com as tendências de consumo, geração e transmissão, que os tornam diferentes entre si, e não pela região geográfica apenas (RIBEIRO, 2019). O objetivo do SIN é integrar os recursos de geração e transmissão de energia destes subsistemas por meio da malha de transmissão, permitindo a transferência de energia entre eles, explorando a diversidade de todos os recursos disponíveis e garantindo o atendimento ao mercado de maneira segura e econômica (ONS, 2020).

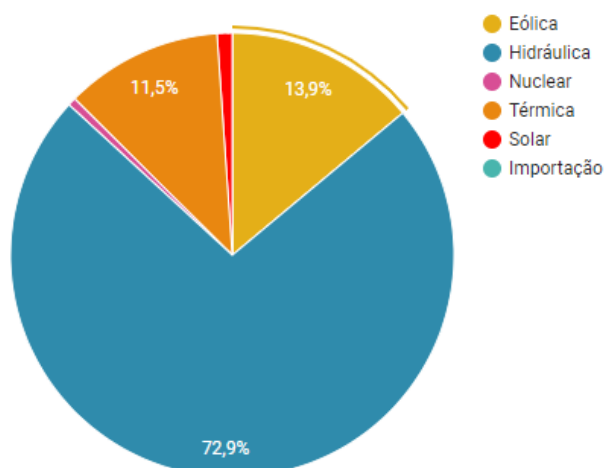
2.1.1 Geração centralizada x distribuída

O modelo de funcionamento do setor elétrico brasileiro conforme descrito acima vale-se do que chamamos de geração centralizada, ou seja, são grandes usinas que produzem a energia, que vai até os consumidores finais por meio das linhas de transmissão e distribuidoras. De forma subsidiária, existe a geração distribuída de energia que, em definição livre, é aquela que ocorre em pequenas centrais geradoras que se localizam próximas ou no local de consumo da energia, o que exclui a necessidade de utilização das linhas de transmissão e da compra de energia das concessionárias.

O fato de que o Brasil é um país em desenvolvimento traz muitas implicações, como o aumento do ritmo de industrialização e o crescimento da população, o que desencadeia também uma grande e crescente demanda de energia elétrica (LOPES *et al*, 2015). Segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2020, houve aumento de 1,3% no consumo de energia elétrica entre os anos de 2018 e 2019, e o Plano Decenal de Expansão de Energia (2019) prevê um aumento de 3,8% ao ano no consumo de eletricidade entre 2019 e 2029.

Como o SEB possui a geração centralizada como maneira consolidada de produzir energia, o que traz vantagens do ponto de vista da economia da escala e da transmissão de eletricidade em longas distâncias, é possível inferir que a maior parte do país consome energia elétrica proveniente deste tipo de geração. Atualmente, a matriz de geração centralizada de energia elétrica é composta majoritariamente por usinas hidrelétricas, termoelétricas e eólicas, conforme mostrado no gráfico da Figura 2.

Figura 2 - Participação de cada fonte na geração centralizada em 2020



Fonte: ONS, 2020

A predominância da geração hidráulica pode ser explicada devido à abundância deste recurso no Brasil, além de ter uma forte competitividade econômica em seu histórico (TOLMASQUIM, 2016). Apesar de ser considerada uma fonte de energia renovável, ou seja, provém de um recurso inesgotável, do ponto de vista socioambiental as hidrelétricas não podem ser consideradas sustentáveis. Isso se deve aos severos (e em maioria, irreversíveis) impactos negativos decorrentes de sua instalação, pois a formação do reservatório requer o alagamento de extensas áreas, o que prejudica o ecossistema local como um todo: a fauna aquática, a mata ciliar e flora dos arredores do rio. Além disso, também pode afetar possíveis comunidades existentes ao longo da área a ser alagada, o que é um grave impacto social por alterar toda a dinâmica de vida de tal população.

Como a energia hídrica é considerada renovável e proveniente de um recurso abundante no Brasil, além da existência de reservatórios prover certos benefícios como controle de cheias, irrigação, processamento industrial, suprimento de água para consumo humano, recreação e serviços de navegação, esta foi uma fonte de energia que teve destaque constante dentre as demais no país (TOLMASQUIM, 2016).

Atualmente, o Brasil enfrenta o esgotamento de recursos hídricos que sejam adequados para a construção de hidrelétricas com reservatório, pois as últimas reservas se encontram em locais ambientalmente sensíveis, tais como a

Amazônia. As usinas hidrelétricas de Jirau e Belo Monte, localizadas na região amazônica, são exemplos destes casos, pois são usinas a fio d'água (ou seja, não possuem reservatório de regularização). Dessa maneira, o SIN como um todo perde sua capacidade de regularização (FUHRMANN, 2016).

Como depende do recurso hídrico, o pleno funcionamento das hidrelétricas é diretamente dependente da sazonalidade hidrológica, e quando ocorrem secas severas como a que ocasionou a crise do racionamento de energia em 2001, o fornecimento de energia é prejudicado. Com a previsão de mudanças climáticas para o futuro, esta sazonalidade pode se agravar ainda mais, visto que as mudanças climáticas podem impactar no regime hidrológico, implicando em queda na produção de energia proveniente das hidrelétricas e consequentemente no atendimento da demanda.

Os impactos socioambientais negativos têm dificultado cada vez mais o licenciamento ambiental para construção de novas hidrelétricas, que também requerem alto investimento financeiro. Tudo isso atrelado às incertezas trazidas pelas mudanças climáticas fez com que novas fontes de energia se desenvolvessem no Brasil, como a eólica e a térmica, que ocupam respectivamente o segundo e terceiro lugar na participação da atual matriz energética centralizada.

A presença da energia eólica na matriz energética do Brasil teve seu início com a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – Proinfa em 2002, quando houve grande investimento técnico e financeiro em diversas fontes renováveis de energia, de modo a tornar o mercado mais atrativo, com poucos riscos. Após o Proinfa, o mercado da energia eólica desenvolveu-se ao longo da década seguinte, havendo apenas uma empresa fabricante de aerogeradores com fábricas em operação no país até 2007. Entretanto, com a crise financeira de 2008-2009, os mercados europeu e norte-americano esfriaram, o que atraiu empresas estrangeiras para países em desenvolvimento como o Brasil (SIMAS E PACCA, 2013).

A energia eólica pode ser extraída do deslocamento das massas de ar, recurso abundante e infindável, cuja energia cinética é transformada em energia mecânica por meio das hélices, que fornecem energia à um gerador que

transforma a energia mecânica em eletricidade. Como desvantagens, pode-se citar, segundo De Azevedo *et al.* (2017):

- Em relação ao meio físico, a instalação das fazendas eólicas requer grandes áreas devido à distância necessária entre as turbinas, além de poder implicar em desmatamento e erosão do solo;
- O ruído proveniente dos aerogeradores, produzido tanto pelas turbinas quanto pelo contato das hélices com o ar;
- A possibilidade de morte de aves caso a fazenda eólica seja instalada em locais com abundância de aves ou que coincida com áreas de rota migratória, de reprodução ou de proteção permanente destas;
- Interferência eletromagnética causada quando as hélices alteram o comprimento de ondas como as de televisão e rádio, por exemplo, e o sinal é refletido;
- Impacto visual dos aerogeradores, devido ao grande porte e por serem instalados em grande quantidade;
- Dificuldades decorrentes da variabilidade e previsibilidade do recurso vento.

Como a tecnologia eólica é relativamente recente, ainda carece de estudos sobre seus impactos ambientais e consequências a longo prazo. É necessário que exista uma troca de experiências entre poder público, comunidade e empreendedores da área para sistematizar informações, viabilizar avanços tecnológicos que minimizem impactos negativos e favorecer o desenvolvimento sustentável da fonte (TOLMASQUIM, 2016).

Como vantagens, a energia eólica oferece o fato de ser renovável; não produzir resíduos (exceto os provenientes da fabricação de seus componentes), não emitir gases poluentes para a atmosfera e não necessitar de recurso hídrico para seu funcionamento; possuir instalação móvel, que permite seu desmonte e total recuperação da área, além de possibilitar que o solo ao seu redor seja utilizado para outros fins além da produção de energia; entre outras (DIAS, 2018).

Por ser uma fonte de energia renovável que apresenta diversas vantagens e baixo impacto ambiental negativo relativo à outras fontes, energia eólica tem

um grande potencial de desenvolvimento e expansão. O Plano Decenal de Expansão de Energia (2019) prevê em um cenário de referência que a energia eólica será a principal indutora do crescimento da oferta de energia elétrica nos próximos dez anos, com aumento da capacidade instalada de 15 GW em 2019 para 39.5 GW em 2029.

Por outro lado, as fontes hídrica e eólica estão sujeitas à sazonalidade de seus recursos, o que as denomina renováveis intermitentes. Devido à este fato, as usinas termelétricas surgem em terceiro lugar na participação da atual matriz elétrica centralizada, pois atuam complementando as demais fontes, fornecendo o sistema com uma produção mais estável, independente de variações ocasionadas por fenômenos externos e podendo atender a demanda de energia quando houverem variações de carga do sistema e da geração de energia proveniente das fontes renováveis (RIBEIRO, 2019). Além disso, as termelétricas possuem a vantagem de operar como reserva, possuir rápida atuação, o que são qualidades necessárias e desejáveis para um sistema com muitas fontes renováveis intermitentes, como é o caso do Brasil (COCHRAN *et al. apud* TOLMASQUIM, 2016).

As usinas termelétricas produzem energia a partir da queima de algum combustível; a queima gera um vapor de alta pressão a partir do aquecimento de uma caldeira com água, que move as pás de uma turbina que induz a geração de energia (ONS, 2020). O combustível é qualquer material que gere calor, e por isso, o impacto ambiental causado pelas usinas termelétricas pode variar de acordo com o combustível utilizado, visto que cada um possui uma origem diferente (podendo ser renovável ou não) e consequentemente emitindo diferentes gases poluentes e concentração de CO₂ distintas. A Tabela 1 mostra a proporção dos tipos de combustível mais comuns nas usinas termoelétricas em operação no país para a potência fiscalizada em GW, sendo esta, a potência considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora.

Tabela 1 – Usinas Termelétricas em Operação no Brasil

Combustível Final	Potência Fiscalizada (kW)	% da Potência Fiscalizada Total
Gás Natural	14.903.036,79	34,69%
Bagaço de Cana de Açúcar	11.627.702,20	27,07%
Óleo Diesel	4.441.101,97	10,34%
Óleo Combustível	3.301.595,38	7,69%
Carvão Mineral	3.202.740,00	7,46%
Licor Negro	2.530.719,00	5,89%
Outros Energéticos de Petróleo	1.023.328,00	2,38%
Resíduos Florestais	461.317,00	1,07%
Gás de Alto Forno - CM	365.690,00	0,85%
Gás de Refinaria	319.530,00	0,74%
Biogás - RU	168.508,60	0,39%
Calor de Processo - OF	165.970,00	0,39%
Gás de Alto Forno - Biomassa	127.705,05	0,30%
Lenha	82.215,00	0,19%
Casca de Arroz	53.333,00	0,12%
Carvão Vegetal	48.197,00	0,11%

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do SIGA (2020)

Segundo dados do Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA (2020), atualmente os combustíveis fósseis ainda representam 65,7% do total utilizado nas usinas termelétricas, sendo gás natural, óleo diesel, óleo combustível e carvão mineral os mais relevantes, respectivamente. O gás natural é considerado um combustível multifuncional, podendo ser utilizado em diferentes ciclos de geração de energia elétrica; traz também para as usinas termelétricas um tempo de acionamento mais rápido, além dos custos de investimento e prazos de construção menores do que as de usinas termelétricas a carvão. Do ponto de vista ambiental, apresenta a vantagem de emitir uma concentração menor de poluentes atmosféricos quando comparada à usinas que utilizam carvão como combustível: as usinas à gás natural, operando em ciclo combinado, emitem uma taxa de 400g CO₂/kWh, enquanto as à carvão emitem 740g CO₂/kWh (RIBEIRO, 2019). Os combustíveis óleo, diesel e carvão mineral, por outro lado, tendem a ser menos utilizados no futuro por serem tecnologias mais antigas, com emissões ainda mais poluentes e por possuírem um preço

mais elevado que o gás natural e a biomassa (RIBEIRO, 2019; SILVA *et al.*, 2018).

A biomassa é um combustível renovável para as usinas termelétricas, por ser proveniente de resíduos sólidos orgânicos e/ou de atividades humanas como a agricultura, florestal e a pecuária (DIAS, 2018). No Brasil, os tipos de biomassa mais utilizados como combustível para termelétricas são o bagaço de cana-de-açúcar e o licor negro (Tab. 2), ambos muito utilizados para cogeração de energia nas indústrias de onde são provenientes (DE ARAGÃO PEDROSO *et al.*, 2018). Apesar da vantagem de ser um combustível renovável, o bagaço de cana-de-açúcar, ao ser utilizado para geração de energia elétrica, não se adequa no quesito de suprir a demanda de energia centralizada por sua disponibilidade estar sujeita à época da safra de cana-de-açúcar; ademais, possui um longo tempo de ativação por ser um combustível sólido e utilizar tecnologia de ciclo a vapor, o que o impede de assumir um papel de usina de reserva (FUHRMANN, 2016).

O licor negro é um resíduo da indústria de papel e celulose, considerado perigoso para o meio ambiente por sua alcalinidade ativa. Na indústria, a fim de evitar o seu descarte incorreto ele é direcionado para a utilização como combustível em caldeiras, com o objetivo de gerar energia (DE ARAGÃO PEDROSO *et al.*, 2018). Dessa maneira, apesar de ter uma expressiva utilização como combustível em termelétricas, ele se enquadra mais como geração distribuída do que centralizada.

Cabe salientar que o uso de biomassa para produção de energia traz oportunidades de investimento, por ser um potencial renovável e por sua cadeia produtiva possuir grande demanda de recurso humano, o que pode gerar emprego e renda em regiões remotas onde este tipo de indústria costuma se instalar, conforme cita De Aragão Pedroso *et al.*, (2018):

“são necessárias políticas de fortalecimento dos setores e regiões agrícolas, melhorando a qualidade de vida da população rural, promovendo a inclusão social, valorizando a cultura rural, reduzindo as desigualdades e aumentando as oportunidades

para o homem do campo e desse modo, fortalecendo as cadeias produtivas da economia rural”.

Pode-se constatar que o sistema centralizado de produção de energia brasileiro é bem desenvolvido, contando com as vantagens de produção em larga escala, transmissão para longas distâncias, a compensação entre as diferentes fontes de geração possibilitada pelo SIN e a facilidade oferecida para o cliente final, que recebe a energia em sua residência sem demais preocupações além da fatura. Por outro lado, pode trazer algumas desvantagens, conforme discutido por Lopes et al. (2015):

- O SIN ainda não atinge 100% do território brasileiro, visto que existem ainda no país muitas regiões e comunidades remotas, com baixa densidade populacional, que demandariam um alto investimento para a transmissão da energia com pouco retorno econômico associado;
- A maior parte da energia elétrica atualmente provém de fontes renováveis intermitentes, o que é um fator limitante quando se leva em consideração as possíveis e prováveis mudanças climáticas; isso faz com que o sistema de geração dependa das termelétricas para garantir sua estabilidade, e conseqüentemente do consumo de combustíveis fósseis, o que traz prejuízos econômicos e ambientais para o país;
- Como é utilizada há muitos anos, a estrutura do SIN está depreciando-se, sem que haja alterações no modelo de infraestrutura e operação; isso acentua as perdas de energia durante a transmissão e dificulta o desenvolvimento de melhorias no sistema como um todo.

Todos estes fatos aliados à crescente demanda por energia abrem precedente para investimento em alternativas para a geração centralizada. Neste contexto, a geração distribuída surge como oportunidade de contenção para estas lacunas.

A Resolução da ANEEL nº 482 de 17 de abril de 2012 foi o marco regulatório sobre a geração distribuída de energia elétrica. São os principais conceitos definidos nesta resolução:

“I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras; (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)

II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras; (Redação dada pela REN ANEEL 786, de 17.10.2017)

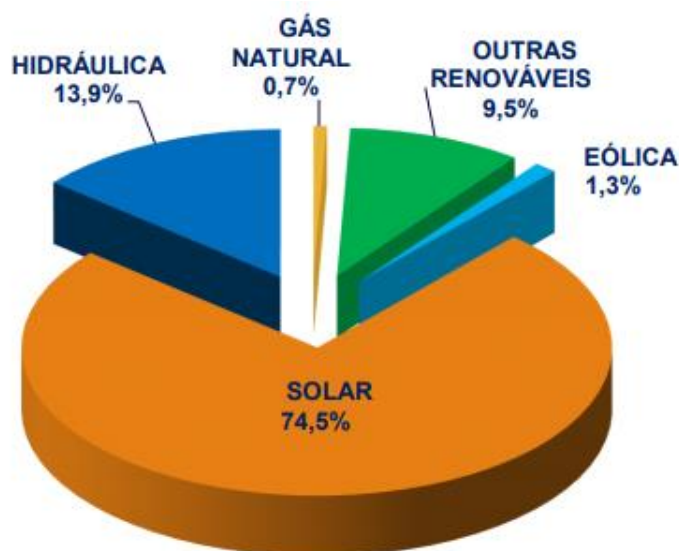
III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa; (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)”.

Ao implementar o sistema de compensação de energia elétrica no país e modificar os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, a Res. nº 482/2012 possibilitou a regulamentação para micro e minigeradores de energia e removeu a barreira existente para a contratação e para conexão dos sistemas distribuídos com a rede elétrica (EPE, 2014). Ao ser alterada em 2015, a resolução ampliou o acesso à geração distribuída para um número maior de unidades consumidoras, permitindo que geradores de até 5 MW se conectassem à rede de distribuição desde que utilizassem fontes renováveis de energia ou cogeração qualificada; além disso também regulamentou o compartilhamento da geração de energia e reduziu o

prazo para a resposta das distribuidoras, entre outras melhorias no processo (EPE, 2019; TOLMASQUIM, 2016).

Desde o lançamento da Res. nº 482/2012 a geração distribuída vem crescendo ano após ano, o que foi demonstrado no Balanço Energético Nacional de 2020: houve um aumento de 169% na geração distribuída de energia em 2019. Atualmente, a matriz de fontes energéticas na geração distribuída (Fig. 3) é composta em 74,5% de energia solar, seguida de 13,9% de energia hidráulica por meio das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e de 9,5% de outras fontes renováveis tais como biogás proveniente de resíduos agrícolas e urbanos, casca de arroz, gás de alto-forno (biomassa) e resíduos florestais.

Figura 3 - Participação de cada fonte na geração distribuída em 2019



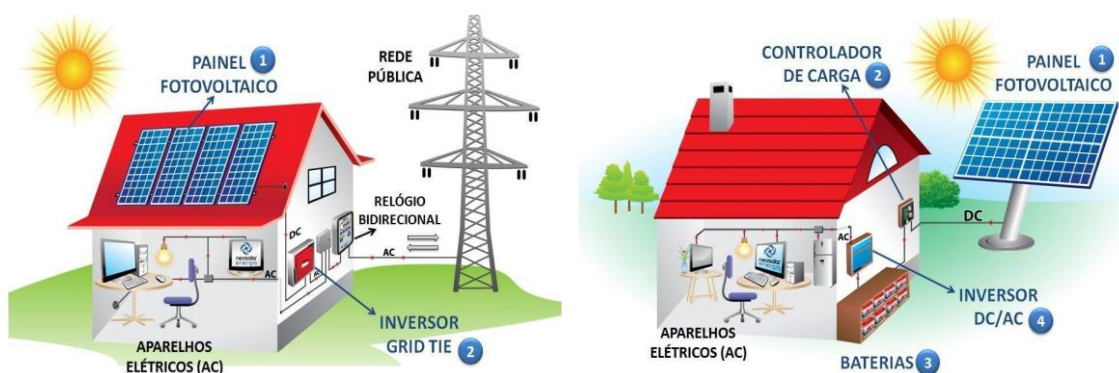
Fonte: EPE, 2020

É notável a participação da energia solar na matriz de geração distribuída. Esta fonte de energia começou a ser utilizada no Brasil na modalidade fotovoltaica a partir da década de 1990, quando foi elencada como solução de eletricidade para locais distantes da rede elétrica; continuou crescendo nos anos subsequentes por meio de programas federais como o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios – PRODEEM e o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – Programa Luz para Todos, criados em 1994 e 2003, respectivamente (TOLMASQUIM, 2016).

Existem duas maneiras de aproveitamento da energia solar para geração de energia elétrica: a geração fotovoltaica, onde a luz do sol é diretamente convertida em eletricidade por meio de elementos semicondutores fotossensíveis, e a geração heliotérmica, que utiliza a luz solar para aquecimento de fluido para que este gere calor e consequentemente, eletricidade, sendo uma forma de geração termelétrica. Não só no Brasil, mas em todo o mundo, a energia heliotérmica é pouco explorada por não ser tão economicamente viável quanto a fotovoltaica, sendo uma das fontes renováveis mais caras do mercado (REN21 *apud* TOLMASQUIM, 2016). Devido à baixa expressividade da energia heliotérmica no Brasil, será dado um enfoque maior à energia fotovoltaica neste trabalho.

Um sistema de geração fotovoltaica tem sua composição variada caso ele seja isolado (*off-grid*) ou conectado à rede (*grid-tie* ou *on-grid*), conforme é mostrado na Figura 4. Ambos precisam do painel fotovoltaico e de um inversor, mas caso seja um sistema *off-grid*, necessita ainda de bateria para armazenar a energia gerada de maneira que o sistema ainda possa funcionar à noite e de controlador de carga para evitar sobrecargas ou descargas exageradas na bateria; caso seja um sistema *on-grid*, o inversor deve, além de converter corrente contínua em alternada, manter a sincronia do sistema com a rede elétrica (NEOSOLAR, 2020).

Figura 4 - Componentes de um sistema fotovoltaico *on-grid* e *off-grid*



Fonte: Neosolar, 2020

A energia solar fotovoltaica é considerada renovável e limpa, não tendo emissões de poluentes e gases de efeito estufa no processo de geração de energia. Os impactos relacionados ao uso e ocupação do solo podem ser

minimizados devido à sua flexibilidade de instalação, visto que os painéis podem ser implantados no topo ou telhado de edificações já existentes. Outra vantagem é ser dependente do recurso solar, abundante no Brasil, que recebe alta irradiação solar devido à sua localização tropical, posição no globo terrestre que recebe a maior incidência solar ao longo do ano. De fato, ao analisar a componente difusa da irradiação solar aproveitada pela geração fotovoltaica, percebe-se que mesmo sua variabilidade intrer anual, em relação à média de longo prazo, é menor do que a observada na geração eólica ou até mesmo na hidrelétrica. Também é importante ressaltar o fato de que o Brasil possui grandes reservas de quartzo de qualidade, mineral do qual derivam-se as células fotovoltaicas de silício; dessa maneira, existe potencial para o país se tornar um produtor de células e módulos solares com alto valor agregado, gerando vantagem competitiva (EPE, 2012).

É importante lembrar que a produção dos painéis fotovoltaicos é dada por meio de uma indústria energointensiva que por sua vez, possui diversos impactos. Assim, o aspecto negativo da geração fotovoltaica está associado ao ciclo de vida dos materiais. Como é necessário silício nas células fotovoltaicas, o ciclo de vida de um módulo fotovoltaico está atrelado à produção do silício por meio da indústria metalúrgica, que gera impactos desde a fase de extração até a fase de fabricação, onde há liberação de gases poluentes para a atmosfera. Também deve ser considerada a possibilidade de contaminação da água e solo caso seja feito um descarte incorreto das baterias (SILVA *et al.*, 2018). Em todo caso, se destacam as vantagens da geração fotovoltaica, e com os benefícios trazidos com a regulamentação do governo e a constante queda nos preços para instalação, esta fonte energética tem alto potencial de crescimento dentro da geração distribuída.

Do ponto de vista do consumidor de energia elétrica, a geração distribuída apresenta como vantagem uma economia na fatura, visto que o consumidor se torna independente das tarifas de consumo das concessionárias, tendo que pagar a elas somente a taxa de disponibilidade, que é cobrado para manutenção quando seu sistema é conectado à rede; além disso, a sustentabilidade do sistema é um ponto crucial, visto que causa sempre um impacto menor ao meio ambiente em comparação com as usinas de geração centralizada, ou até mesmo

zero impacto ambiental dependendo da fonte geradora. Como desvantagem, a geração distribuída exige um alto investimento inicial e o enfrentamento de uma extensa burocracia para conectar o sistema à rede adequadamente. Entretanto, dependendo do sistema de geração o tempo de payback é curto e a conexão à rede permite seu uso para depositar a energia excedente e resgatá-la quando necessário, e assim as desvantagens se tornam apenas detalhes iniciais do processo de instalação, que são superados pelas vantagens do sistema.

O crescimento da geração distribuída pode ser justificado não só pela redução dos custos de investimento e transação, mas também pelo papel mais ativo tomado pelos consumidores. De modo geral, a integração da geração distribuída ao já consolidado sistema elétrico brasileiro pode propiciar benefícios como a redução de perdas elétricas, visto que existe uma proximidade dos locais de geração e consumo da energia, e a diminuição da carga do sistema e consequente aumento na confiabilidade deste, caso os sistemas distribuídos estejam localizados estrategicamente e forem operados nas horas corretas, o que pode reduzir o custo de atendimento a demanda, pois possivelmente as usinas mais caras, como as termelétricas, não precisem ser acionadas (EPE, 2018).

Por outro lado, o avanço da geração distribuída também traz desafios, pois suas características apresentam potencial para transformar o sistema elétrico que hoje é operado majoritariamente pela geração centralizada. Dessa forma, a complexidade do sistema aumenta significativamente com a introdução de uma nova maneira de geração, o que demanda novas práticas de planejamento da expansão e operação das redes elétricas e da geração de energia (EPE, 2018).

2.1.2 Consumo de energia no setor público

Segundo dados das faturas de energia do campus Morro do Cruzeiro, este se enquadra na classe de consumo “Poder Público”, conforme é possível observar na Figura 5. Desta maneira, pode-se considerar o campus como um conjunto de edificações do Setor Público Federal.

Figura 5 - Classificação do campus Morro do Cruzeiro de acordo com a fatura de energia



Cemig Distribuição S.A. CNPJ 06.981.180/0001-16 / Insc. Estadual 062.322136.0087
 Av. Barbacena, 1.200 - 17º andar - Ala A1 - CEP 30190-131 - Belo Horizonte - MG

CAMPUS OURO PRETO
 RUA UFOP 503 EL
 UFOP
 35400-000 OURO PRETO, MG
 CNPJ 23.070.659/0001-10

NOTA FISCAL - CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA

Classe Poder Público	Subclasse Poder Publico Federal	Modalidade Tarifária THS Verde A4
--------------------------------	--	---

Fonte: CEMIG, 2019

O PDE 2019 insere as edificações públicas no setor de serviços para fins de análise e projeção. Este setor se mostra pouco representativo em comparação com os demais, representando 5% do consumo final de energia no Brasil de acordo com o BEN de 2018. A energia elétrica representa a maior fonte de energia consumida pelo setor, representando 92% do total (EPE, 2019).

Já o Atlas da Eficiência Energética do Brasil (EPE, 2019) agrega o setor público dentro de uma análise geral para edificações. A análise de edificações se divide ainda entre o setor residencial e o setor de serviços, que por sua vez engloba os setores comercial e público, seguindo a mesma classificação do BEN. Apesar de compreenderem atividades totalmente distintas, os setores comercial e público apresentam semelhança na demanda, sendo a eletricidade a maior parte da matriz energética para estes setores. O documento ressalta a expressividade da geração distribuída de energia dentro do setor de serviços como alternativa ao uso da rede elétrica nos horários em que o preço da tarifa horo-sazonal é mais caro ou ainda como forma de mitigação para eventuais problemas no fornecimento de energia no caso de segmentos críticos. Destaca-se também o notável crescimento da geração solar fotovoltaica dentro do setor de serviços, que concentrou, em outubro de 2019, 43% da potência fotovoltaica instalada distribuída, segundo dados do Sistema de Registro de Geração

Distribuída – SISGD da ANEEL (EPE, 2019). A Tabela 2 ilustra amplitude da potência instalada de geração fotovoltaica no setor de serviços, no qual se enquadra o setor público.

Tabela 2 - Unidades consumidoras com geração fotovoltaica no segmento de serviços

Classe de Consumo	Nº de unidades	Potência Instalada (kW)
Comercial	19.601	520.646
Iluminação Pública	7	123
Poder Público	599	22.223
Serviço Público	67	2.077

Fonte: Adaptado de EPE, 2019

O Atlas da Eficiência Energética do Brasil (2019) frisa ainda uma lacuna na disponibilidade de dados frequentes e confiáveis sobre o consumo e hábito de uso de energia no setor de edificações, o que dificulta a promoção da transparência e do aprimoramento de políticas de eficiência energética (EPE, 2019).

Conforme discutido anteriormente, é notável que o consumo de energia vem aumentando ano após ano, o que vem acontecendo inclusive no setor público. De acordo o BEN (2020), o consumo de energia elétrica no setor público progrediu 2,1% em 2019, enquanto o país registrou como um todo o aumento de 1,3% no consumo de energia elétrica neste período. Segundo análise dos Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição fornecidos pela ANEEL, nos últimos 10 anos houve um aumento de 57% nos valores médios de tarifa de fornecimento de energia da CEMIG (incluindo impostos) para os consumidores do setor público do grupo de tensão A4. Ao examinar a situação pela óptica da administração da UFOP, a expansão de suas atividades ano a ano implica em um aumento no consumo de energia elétrica, o que conseqüente e inevitavelmente aumentará os gastos da universidade. Isso revela uma necessidade de ações para gerenciamento da energia elétrica, podendo diminuir o impacto do consumo de energia elétrica nas contas da universidade e permitindo a destinação destas economias para outras iniciativas (KURAHASSI, 2006).

À vista dos fatos discutidos nesta seção, destaca-se a importância do presente trabalho como ferramenta de análise do perfil de consumo do campus Morro do Cruzeiro, podendo trazer oportunidades para gestão de energia no local e aprimorando também a disposição de informações sobre o consumo de energia elétrica dentro do setor de edificações do Poder Público Federal.

2.2 Sustentabilidade Ambiental e Energética

O relacionamento entre o desenvolvimento das atividades humanas e o meio ambiente começou a ser levado em consideração há não muito tempo atrás. De fato, o lançamento do livro “Primavera Silenciosa” por Rachel Carson em 1962 é considerado um pontapé inicial para o movimento ambientalista, por ter trazido à tona uma discussão envolvendo os efeitos do uso de pesticidas para o meio ambiente em um momento em que se acreditava no desenvolvimento da indústria química como forma de melhora na qualidade de vida das pessoas. Além disso, o livro foi lançado no ápice da Guerra Fria, quando a Crise dos Mísseis em Cuba quase levou EUA e URSS à uma guerra nuclear, episódio que aconteceu exatamente no ano de lançamento do livro e fez com que ele ganhasse ainda mais destaque nas discussões por relacionar o controle químico de insetos e a bomba atômica como formas de contaminação do meio ambiente pelo homem, o que foi identificado por Carson como o problema central da então atualidade (BONZI, 2013).

O início do movimento ambientalista gerou uma série de debates entre 1960 e 1970 sobre a tormenta causada pelo crescimento econômico e a mudança no estilo de vida de nações industriais ao equilíbrio ecológico, à estabilidade econômica e à segurança do planeta, o que inspirou a elaboração do termo “desenvolvimento sustentável” (MITCHAM *apud* FEIL e SCHREIBER, 2017). O primeiro encontro oficial para discussão de temas relativos à utilização dos recursos naturais e à poluição do meio ambiente foi a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, popularmente conhecida como Conferência de Estocolmo, realizada em 1972. Naquela época os governantes ainda não estavam tão engajados na ideia de preservar o meio ambiente, e por

isso muitos deles foram contrários às metas propostas na conferência. Conseqüentemente, o momento não rendeu resultados concretos além da criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), que hoje se tornou importante agente internacional em meio ambiente (EURECICLO, 2020).

Após uma avaliação sobre os dez anos da Conferência de Estocolmo, foi instituída pela Assembleia Geral da ONU a Comissão de Brundtland, cujo objetivo era promover audiências em todo o mundo e produzir um resultado formal das discussões geradas. O fruto desta comissão foi um relatório publicado em 1987, intitulado “Nosso Futuro em Comum”, onde o termo “desenvolvimento sustentável” foi oficialmente apresentado pela primeira vez, propondo ideias bem elaboradas para que ele se concretizasse. A partir daí o termo se popularizou, incitando a expansão e qualificação das legislações ambientais e acordos internacionais. O início da conscientização ambiental desencadeou uma série de eventos como a Rio-92, a Rio+10 e a Rio+20, conferências organizadas pela ONU em prol do desenvolvimento sustentável (FEIL e SCHREIBER, 2017).

Feil e Schreiber (2017) discutem em seu artigo “Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: desvendando as sobreposições e alcances de seus significados” as origens destes termos e diferenças em seus respectivos significados. Notou-se que a ideia de sustentabilidade surgiu essencialmente em virtude das crises no sistema energético ocorridas desde a antiguidade, que ocasionaram discussões sobre as fontes energéticas e recursos naturais. A necessidade de recursos naturais para o desenvolvimento econômico gera a preocupação com a escassez destes recursos, pois ambos estão diretamente vinculados. Percebe-se então que existe uma indissociável integração entre os seres humanos e o meio ambiente, e o termo “sustentabilidade” expressa uma apreensão sobre a qualidade do sistema gerado por esta integração ao avaliar suas propriedades e características, abrangendo aspectos ambientais, sociais e econômicos. Essa avaliação é feita por meio de indicadores e/ou índices, que propicia um conjunto de informações quantitativas que possibilitam o estabelecimento de objetivos ou metas a serem alcançados estrategicamente.

A definição de “desenvolvimento sustentável”, por seu lado, traz um temor sobre o crescimento econômico em detrimento da sobrevivência humana,

oferecendo uma visão de longo prazo em relação às gerações futuras. Dessa maneira, o desenvolvimento sustentável nada mais é que uma estratégia para melhorar a qualidade de vida da sociedade, integrando aspectos ambientais, sociais e econômicos e principalmente considerando as limitações ambientais, no que diz respeito ao acesso aos recursos naturais de forma contínua e perpétua (FEIL e SCHREIBER, 2017).

Visto que o desenvolvimento econômico e humano está diretamente ligado à utilização de recursos naturais como fontes de energia, para que o desenvolvimento sustentável ocorra de fato, é necessário que a produção e o uso da energia também sejam sustentáveis. A InterAcademy Council defende em seu relatório “Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho” (2010) a utilização do termo “energia sustentável” para:

“(...) sistemas, tecnologias e recursos energéticos que sejam capazes de não apenas suprir, no longo prazo, as necessidades humanas – econômicas e de desenvolvimento – mas também o façam de forma compatível com (1) a preservação da integridade subjacente dos sistemas naturais essenciais, evitando, inclusive, mudanças climáticas catastróficas; (2) a extensão de serviços básicos de energia a mais de 2 bilhões de pessoas no mundo todo que atualmente não têm acesso a formas modernas de energia; e (3) a redução de riscos para a segurança e do potencial para conflitos geopolíticos que poderiam advir da disputa crescente por reservas de petróleo e gás natural distribuídas desigualmente. Em outras palavras, o termo “sustentável” neste contexto abrange uma gama de objetivos programáticos que vai além da mera adequação de suprimentos.” (InterAcademy Council, 2010, p. 58)

A InterAcademy Council (2010) evidencia em seu relatório uma série de desafios para se atingir a sustentabilidade energética, pautados principalmente na mudança dos atuais hábitos da sociedade em relação à energia como forma

de evitar o uso desenfreado dos recursos naturais e gerenciar os riscos provenientes das mudanças climáticas globais. Destaca-se ainda a necessidade de um trabalho conjunto de todas as nações para assegurar que recursos financeiros, técnicos e políticos sejam devidamente direcionados ao desenvolvimento e implementação de tecnologias energéticas mais limpas e eficientes, e mais importante, que a parte menos privilegiada da população também tenha acesso à essas tecnologias, de maneira a reduzir as desigualdades.

2.3 Indicadores de sustentabilidade

Conforme discutido anteriormente, o termo “sustentabilidade” por si só expressa a necessidade de uma mensuração da qualidade do sistema integrado por seres humanos, suas atividades intrínsecas e o meio ambiente. Neste contexto, os indicadores de sustentabilidade tornam-se uma forma de avaliar quantitativa e qualitativamente um dado sistema de acordo com parâmetros considerados essenciais para que se atinja a plenitude da sustentabilidade; estes parâmetros, na maioria das vezes, estão relacionados à três áreas principais: econômica, ambiental e humana.

A utilização de indicadores de desenvolvimento sustentável foi discutida pela primeira vez na conferência Rio-92, onde foi adotada a Agenda 21, um programa de ações para o desenvolvimento sustentável. A Agenda 21 invocou países e organizações internacionais para desenvolver indicadores que facilitassem a tomada de decisão em prol do desenvolvimento sustentável. A partir desse momento, a Comissão de Desenvolvimento Sustentável - CDS da ONU adotou um programa de trabalho para os indicadores, que ocorreu em várias etapas: formação de um consenso sobre uma lista central de indicadores; desenvolvimento de uma metodologia; discussões acerca da política para a publicação de um relatório pela CDS e consequente disseminação ampla do trabalho; testagem, avaliação e revisão dos indicadores. As primeiras três etapas foram realizadas entre 1995 e 1996, e resultaram na publicação *“Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies”*,

popularmente conhecido como “Livro Azul”. A partir de 1996 alguns países ao redor do mundo começaram a testar voluntariamente o conjunto de indicadores proposto, e desde então estes vêm sendo constantemente reavaliados e revisados como forma de melhoria no processo (ONU, 2007).

O Brasil possui sua própria publicação adaptando os indicadores apresentados no Livro Azul à realidade brasileira, denominada “*Indicadores de desenvolvimento sustentável: Brasil*”, que é desenvolvida pelo IBGE. Além dos desafios envolvidos na construção de indicadores que caracterizem e subsidiem o processo de desenvolvimento sustentável em nível nacional, o IBGE também enfrenta o fato de o Brasil ser um país com ampla diversidade, o que dificulta ainda mais a elaboração dos indicadores (IBGE, 2015).

Os indicadores brasileiros são organizados em quatro dimensões: ambiental, social, econômica e institucional. A dimensão ambiental traz indicadores que medem o desenvolvimento dos objetivos de preservação e conservação do meio ambiente, fator fundamental na qualidade de vida das gerações atuais e futuras; os indicadores se dividem entre os temas atmosfera, terra, água doce, oceanos, mares e áreas costeiras, biodiversidade e saneamento. A dimensão social avalia objetivos de satisfação das necessidades humanas, melhoria da qualidade de vida e justiça social; os indicadores buscam mensuração dentre temas como população, trabalho e rendimento, saúde, educação, habitação e segurança. Os indicadores da dimensão econômica, por sua vez, avaliam dentro dos temas “quadro econômico” e “padrões de produção e consumo”, questões relacionadas ao uso e esgotamento dos recursos naturais, à produção e gerenciamento de resíduos, ao uso de energia e ao desempenho macroeconômico e financeiro do País. Já a dimensão institucional traz indicadores que avaliam o empenho dos governos e sociedade na implementação de medidas requeridas para uma efetiva implementação do desenvolvimento sustentável (IBGE, 2015).

Apesar das diretrizes dadas pela CDS da ONU serem as mais comuns para a adaptação e elaboração de indicadores de sustentabilidade, é importante frisar que existem outras metodologias que podem ser empregadas. Tayra e Ribeiro (2006) realizaram em seu artigo uma síntese dos principais modelos e experiências envolvendo indicadores de sustentabilidade, com o objetivo de

categorizá-los e avalia-los criticamente. Foi identificado que as experiências envolvendo indicadores ao redor do mundo podem ser classificadas em dois tipos: os sistemas de indicadores, que se baseiam no modelo proposto pelo “Livro Azul” da ONU; e os indicadores síntese, que buscam agregar dados de ordem econômica, biofísica, social e institucional em uma única unidade.

Da Cunha Kemerich *et al.* (2014) traz um comparativo entre cinco diferentes modelos de indicadores de sustentabilidade: o modelo Pressão-Estado-Resposta - PER, o modelo Força Motriz-Estado-Resposta - FER, o modelo Força Motriz-Pressão-Estado-Impacto-Resposta - DPSIR, o Marco para a Avaliação de Sistemas de Manejo de Recursos Naturais incorporando Indicadores de Sustentabilidade – MESMIS e a Pegada Ecológica.

O modelo PER elabora indicadores baseados na relação entre a atividade humana e o meio ambiente, porém desconsidera que existem pressões no ambiente que são causadas por fatores naturais, evidenciando apenas aquelas causadas pelo homem. Já o modelo FER é uma adaptação do modelo anterior, sendo uma proposta para monitoramento do desenvolvimento sustentável em países adeptos da Agenda 21; a diferença para o modelo PER é que neste, é estabelecido um vínculo lógico entre seus componentes. O modelo DPSIR também é derivado do modelo PER, e traz de uma maneira integrada a interação entre as causas dos problemas ambientais, seus impactos e respectivas respostas da sociedade. O MESMIS é um método interdisciplinar que enfatiza a realização de avaliações qualitativas e quantitativas de forma cíclica, partindo da definição de um objeto de análise; entretanto, o modelo não define o que é ou não sustentável, e baseia-se apenas na comparação entre sistemas. A Pegada Ecológica é um tipo de indicador de sustentabilidade focado principalmente em quantificar o uso da capacidade regenerativa da biosfera em atividades humanas (DA CUNHA KEMERICH *et al.*, 2014).

Os indicadores de sustentabilidade podem ser aplicados em contextos que vão além da avaliação do desenvolvimento sustentável em macro e microrregiões. Notou-se que, apesar da diversidade entre os contextos de aplicação dos indicadores, os mesmos sempre foram desenvolvidos levando em consideração aspectos multidisciplinares dentro das dimensões ambiental, econômica e social.

Borlachenco e Gonçalves (2017), por exemplo, discutem a aplicação de indicadores para avaliar a sustentabilidade do crescimento da produção agropecuária no Mato Grosso do Sul. Os indicadores são propostos tendo em vista os grandes impactos ambientais trazidos pela atividade agropecuária, tais como o uso de agrotóxicos, degradação dos solos e dos cursos hídricos, além da facilitação trazida pelo Novo Código Florestal para realização destas atividades. Desta maneira, o uso de indicadores surge como forma de continuar expandindo a produção, porém de acordo com práticas sustentáveis, como o controle de número de cabeças de gado de acordo com o limite de qualidade do solo, a rotatividade de culturas e a recuperação de mata ciliar.

Alves *et al.* (2016) abordam a construção de indicadores de sustentabilidade para institutos de pesquisa e inovação da área de tecnologia nuclear, visto que esta tecnologia possui uma imagem predominantemente negativa perante o público. Foi proposta uma série de indicadores dentro das dimensões ambiental, social, econômica, cultural e institucional, cuja relevância foi ponderada por especialistas das diferentes áreas; também foi feita uma avaliação comparativa entre as dimensões investigadas, e de acordo com o parecer de ambas foram selecionados os indicadores mais importantes. O resultado do estudo ressalta a importância de se levar em consideração a percepção de risco e a opinião popular na avaliação de temas polêmicos como a tecnologia nuclear.

Da Silva e De Azevedo Almeida (2018) propõem um conjunto de indicadores de sustentabilidade para avaliar o desempenho sustentável de Instituições de Ensino Superior – IES após identificarem que as metodologias existentes até então não contemplavam as dimensões básicas da sustentabilidade (ambiental, social e econômica), tendo, portanto, o objetivo de suprir esta lacuna. O resultado foi um conjunto de 37 indicadores, divididos entre os aspectos corpo acadêmico; corpo administrativo; operações e serviços; ensino, pesquisa; e, extensão universitária. Os indicadores compõem uma ferramenta holística e aplicável em qualquer universidade, sendo recomendado sua aplicação anual, de maneira a desenvolver uma análise de desempenho da IES, bem como servir de parâmetro comparativo com outras universidades.

Santiago e Dias (2012) apresentam a construção de uma matriz de indicadores de sustentabilidade para a gestão de resíduos sólidos urbanos - RSU, que se torna cada vez mais um problema para o meio ambiente e um desafio para as cidades. A utilização dos indicadores neste caso é dada como instrumento de monitoramento e avaliação da sustentabilidade na gestão dos RSU, afim de promover uma melhoria na qualidade de vida da população. Os indicadores são elaborados de acordo com as dimensões política, tecnológica, econômica, ambiental, do conhecimento e da inclusão social. O resultado do trabalho foi uma matriz de indicadores que aborda uma visão sistêmica do processo de gerenciamento dos RSU, permitindo que os gestores públicos planejem ações nas etapas de coleta, transporte, tratamento, destinação e disposição final ambientalmente adequada dos resíduos e de rejeitos gerados.

O uso de indicadores também é identificado no contexto da sustentabilidade energética, uma vez que o uso de energia está diretamente relacionado com o bem-estar da população e com o crescimento econômico, o que atrela o desenvolvimento sustentável ao aumento da eficiência energética. O conflito gerado pela necessidade da energia ao mesmo tempo em que se deseja atingir metas em desenvolvimento sustentável gera desafios para a tomada de decisão no ponto de vista da governança regulatória e dos agentes empreendedores, que devem equilibrar seus interesses e os da sociedade como um todo (MACHADO, 2006). A utilização de indicadores pode auxiliar na resolução deste conflito, visto que por meio deles é possível revelar precisamente a situação de interação do uso de energia e sustentabilidade em sistemas de diversas especificidades, sejam eles países, indústrias, universidades, o que facilita a percepção de riscos, oportunidade de melhorias, e tomadas de decisão em geral.

Bocasanta *et al.* (2017) buscaram uma maneira de avaliar o grau de sustentabilidade de edifícios em universidades comunitárias com foco na eficiência energética, por meio de uma adaptação do método Sistema Contábil Gerencial Ambiental – SICOGEA. O método proposto consiste em uma lista de verificação composta por grupos e subgrupos, cujo contexto pode ser adequado de acordo com o objeto de estudo. Os subgrupos são compostos por questionamentos, que dentro do tema geral, são direcionados à uma conclusão

referente à sustentabilidade. Com a lista preenchida por um responsável pelos edifícios ou por um pesquisador (o que depende do que se deseja avaliar), os dados obtidos são avaliados a fim de mensurar o grau de sustentabilidade do sistema em uma escala de 0 a 100%. Após essa avaliação, são identificados os itens com maior déficit em sustentabilidade, e para estes, é apresentado um parecer geral que indica possibilidades de melhoria nos processos.

Soares e Cândido (2019) realizaram um estudo bibliométrico com o objetivo de levantar na literatura indicadores de energia relacionados com as dimensões da sustentabilidade energética. Os autores identificaram a falta de um conjunto de indicadores que considerasse as características e peculiaridades de cada sistema de energia, o que motivou o estudo. Com a pesquisa concluída, o próximo passo foi selecionar indicadores genéricos, aqueles que avaliavam questões gerais do sistema energético. Em seguida, foi feita uma comparação entre os indicadores elegidos na pesquisa e os indicadores propostos pela Agência Internacional de Energia Atômica – IAEA, que formam o mais consolidado conjunto de indicadores de energia em prol do desenvolvimento sustentável. Essa comparação tinha a finalidade de excluir do conjunto proposto os indicadores que se apresentavam semelhantes ou iguais em termos de definição e avaliação, com base no conjunto da IAEA. A última etapa do processo consistiu em uma análise feita pelos pesquisadores a fim de escolher os indicadores que mais contribuíssem para a promoção de cada uma das dimensões da sustentabilidade. O resultado foi um conjunto de 17 indicadores de sustentabilidade energética para apoiar a implementação de políticas energéticas mais sustentáveis.

Ao partir do pressuposto de que é cada vez mais necessário compatibilizar a demanda por energia e as limitações do meio ambiente, Fujii (2015) desenvolveu em sua tese de doutorado uma metodologia para avaliar o grau de sustentabilidade da produção de energia. O autor utilizou princípios de economia ecológica e do planejamento integrado de recursos para identificar e analisar os fatores que afetam a sustentabilidade energética de um dado sistema. Após elencar estes fatores, foi definida uma série de indicadores de sustentabilidade contemplando as esferas econômica, natural e humana. Cada indicador é avaliado dentro de seu próprio limite recomendável, e caso o valor encontrado

para o indicador esteja dentro do limite, o sistema é considerado sustentável naquele aspecto. Após a avaliação de todos os indicadores, deve-se analisar se predominam as ações sustentáveis ou não, para fazer a avaliação do sistema como um todo.

De acordo com a revisão destas metodologias, buscou-se neste trabalho identificar os indicadores que melhor se aplicam para a avaliação da sustentabilidade energética no contexto dos cenários de PEI para o campus Morro do Cruzeiro.

3 METODOLOGIA

3.1 O Planejamento Energético Integrado

No âmbito do PEI, neste trabalho será discutida a demanda e oferta de energia elétrica no campus Morro do Cruzeiro da UFOP, com foco na análise da substituição do atual sistema energético pela instalação de painéis fotovoltaicos a fim de suprir a demanda de energia elétrica no local. Para realizar esta análise, é utilizada a construção de dois cenários - referência e alternativo solar- que são uma projeção da atual situação do sistema energético do campus e daquela que se deseja implantar futuramente, permitindo a análise prospectiva dessas situações, viabilizando a tomada de decisão (EPE, 2005). Os cenários consideram uma série de premissas que são discutidas a seguir.

O primeiro passo para a construção dos cenários foi realizar o diagnóstico do perfil de demanda e consumo de energia elétrica do campus Morro do Cruzeiro. Tal diagnóstico foi feito a partir da análise das contas de energia elétrica do campus do ano de 2018, cedidas pela Prefeitura do Campus.

As contas de energia fornecem diversas informações importantes para este estudo, tais como a demanda de potência, o consumo de energia e o fator de carga tanto para o horário de pico quanto para o fora de pico. Também é possível obter nas contas a bandeira tarifária aplicada no mês e os valores específicos faturados para demanda de potência e consumo de energia, bem como o valor total da fatura.

A partir da coleta de dados foi possível calcular o valor do fator de potência para cada mês, bem como fazer uma estimativa dos gastos totais e médios nesse período de um ano, o que possibilitou uma primeira análise do perfil de consumo do campus.

Para entender o perfil consumidor do campus e como é feito o faturamento do consumo de energia elétrica, é necessário apresentar alguns conceitos, que são definidos abaixo de acordo com o Manual de Faturamento de Energia publicado pela CEMIG em 2011:

- Demanda de potência: medida em quilowatts, é a potência média solicitada pelo consumidor à concessionária de energia em um determinado período de tempo (CEMIG, 2011).

- Consumo de energia: medido em quilowatts-hora, é a quantidade de energia utilizada pelo consumidor para alimentar uma carga de 1kw durante uma hora (CEMIG, 2011).

- Horário de pico - HP: é um intervalo de três horas diárias consecutivas onde há a maior solicitação de energia, definido pela distribuidora de energia a partir da curva de carga de seu sistema elétrico e aprovado pela ANEEL para toda a área de concessão; ocorre todos os dias exceto finais de semana e determinados feriados nacionais, somando em média 66 horas por mês (CEMIG, 2011).

- Horário fora de pico - HFP: demais horas do dia complementares ao horário de pico, acrescidas do total de horas dos finais de semana e feriados (CEMIG, 2011).

- Período seco – PS: corresponde à sete ciclos de faturamento consecutivos, referente aos meses de maio a novembro (CEMIG, 2011). Como no Brasil a maioria da energia é proveniente de usinas hidrelétricas, no período que chove menos, a oferta de energia diminui e conseqüentemente as tarifas de energia sobem.

- Período úmido – PU: corresponde à cinco ciclos de faturamento consecutivos, referente aos meses de dezembro de um ano a abril do ano seguinte (CEMIG, 2011). Neste período, como há maior ocorrência de chuvas, a oferta de energia aumenta e as tarifas diminuem.

- Grupos e subgrupos de consumo: classificam os clientes dentro do mercado de comercialização de energia, de acordo com o nível de tensão utilizado por eles (CEMIG, 2011).

- Modalidades tarifárias: são as diferentes maneiras como a energia é tarifada, de acordo com a sazonalidade da oferta e procura de energia em diferentes períodos do dia e do ano (CEMIG, 2011).

Além desses conceitos, existem dois indicadores de uso da energia elétrica que foram utilizados neste estudo para auxiliar na determinação do potencial de conservação de energia do campus: o Fator de Carga (FC) e o Fator de Potência (FP).

O Fator de Carga relaciona a demanda média e a demanda máxima de potência, gerando um índice que varia de 0 a 1. O FC mostra o grau de utilização da demanda máxima. Dessa maneira, quanto mais seu valor se aproxima de 1, mais racional é o uso da demanda/carga ao longo do tempo (CEMIG, 2011). Um mau uso da demanda/carga indica que consumo da energia tem uma concentração alta em um curto período de tempo, o que determina uma alta demanda máxima de energia e aumenta o preço na fatura. Os valores de FC para HP e HFP são fornecidos na fatura de energia.

Já o Fator de Potência é a razão entre a potência ativa e a potência aparente. A potência ativa é aquela que realiza o trabalho na carga, podendo ser considerada a potência real do sistema. A potência aparente por sua vez, é a potência total que o sistema retira da rede de alimentação. Parte da potência aparente é fornecida ao circuito, aumentando a carga dos geradores, condutores e transformadores; essa parte é praticamente desperdiçada, e chamada de potência reativa.

O Fator de Potência também tem variação entre 0 e 1, e quanto mais seu valor é próximo de 1, maior é o aproveitamento da energia retirada do sistema elétrico (CEMIG, 2011). O melhor aproveitamento significa que a potência reativa é baixa, ou seja, existe maior potência ativa sem que haja necessidade de ampliação na capacidade instalada do sistema.

Como continuação do diagnóstico do perfil de consumo e passo primordial na construção dos cenários, é necessária a construção da curva de carga do campus. A curva de carga descreve o consumo de energia em kWh, durante as 24 horas do dia. A curva de carga para o campus foi construída com base em uma curva de carga do prédio da Escola de Minas, cujos dados foram medidos no quadro geral de energia do prédio, logo após o transformador. Foram feitas medições em dia útil e finais de semana. Assim, o perfil da curva da carga da Escola de Minas foi utilizado como referência para fazer a distribuição do

consumo médio de energia elétrica do campus, que por sua vez, foi obtido nas faturas de energia elétrica do ano de 2018.

3.2 Modelos Energéticos: O Modelo HOMER

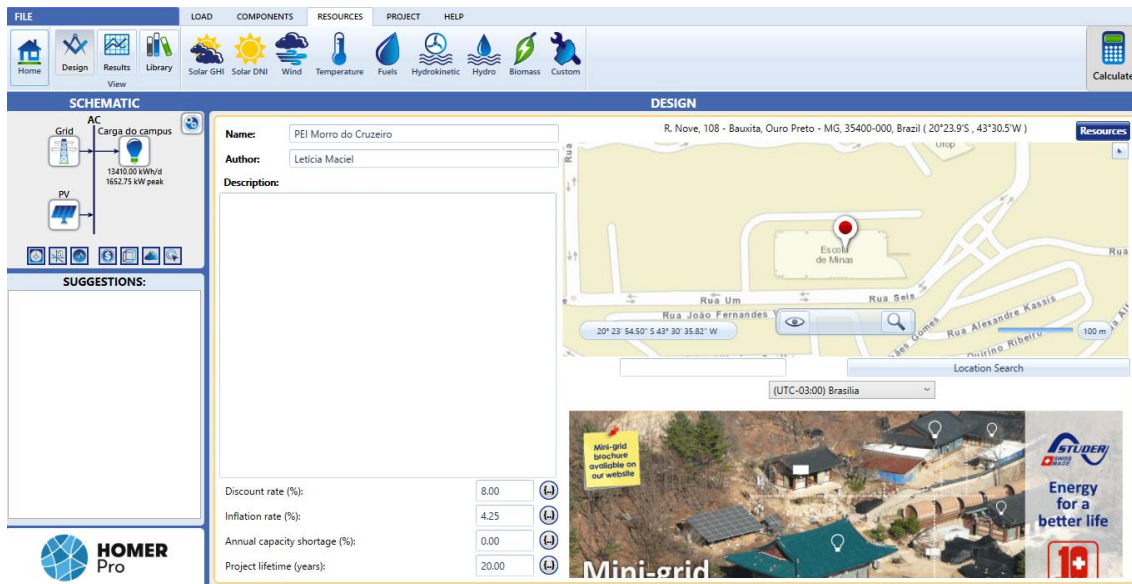
Após o diagnóstico do perfil de consumo do campus, a próxima etapa é a construção dos cenários, que foi feita com o modelo HOMER. O HOMER é um modelo de otimização de sistemas energéticos híbridos, que facilita a avaliação de diferentes situações para um mesmo projeto de acordo com as premissas dadas para a modelagem. É preciso prover alguns dados de entrada no modelo, tais como as opções de oferta de recursos, os diversos custos do projeto, tarifas e equipamentos, e a partir desses dados, o HOMER avalia de forma técnico-econômica cenários que combinam de diversas formas os dados de configurações do sistema e combinações de componentes, trazendo também os valores finais e tempo de *payback* do sistema. Os resultados são mostrados em diferentes tabelas e gráficos que facilitam a visualização e escolha da melhor opção de projeto a ser seguida.

Para ambos os cenários, foi inserida no HOMER a curva de carga elaborada para o campus e as seguintes premissas foram adotadas:

- Taxa de desconto de 8%, adotada segundo a taxa de juros definida no Plano Decenal de Energia de 2029;
- Taxa de inflação de 4,25%, definida de acordo com a meta do governo;
- Abordagem estocástica da variação da demanda e do consumo de energia elétrica de 15% dia a dia e de 20% hora a hora.

A Figura 6 mostra a interface inicial do HOMER Pro, onde foram definidas as taxas de desconto e inflação, o tempo de vida do projeto igual a 20 anos e a localização do projeto (campus Morro do Cruzeiro da UFOP).

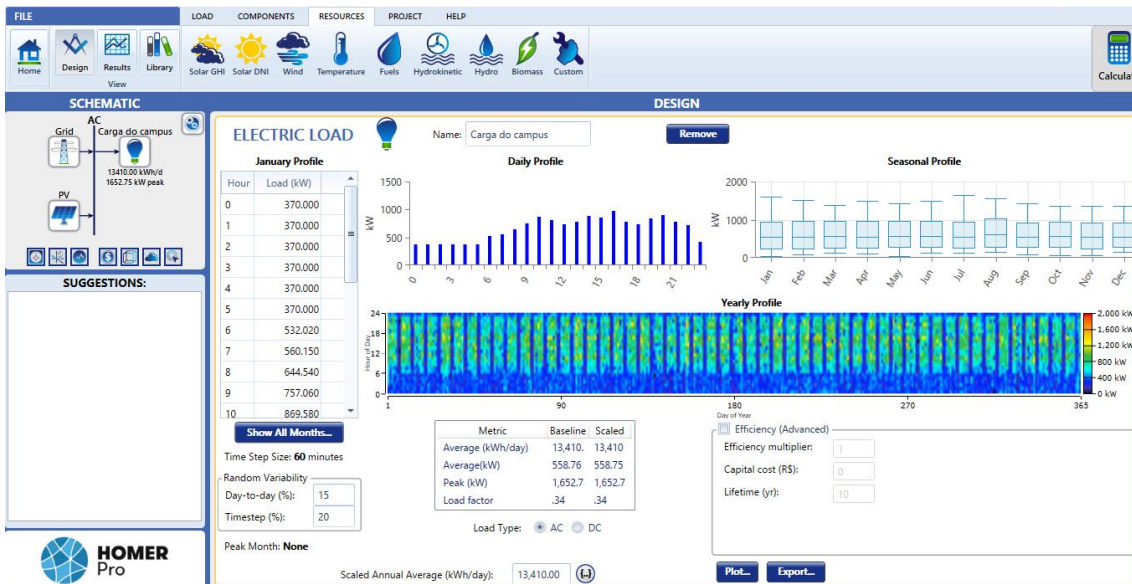
Figura 6 – Interface inicial do HOMER Pro



Fonte: Elaboração própria a partir de HOMER Pro (2020)

A Figura 7 demonstra a interface de inserção dos dados de carga elétrica, onde foram inseridos os valores de consumo de energia e variação dia a dia e hora a hora, utilizados para ambos cenários.

Figura 7 - Dados da carga elétrica



Fonte: Elaboração própria a partir de HOMER Pro (2020)

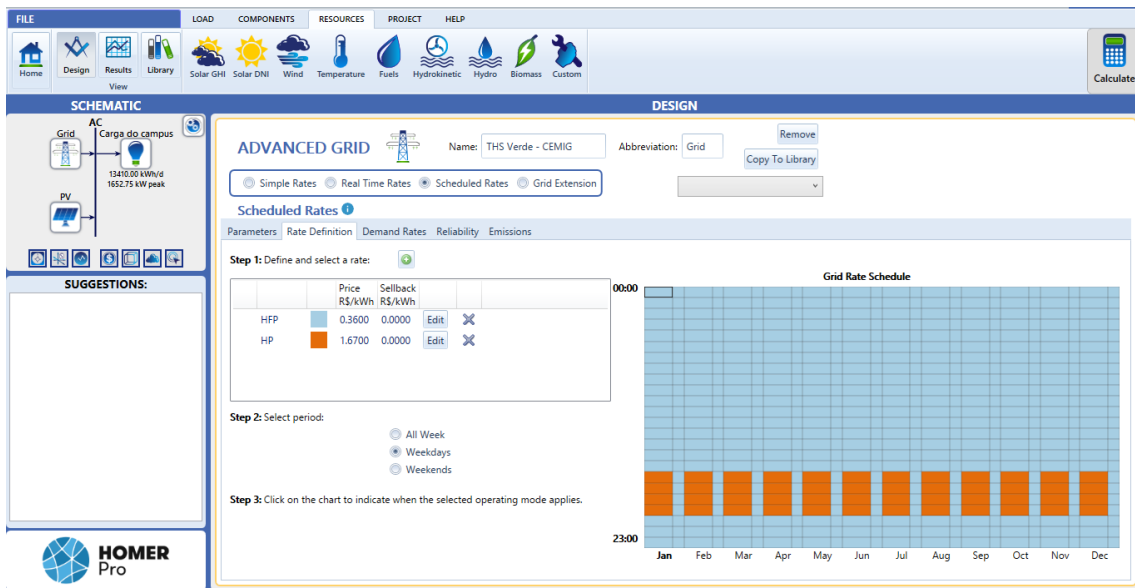
Para a construção do cenário referência, foram definidas no modelo as tarifas de consumo e demanda de energia de acordo com a Tabela 3. Também foi considerada na modelagem a emissão de CO₂ na geração de energia elétrica, que de acordo com dados do BEN 2020, equivale à 90kg/MWh. As Figuras 8, 9 e 10 demonstram as interfaces de inserção de dados de tarifa de consumo, demanda e emissões, respectivamente.

Tabela 3 - Tarifa Horo-Sazonal Verde para consumidores do grupo A4 (Bandeira verde)

Demanda (R\$/kW)	Consumo (R\$/kWh)			
	Período Seco		Período Úmido	
15,32	HFP	HP	HFP	HP
	0,36	1,67	0,36	1,67

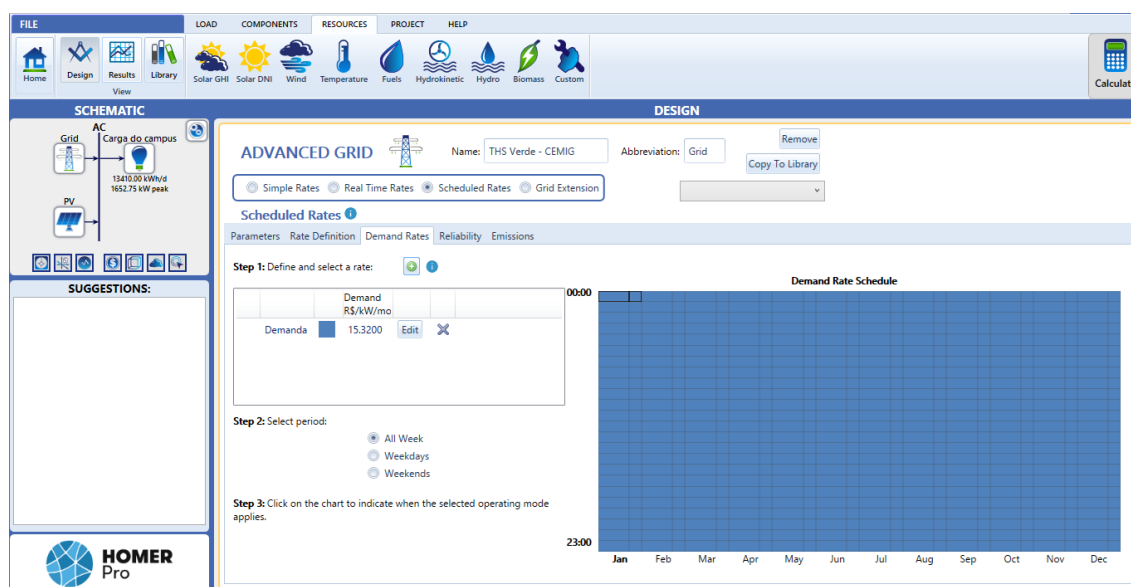
Fonte: CEMIG, 2020

Figura 8 - Interface de definição das tarifas de consumo



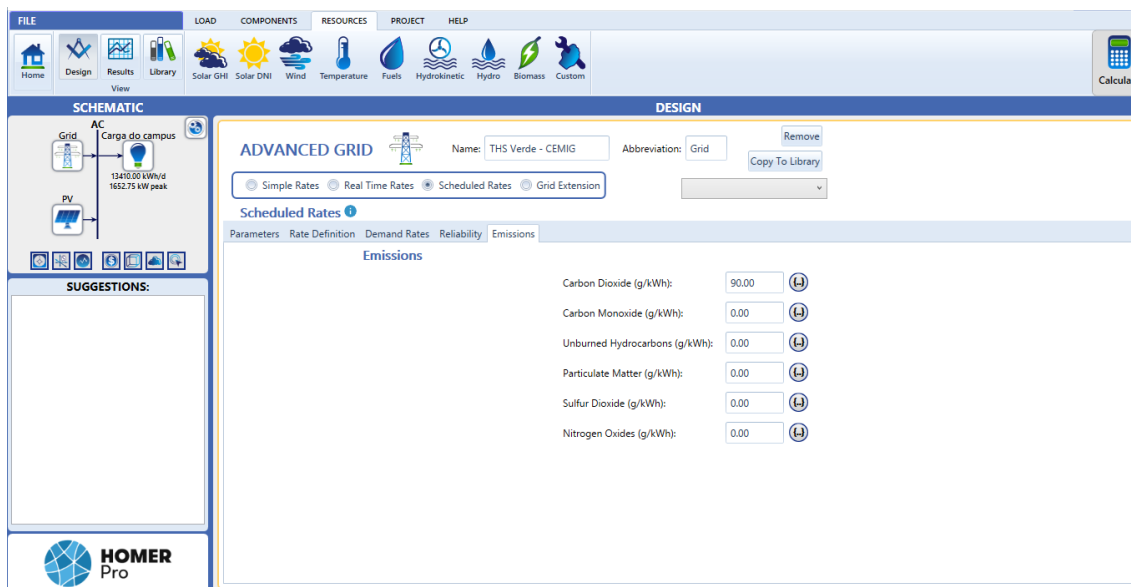
Fonte: Elaboração própria a partir de HOMER Pro (2020)

Figura 9- Interface de definição das tarifas de demanda



Fonte: Elaboração própria a partir de HOMER Pro (2020)

Figura 10 - Inserção do dado de emissão de CO₂



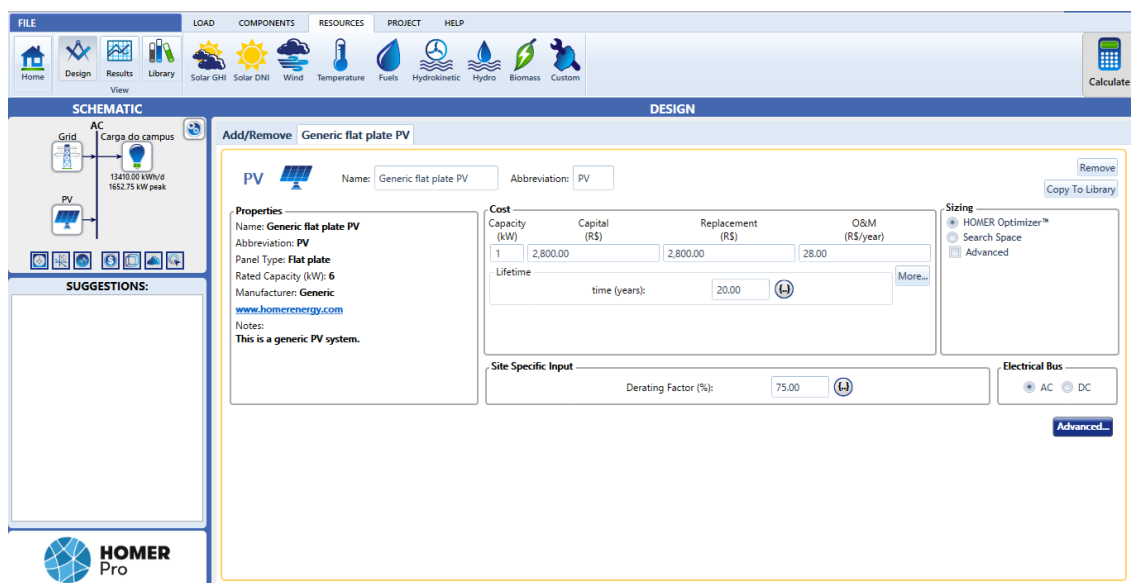
Fonte: Elaboração própria a partir de HOMER Pro (2020)

Para construção do cenário alternativo solar foi adotado um tempo de vida útil de 20 anos para o projeto, e o potencial médio anual de geração de energia solar fotovoltaica foi obtido inserindo a localização do campus no HOMER. O cálculo do investimento foi realizado com o auxílio de duas notas técnicas da EPE: a Nota Técnica DEA 19/14 e a Nota Técnica de Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira de 2012. Segundo a EPE (2014), a

expansão do mercado da energia fotovoltaica influi diretamente na redução dos custos deste recurso, sendo previsto um decréscimo de 40% do custo dos sistemas fotovoltaicos entre 2010 e 2020 (IEA *apud* EPE, 2014). Como o campus possui uma demanda contratada superior à 1,0 MW, é possível afirmar que o custo de investimento para suprir essa demanda com a energia fotovoltaica seria similar ao considerado para uma geração centralizada, e com isso o custo estimado é de 2.800,00 R\$/kWp, o que incluiria o gasto com módulos, inversores e demais componentes do sistema (EPE, 2012).

Foi adotada uma taxa de operação e manutenção anual igual a 1% do valor de capital investido, resultando em R\$ 28,00/ano. Foi considerado também um fator de aproveitamento final da energia de 75%, devido às perdas como eficiência do inversor, perdas de sincronismo e no circuito, térmicas, por reflexão, entre outras (IPEA, 2018). Além disso, foi considerado que o inversor estaria acoplado à placa fotovoltaica, tecnologia já disponível no mercado. A interface para modelagem do sistema fotovoltaico é demonstrada na Figura 11.

Figura 11 - Dados do sistema fotovoltaico



Fonte: Elaboração própria a partir de HOMER Pro (2020)

3.3 Indicadores de sustentabilidade

Com a motivação de atrelar o PEI com as questões socioambientais, após a construção dos cenários referência e alternativo solar, estes serão avaliados a partir de uma série de indicadores de sustentabilidade, que são uma maneira de classificar o desempenho de um sistema energético sob a ótica ambiental, social e econômica (FUJII, 2015).

Estes indicadores serão utilizados neste trabalho para avaliar os impactos provenientes dos cenários elaborados a fim de comparar o grau de sustentabilidade de cada um e indicar o cenário mais adequado a ser adotado para que o campus esteja alinhado com o desenvolvimento sustentável.

Será adaptada a teoria proposta por Ricardo Fujii em sua tese de doutorado “Sustentabilidade energética: uma análise do equilíbrio econômico, humano e natural”, por ser, dentre as metodologias revisadas, a que melhor atende o contexto deste trabalho. Sua teoria é composta por três etapas: definição do sistema energético a ser analisado, inventário dos recursos energéticos em uso e cálculo dos indicadores de sustentabilidade (FUJII, 2015). Neste trabalho, as duas primeiras etapas são discutidas dentro da elaboração dos cenários do PEI, da qual o objeto de estudo é o sistema energético do campus Morro do Cruzeiro. A terceira etapa, que trata do cálculo dos indicadores de sustentabilidade, será abordada nos resultados, após a apresentação dos cenários, onde será feito o cálculo dos indicadores para cada um desses. A seguir, são descritas as metodologias utilizadas no cálculo de cada indicador.

3.3.1 Indicadores Econômicos

Energia obtida sobre energia investida – EROI

O indicador EROI, sigla que deriva do inglês “*Energy Returned On Invested*” calcula a quantidade de energia útil produzida por um sistema de geração de energia após deduzida toda a energia investida pela sociedade na

construção deste sistema (HALL *et al. apud* OLIVEIRA *et al.*, 2018), e pode ser matematicamente definido como:

$$EROI = \frac{\textit{energia entregue}}{\textit{energia necessária para entregar aquela energia}} .$$

Dessa maneira, quanto maior for o valor obtido para o indicador, mais sustentável ele é, pois isso significa que houve menor gasto energético em toda a cadeia produtiva da energia entregue. Como o valor do EROI se trata de uma razão entre valores energéticos, sua unidade é adimensional.

Neste trabalho será levado em consideração o EROI padrão, que engloba a energia entregue em um dado projeto, região ou país e a energia necessária para obtenção da energia útil. Será adotado um limite mínimo de referência para a sustentabilidade de um recurso energético o valor de EROI padrão igual a 20 (FUJII, 2015).

Duração das reservas disponíveis

A duração das reservas disponíveis deve ser mensurada de acordo com o ritmo de extração dos recursos, tendo em vista também a perspectiva de crescimento ou a diminuição da demanda. Assim, o limite recomendável para a sustentabilidade deve ser avaliado conforme a possibilidade de substituição por outro recurso energético (FUJII, 2015). Caso não exista a possibilidade de substituição do recurso, a sustentabilidade do recurso é indicada quando as reservas são infinitas.

Possibilidade de substituição por outro(s) recurso(s) energético(s)

Este indicador está atrelado à análise das reservas disponíveis, no caso dos recursos não renováveis, e da capacidade de reposição das reservas, para os recursos renováveis. Mesmo os recursos renováveis devem ser analisados, pois pode ocorrer de o ritmo de produção de energia ser superior à capacidade do meio ambiente repor o recurso, o que prejudica o equilíbrio (FUJII, 2015).

Para o cálculo deste indicador deve-se ter em mente a dimensão das reservas comercialmente exploráveis com base nas tecnologias disponíveis atualmente, ou que tenham viabilidade prevista no futuro. Como no indicador anterior, com o qual este se relaciona diretamente, o limite recomendável para a sustentabilidade é que o recurso analisado possua reservas que tendam ao infinito (FUJII, 2015).

3.3.2 Indicadores Ambientais

Poluição atmosférica

A intenção deste indicador é avaliar, de maneira local, as emissões atmosféricas provenientes da produção de energia. A análise de sustentabilidade das emissões é feita de acordo com as resoluções nº 382 de 2006 e nº 436 de 2011, ambas do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, que determinam os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Devem ser consideradas as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), monóxido de carbono (CO) e material particulado. Logo, caso as emissões provenientes da geração de energia atendam os padrões estabelecidos pela legislação, esta geração é considerada sustentável (FUJII, 2015).

Poluição do solo

Este indicador avalia as possíveis formas de poluição do solo causadas pela geração de energia. Fujii (2015) considera para esta análise a contaminação do solo por resíduos sólidos ou líquidos e a ocupação do solo.

Neste trabalho serão considerados os fatores elencados por Higino (2014) para avaliar os impactos causados no setor elétrico de Portugal no que tange à poluição e uso do solo. Dessa maneira, a análise de sustentabilidade para os sistemas de geração de energia elétrica em pauta, será feita com base em:

1. Como o sistema ocupa o solo, analisando a área ocupada e a intensidade do uso no que tange ao comprometimento dos serviços ecossistêmicos proporcionados pelo solo (HIGINO, 2014);
2. Se o sistema emite algum resíduo ou substância perigosa para o solo, em termos de quantidade e periculosidade destes (HIGINO, 2014).

Poluição aquática

O indicador de poluição aquática avalia a interação do sistema de geração de energia elétrica com o ecossistema aquático (FUJII, 2015). Neste trabalho será avaliado se o sistema em questão interfere negativamente em algum dos parâmetros utilizados para o cálculo do Índice de Qualidade da Água – IQA, que são, segundo a Agência Nacional de Águas (2020), temperatura da água, pH, oxigênio dissolvido, resíduo total, demanda bioquímica de oxigênio, coliformes termotolerantes, nitrogênio total, fósforo total e turbidez. Dessa maneira, caso o sistema de geração de energia elétrica não prejudique a qualidade hídrica local, ele será considerado sustentável.

3.3.3 Indicadores Humanos

Impactos no meio social

Este indicador avalia qualitativamente como intolerável, gerenciável ou negligenciável impactos causados pela geração de energia elétrica no meio social, sendo o limite recomendável para a sustentabilidade impacto classificado como gerenciável. São exemplos destes impactos a perda de produtividade na agricultura, corrosão acelerada de edificações, especialmente as de cunho histórico e o desconforto sonoro e visual (FUJII, 2015).

Violação dos Direitos Humanos

Deve ser analisado se a produção de energia elétrica fere de alguma maneira os direitos fundamentais dos seres humanos levantados pela ONU em

1948 na Declaração Universal dos Direitos Humanos. Este indicador é também qualitativo, sendo analisado como intolerável, gerenciável ou negligenciável e tendo o limite recomendável para a sustentabilidade uma classificação gerenciável (FUJII, 2015).

Posse e acesso à fonte energética

A posse e o acesso à energia elétrica são fatores que influenciam diretamente a qualidade de vida da população, sendo também considerados ativos econômicos por permitirem a ampliação da capacidade produtiva da pequena à grande escala, aspecto essencial ao desenvolvimento econômico (NADAUD, 2012). O acesso físico à uma rede de energia não garante a posse deste serviço, visto que o indivíduo nem sempre terá condições financeiras de arcar com os gastos de fatura e tarifas, nem com equipamentos eficientes e estrutura adequada em sua residência para receber a energia (COSTA apud NADAUD, 2012).

Dessa maneira, Fujii (2015) ressalta que a sustentabilidade de uma fonte energética está diretamente relacionada com o quão acessível é a energia gerada por ela, e este indicador deve analisar qualitativamente como se dá o acesso à fonte energética:

“(...)se ele é livre, como a energia solar; se compete com outros usos (como a energia hídrica); se é de posse do governo (nacional ou estrangeiro) ou de entes privados, considerando-se também se existem monopólios ou oligopólios no seu fornecimento” (FUJII, 2015).

Analisa-se aqui se o acesso à fonte energética é livre, concorrente com outros usos, governamental ou privado, considerando a relação política entre fornecedores e compradores de energia. O limite recomendável para a sustentabilidade neste caso é a classificação acessível (FUJII, 2015).

3.3.4 Resumo dos Indicadores

Um resumo dos indicadores de sustentabilidade e suas respectivas unidades, limites e abrangência é dado no Quadro 1.

Quadro 1 – Indicadores de Sustentabilidade Energética

Indicadores	Unidade	Limite recomendável	Abrangência
Energia obtida sobre a energia investida	adimensional	> 20	regional e global
Duração das reservas disponíveis	anos	→∞	regional e global
Possibilidade de substituição por outro recurso	sim/não;	→∞	regional e global
Poluição atmosférica	mg/Nm ³	< limites legais ou padrões internacionais	local
Poluição terrestre	m ³ , km ² ou m ³ de dejetos	Qualidade do solo inalterada pelo sistema	local
Poluição aquática	pH, volume de oxigênio (mg/l) e volume d'água (m ³)	Qualidade hídrica inalterada pelo sistema	local
Impactos no meio social	intolerável/ gerenciável/ negligenciável	gerenciável	local e regional
Violação dos direitos humanos	intolerável/ gerenciável/ negligenciável	gerenciável	local
Posse e acesso à fonte energética	livre, concorrente com outros usos, estatal, privado	acessível	local e regional

Fonte: Adaptado de FUJII, 2015

4 PLANEJAMENTO ENERGÉTICO INTEGRADO DO CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO

O objetivo principal deste trabalho, no âmbito do PEI, é buscar a minimização dos impactos ambientais associados às atividades do campus Morro do Cruzeiro, mesmo que indiretamente; além disso, também se busca a redução dos custos e diversificação da oferta de energia elétrica (EPE, 2005).

Neste capítulo, se apresenta inicialmente a premissa base para o PEI do campus, que é o diagnóstico do perfil de consumo bem como a análise da oferta de energia elétrica atual para o campus. Em um segundo momento, são apresentados os cenários desenvolvidos no modelo HOMER, construídos com base no perfil de consumo do campus.

4.1 Diagnóstico do consumo e da oferta de energia elétrica

Atualmente, o campus consome energia elétrica por meio da rede da concessionária CEMIG. Enquanto consumidor da rede, o campus está sujeito à geração centralizada de energia elétrica, proveniente em sua maioria de hidrelétricas, geração eólica e termelétricas, bem como aos seus respectivos impactos socioambientais.

Assim, para a realização do diagnóstico de consumo, foram analisadas as faturas mensais de energia elétrica do ano de 2018. Foram recolhidos, mês a mês, o valor de cada fatura, e tanto para horário de pico quanto horário fora de pico: a demanda de potência, o consumo de energia (ressaltando o gasto de energia ativa e reativa), o fator de carga, e foi calculado o fator de potência para o horário fora de pico, que representa a maior parcela de consumo dentro do período de um mês. Os dados obtidos são resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Síntese dos dados recolhidos nas faturas de energia de 2018

Faturas de 2018		Valor total no período	Valor médio mensal
Valor da fatura		R\$ 2.353.807,68	R\$ 196.150,64
Demanda de potência (kW)	HFP ¹	11.830,00	985,83
	HP ¹	9.814,00	817,83
Consumo de energia (kWh)	HFP – Atv ¹	4,230.800,00	352.566,67
	HFP – Rtv ¹	117.600,00	9.800,00
	HP - Atv	534.800,00	44.566,67
Fator de carga	HFP ¹	-	0,53
	HP ¹	-	0,72
Fator de potência		-	0,99

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados das faturas de energia elétrica do campus

Para o horário fora de pico, o valor médio para o fator de carga é considerado baixo, próximo de 0,5. Pode-se dizer que esse é um fato alarmante pois é no horário fora de pico que se concentra a maior demanda de potência, e com o baixo valor de fator de carga, é possível concluir que não está sendo feito um uso racional da energia nesse período, ou seja, a demanda não é bem distribuída dentre as horas, concentrando-se em um curto período de tempo. Isso aumenta o valor da demanda máxima, e conseqüentemente, aumenta o valor das faturas. Já para o horário de pico, percebe-se que existe uma melhora na distribuição do consumo de energia, visto que o fator de carga possui um valor um pouco mais próximo de 1.

Segundo a ANEEL, o limite mínimo permitido do fator de potência, para as unidades consumidoras do grupo A, é de 0,92 (ANEEL, 2013). Para o campus obteve-se um elevado valor médio para o período analisado, bem próximo de 1,

¹ Abreviações: HFP: Horário fora de pico; HP: Horário de pico; Atv: Energia ativa; Rtv: Energia reativa

conforme é possível observar na Tabela 4. Isso mostra que a potência ativa é dominante nesse sistema, havendo um aproveitamento ótimo da energia, o que levou à omissão da energia reativa na modelagem do cenário base.

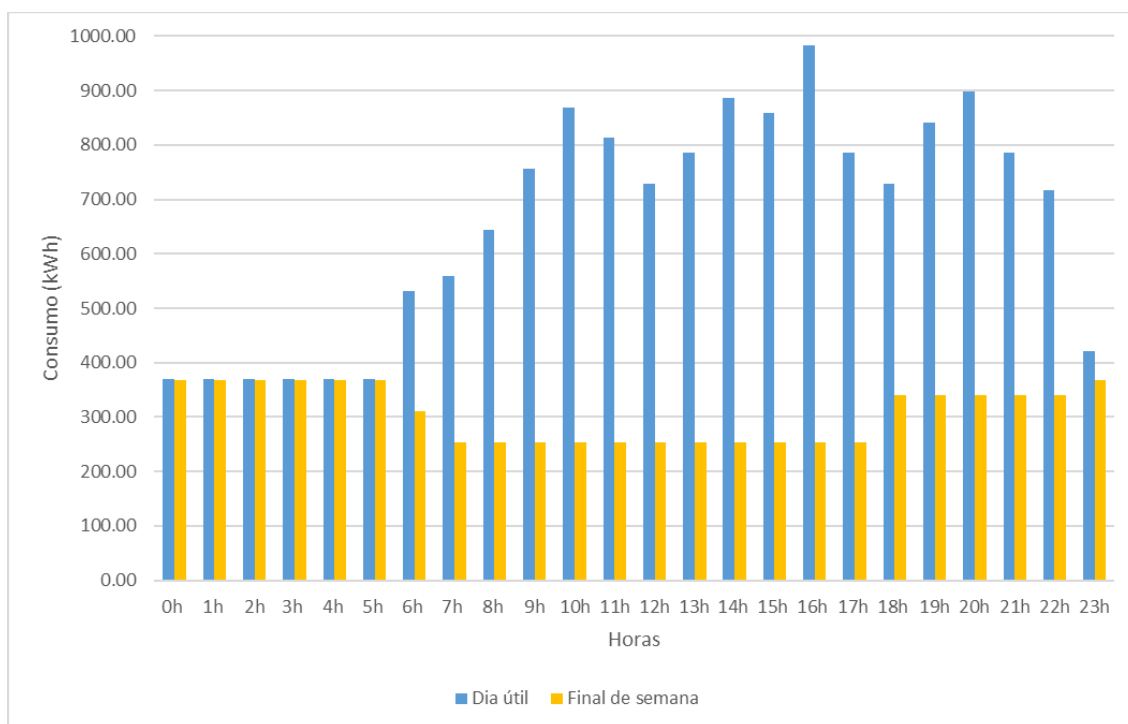
De acordo com os dados das faturas concedidas, o campus Morro do Cruzeiro pertence ao grupo A, subgrupo A4, que o classifica como cliente de média tensão, consumindo de 2,3 a 5 kV por mês. A energia do campus é cobrada de acordo com a Tarifa Horo-Sazonal Verde (THS Verde) (Figura 05): tanto o consumo de energia quanto a demanda de potência são cobrados a partir de tarifas diferenciadas que variam de acordo com as horas de utilização do dia (horário de pico ou fora de pico) e com os períodos do ano (período seco ou úmido). A THS Verde se aplica quando a tensão de fornecimento for inferior à 69 kV e a demanda contratada for maior ou igual a 500 kW (CEMIG, 2011). Essa modalidade tarifária funciona da seguinte maneira:

- A demanda de potência é tarifada de acordo com um valor único, de acordo com período seco e úmido (CEMIG, 2011). O campus possui uma demanda contratada de 1200 kW para ambos períodos, e esse é o valor faturado, mesmo se a demanda registrada for menor que essa. Caso o valor de demanda registrada ultrapasse o valor contratado, o maior valor é o faturado no mês.
- O consumo de energia possui quatro modalidades diferentes de tarifa: no período úmido do ano, existe um valor para o HP e outro valor para o HFP; já no período seco, existem outros dois valores diferentes de tarifa para HP e HFP. No HFP, o valor de tarifa é mais baixo do que no HP, de maneira a incentivar o consumo fora deste horário, demandando menos da rede de energia, que costuma ficar sobrecarregada neste horário (CEMIG, 2020).

De fato, ao analisar a curva de carga construída para o campus (Figura 12), pode-se observar uma redução expressiva do consumo no início do horário de pico, compreendido entre as 17h e 20h. Essa redução no consumo pode justificar a aderência à THS Verde. Entretanto, é importante ressaltar que ocorre às 20h o segundo maior pico de consumo no dia. Dessa maneira, é recomendável que sejam estudadas algumas estratégias de gerenciamento da demanda com a finalidade reduzir este pico de consumo às 20h ou então

deslocá-lo para o horário fora de pico, como forma de reduzir custos, visto que a THS Verde possui valores mais altos no horário de pico. Um exemplo de gerenciamento de demanda para o campus seria remanejar as aulas para outros horários de maneira a reduzir o número de alunos presentes das 17h até as 20h, e consequentemente o consumo de energia. Outra opção estratégica seria avaliar outras tarifas que tragam maior custo-benefício para o campus.

Figura 12 - Curva de Carga do campus Morro do Cruzeiro



Fonte: Elaboração própria

4.2 Elaboração de cenários de PEI

Foram elaborados apenas dois cenários: referência e alternativo solar. Os cenários construídos serão posteriormente avaliados e comparados sob o ponto de vista de indicadores de sustentabilidade, a fim de identificar aquele que produz menos impactos ambientais, e consequentemente será mais sustentável.

A seguir, serão apresentados os cenários construídos a partir do modelo HOMER, bem como a análise técnico-econômica de cada um deles. Para ambos os cenários, foi utilizada a mesma curva de carga, apresentada na [Figura 12](#).

4.2.1 Cenário referência

Para o cenário referência, que demonstra a situação atual do campus enquanto consumidor de energia da rede da concessionária CEMIG, foi calculado pelo HOMER Pro um Valor Presente Líquido – VPL de R\$ 44,4 milhões. Esse valor representa o custo total para o sistema durante o tempo de projeto considerado, igual a 20 anos. Por ano, este custo de operação ficaria em torno de R\$ 3,15 milhões. O custo nivelado da energia fica em R\$ 0,64/kWh.

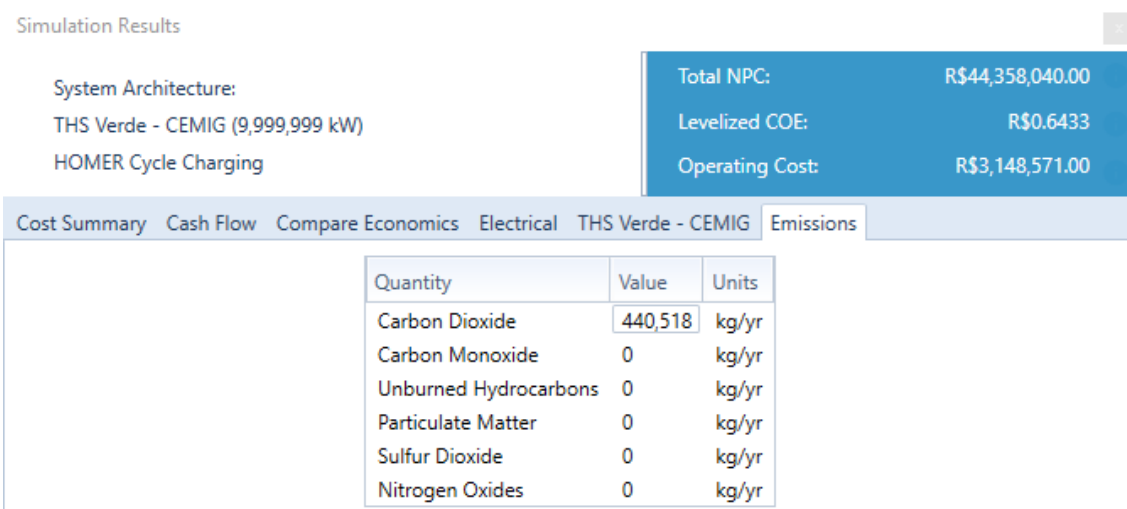
Neste caso, a UFOP não produz energia elétrica, comprando todo seu suprimento da rede da concessionária. Assim, não se pode considerar este gasto como um investimento, não havendo retorno nenhum sobre o mesmo.

É importante considerar que, ao consumir energia da rede, não se tem garantia sobre a procedência desta, podendo ser renovável ou não. Em todo caso, considerou-se na modelagem a emissão de CO₂ na geração de energia elétrica de acordo com dados do BEN 2020, equivalente à 90kg/MWh. De acordo com este valor inserido na modelagem, o HOMER Pro calculou uma média de 440 toneladas de CO₂ emitidas por ano na produção de energia do cenário referência.

Os resultados da simulação feita no HOMER Pro são exibidos na Figura 13, que detalha as informações² de valor presente líquido, custo da energia, custo de operação e emissão de dióxido de carbono (CO₂).

² NPC = Net Present Cost = Valor Presente Líquido; COE = Cost of Energy = Custo da Energia; Operating Cost = Custo de Operação; Carbon Dioxide = CO₂.

Figura 13 - Resultados da simulação do cenário referência



Fonte: Elaboração própria a partir de HOMER Pro (2020).

4.2.2 Cenário alternativo solar

Para a modelagem do cenário alternativo solar, que considera a inserção de placas fotovoltaicas para suprir o consumo de energia do campus, foi adicionada a localização para obtenção dos dados do recurso solar, mostrado na Figura 14.

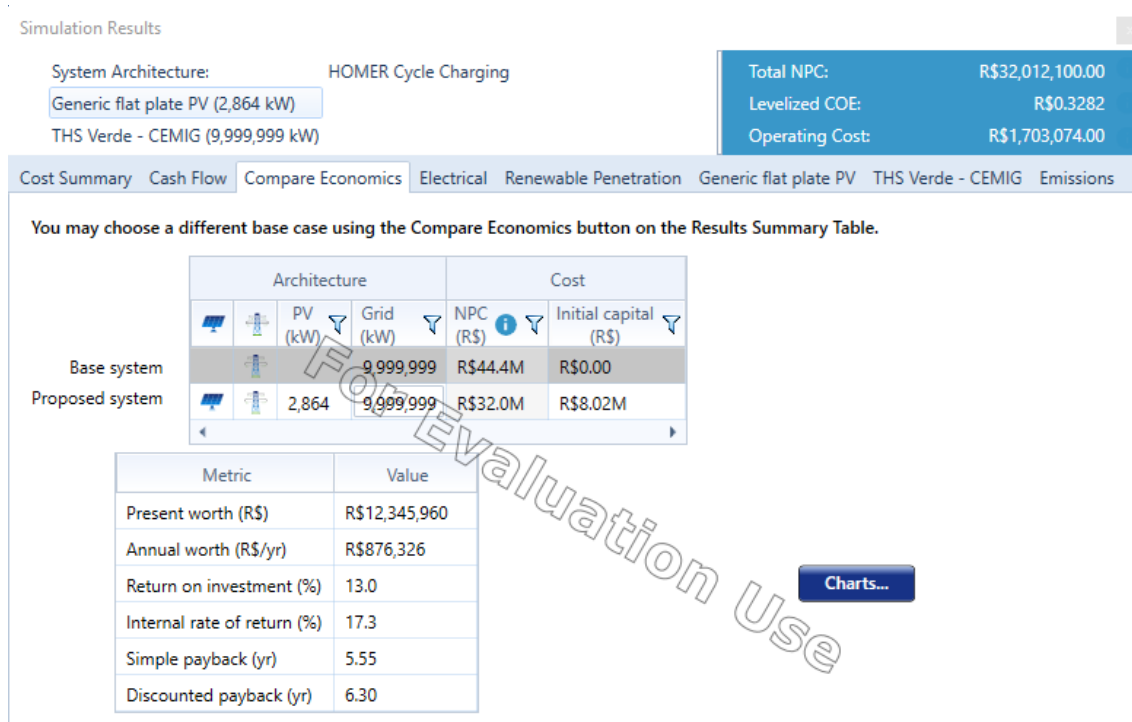
Figura 14 - Recurso solar para o campus Morro do Cruzeiro



Fonte: Elaboração própria a partir de HOMER Pro (2020)

Para este cenário, foi simulado um VPL de R\$ 32 milhões, custo de operação anual de R\$ 1,7 milhões e custo nivelado de energia de R\$ 0,33/kWh. Para investimento inicial, foi calculado um capital de R\$ 8,02 milhões, com retorno de 13% do investimento. O tempo de payback encontrado foi de aproximadamente 6 anos. Os resultados econômicos da simulação para o cenário alternativo solar podem ser observados na Figura 15.

Figura 15 - Resultados econômicos para o cenário alternativo solar



Fonte: Elaboração própria a partir de HOMER Pro (2020)

Para este cenário, foi calculada uma média de emissão de 256 toneladas de CO₂ por ano na produção de energia. Sabe-se que a geração de energia por meio dos painéis fotovoltaicos possui emissões mínimas de gás carbônico, portanto o valor calculado pelo HOMER Pro pode ter duas explicações: a primeira, considerando todo o ciclo de vida produtivo das placas fotovoltaicas e seus componentes, que depende do processo de mineração para obtenção de silício e demais materiais, que por sua vez possui emissões gasosas diversas; e a segunda, porque o modelo direciona o sistema neste cenário de maneira a minimizar o excedente de produção de energia, possuindo 58,9% de fração renovável, sendo o restante proveniente da rede da concessionária.

Para dimensionar a viabilidade técnica da instalação dos painéis fotovoltaicos no campus, foram adotadas as seguintes premissas:

- Potência necessária para atender a demanda do campus igual a 2.864 kW, calculada pelo modelo HOMER Pro;
- Potência nominal de uma placa fotovoltaica igual a 300 W (PORTAL ENERGIA, 2020);
- Área aproximada de uma placa fotovoltaica igual a 1,7m² (PORTAL ENERGIA, 2020).

De acordo com essas premissas, seriam necessárias aproximadamente 9.550 placas fotovoltaicas para suprir a demanda do campus, o que exigiria uma área de 16.235 m². A área demandada é inferior a 2 campos de futebol, e acredita-se que seria possível utilizar o telhado dos prédios para alocar os painéis.

4.2.3 Comparação técnico-econômica entre os cenários

Os resultados técnico-econômicos obtidos na modelagem utilizando o modelo HOMER Pro são demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação técnico-econômica entre os cenários

Cenário	Valor presente líquido (milhões de R\$)	Custo de operação (milhões de R\$/ano)	Custo da energia (R\$/kWh)	Capital inicial (milhões de R\$)	Fração renovável (%)	Energia comprada da rede (kWh)	Energia enviada para a rede (kWh)
Referência	R\$ 44,4	R\$ 3,15	R\$ 0,643	-	-	4.894.650	-
Alternativo solar	R\$ 32	R\$ 1,7	R\$ 0,328	R\$ 8,02	58,9%	2.845.554	2.029.477

Fonte: Elaboração própria a partir de HOMER Pro (2020)

Ao analisar a Tabela 5 são perceptíveis várias vantagens, apesar do capital de investimento inicial de R\$ 8.018.660,42: caso o cenário atual seja substituído por um cenário alternativo com instalação de placas fotovoltaicas, o VPL é reduzido em aproximadamente 28%, o custo da energia reduzido em 49%

e o custo operacional foi reduzido em 46%. Além disso, com o sistema fotovoltaico existe a garantia que a energia consumida no campus provém de fração renovável; conforme discutido anteriormente, o HOMER direciona o sistema a minimizar a produção excedente, e assim, em uma situação real, é possível que a fração renovável seja dimensionada para se tornar ainda maior do que o descrito na tabela. Também é possível observar que, mesmo com a otimização do HOMER, existe um excesso de produção que é vendido para a rede; com o sistema de *net-metering* regulamentado no país, seria possível resgatar essa energia para, por exemplo, suprir o consumo de energia em outros campus da UFOP.

É importante ressaltar que, como os dados da curva de carga para o campus foram extrapolados a partir dos dados das faturas em relação à curva de carga medida para a Escola de Minas, a modelagem descrita neste trabalho precisa ser mais apurada. Também existem impostos cobrados mensalmente sobre o valor total da fatura de energia que não foram modelados. Em todo caso, é possível fazer uma calibração simples do modelo ao dividir o VPL pelo tempo total considerado para o projeto, onde encontra-se um valor médio de R\$ 185 mil por mês ao longo dos 20 anos. Este é um valor próximo do encontrado como valor médio mensal das faturas (R\$ 196 mil), o que demonstra certa confiabilidade ao modelo.

Para obter uma modelagem ainda mais precisa, seria necessário fazer a medição do consumo de energia em todos os prédios do campus, bem como considerar o valor exato cobrado em impostos, o que fica sugerido para trabalhos futuros.

5 AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE

5.1 Cenário referência

Como no cenário referência a energia elétrica provém da rede concessionária, é difícil saber qual foi a fonte energética que produziu a energia que está sendo utilizada. Assim, para analisar os indicadores para o cenário referência, será levada em consideração a geração centralizada de energia elétrica por meio das fontes de maior destaque, sendo estas a hidrelétrica, eólica e termelétrica.

5.1.1 Indicadores econômicos

Energia obtida sobre a energia investida - EROI

O EROI para o cenário referência foi calculado por meio de uma média ponderada dos valores de EROI para as fontes hidrelétrica, eólica e termelétrica a gás natural. Os valores de EROI considerados para cada fonte energética são demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de EROI para principais fontes energéticas da matriz elétrica brasileira.

Fonte	Valor do EROI
Hidrelétrica	85
Gás Natural	25
Eólica	20

Fonte: HALL *et al.*, 2014.

Ao calcular a média ponderada dos valores descritos na Tabela 06, obteve-se um EROI igual a 68,1 para o cenário referência. Como o limite recomendável para a sustentabilidade é um valor de EROI acima de 20,

considera-se o valor encontrado sustentável, dada a predominância da energia hidrelétrica na matriz brasileira.

Duração das reservas disponíveis

Apesar de a matriz elétrica brasileira ser predominantemente renovável, a geração de eletricidade no Brasil é diretamente dependente das usinas termelétricas devido à sazonalidade dos recursos renováveis. Conforme discutido anteriormente, as usinas termelétricas brasileiras ainda utilizam em sua maioria os combustíveis fósseis, que representam 65,7% do total de potência fiscalizada, segundo dados do SIGA (2020). Diferente dos recursos renováveis, os combustíveis fósseis possuem reservas limitadas, além de trazerem impactos mais significativos ao meio ambiente.

Deve-se considerar também a possibilidade de uma expansão das atividades do campus e consequente aumento do consumo de energia elétrica com o passar dos anos. Levando em conta todos os pontos levantados, conclui-se que deve ser avaliada possibilidade de substituição do recurso atual por um novo.

Possibilidade de substituição por outro recurso

Conforme discutido na seção 4, é viável a substituição do cenário atual, onde o campus está sujeito à geração centralizada de energia e suas demais implicações, por um cenário em que parte da demanda seria suprida por energia solar fotovoltaica. Devido à essa condição, e à todas as considerações sobre a relação entre a geração centralizada com o recurso não-renovável gás natural (além dos recursos petróleo, carvão, etc), infere-se que no cenário atual nem todas as fontes de geração de energia tem reservas com dimensões que tendam ao infinito, não atendendo ao limite recomendável para a sustentabilidade.

5.1.2 Indicadores ambientais

Poluição atmosférica

Estimar as emissões atmosféricas provenientes da geração centralizada de energia e analisa-las segundo a legislação é uma tarefa complexa, fora do escopo deste trabalho. Entretanto, é possível fazer uma análise segundo a literatura para as principais fontes energéticas definidas.

Não existe uma metodologia definida para estimar as emissões atmosféricas nos reservatórios das usinas hidrelétricas. Porém, existem evidências de que as emissões acontecem devido ao processo de decomposição da biomassa inundada, da biomassa formada pelo processo de fotossíntese nas águas do reservatório e da matéria orgânica proveniente da bacia de drenagem do reservatório. Os gases emitidos nestes processos são o metano e o gás carbônico, tendo o primeiro um maior impacto para o efeito estufa (SCHUCHTER, 2010).

A energia eólica vem se mostrando uma forte aliada no combate às emissões de gases do efeito estufa. Esta fonte energética não produz emissões gasosas em seu funcionamento; as únicas emissões associadas a ela são aquelas decorrentes do processo de construção e instalação dos parques eólicos (BORGES, 2018). As emissões das usinas termelétricas, por sua vez, estão relacionadas à queima de combustível, e são classificadas de acordo com o tipo de combustível utilizado, sendo o gás natural o menos poluente dentre os combustíveis fósseis (FUHRMANN, 2016).

A instalação de empreendimentos de grande porte, como é o caso das usinas geradoras de energia elétrica no contexto da geração centralizada, estão sempre sujeitas ao processo de licenciamento ambiental. O licenciamento só é concedido quando o empreendimento se enquadra nas legislações ambientais pertinentes; além disso, para que a licença seja mantida, existe uma série de condicionantes a serem cumpridas, e dentre elas está a de emissões atmosféricas. Assim, acredita-se que o cenário referência pode ser considerado sustentável no aspecto de poluição atmosférica, pelo fato de, para que a usina

geradora de energia se encontre em funcionamento, ela deve cumprir os requisitos e limites legais.

Poluição terrestre

Para avaliação deste indicador, consideram-se as possíveis alterações no uso e ocupação original do solo, e a produção de substâncias ou resíduos perigosos para o solo.

As usinas hidrelétricas alteram completamente a condição natural do solo devido ao alagamento necessário para formação do reservatório. Isso implica em um impacto severo ao solo, com perda de vegetação local, danos à fauna, e alteração dos serviços ecossistêmicos.

As usinas eólicas podem provocar impactos no solo devido a um possível desmatamento da área de instalação, bem como causar erosão ao solo caso este não seja apropriado para receber os aerogeradores. Entretanto, estes impactos são gerenciáveis, podendo ser evitados com um estudo prévio de impacto ambiental.

As usinas termelétricas possuem como maior risco de impacto o vazamento de combustível, que pode causar graves contaminações no solo. Assim, se torna necessária a construção de tanques de contenção para evitar esse tipo de impacto, bem como o constante monitoramento ambiental (FUJII, 2015).

Considerando o conjunto das fontes geradoras, avalia-se que existe no geral uma considerável alteração da qualidade do solo pela geração centralizada de energia, o que não está de acordo com o limite considerado para a sustentabilidade.

Poluição aquática

Este indicador avalia a interferência da fonte energética na qualidade hídrica. As usinas eólicas e termelétricas não possuem influência direta no ecossistema aquático; uma possível forma de poluição seria o derramamento de

combustível em cursos hídricos ou lençol freático, mas que pode ser evitada com constante monitoramento das condições locais, algo demandado pelo licenciamento ambiental do empreendimento.

As usinas hidrelétricas, por sua vez, por demandarem a formação de um reservatório, causam severo impacto ao ecossistema aquático. Segundo Tolmasquim (2016), a degradação da matéria orgânica submersa altera consideravelmente a qualidade hídrica, sendo prejudicial para a biota aquática. O impacto pode ser minimizado com limpeza e desmatamento da área do reservatório, e com monitoramento constante da qualidade hídrica e limnológica. Entretanto, o impacto nunca é revertido, e causa consequências como a supressão da vegetação e perda de habitat para a fauna terrestre.

Como as usinas hidrelétricas são predominantes na matriz de geração centralizada e causam o mais severo impacto à qualidade hídrica, este indicador não se encaixa no limite considerado para a sustentabilidade.

5.1.3 Indicadores humanos

Impactos no meio social

Para as usinas hidrelétricas, os principais impactos sociais são associados, mais uma vez, à demanda pelo reservatório. O alagamento do reservatório pode atingir cidades, vilas e distritos, o que afeta moradias, benfeitorias, equipamentos sociais, dentre outros, prejudicando a dinâmica de vida da população local. Os impactos vão além da questão de organização social, política e cultural da região, afetando também o psicológico da população atingida. Estes impactos são gerenciados por meio de ações que suportam o remanejamento da população, mantendo constante diálogo com a mesma, além do fomento às atividades econômicas locais (TOLMASQUIM, 2016).

As usinas eólicas apresentam como principais impactos sociais alteração na dinâmica social devido às obras de implantação, e o impacto visual e de ruídos. Estes impactos podem ser gerenciados durante a fase de planejamento do empreendimento, com a escolha de uma área adequada para instalação da

usina. Quando a usina será instalada a 400 metros de comunidades ou residências isoladas, a legislação demanda um estudo específico sobre ruídos para licenciar o empreendimento. Outra forma de mitigação é promover a conscientização da população local com ações de educação ambiental (DE AZEVEDO et al., 2017; TOLMASQUIM, 2016).

Para as usinas termelétricas os impactos sociais são também associados à localização da mesma, podendo causar alterações na dinâmica de vida da população local (RIGOTTO, 2009).

De uma maneira geral, os impactos ao meio social causados pela geração centralizada de energia são considerados gerenciáveis, e assim, se enquadram no limite recomendável para a sustentabilidade.

Violação dos Direitos Humanos

Conforme discutido no indicador anterior, a geração hidrelétrica causa severos impactos ao meio social, que impactam no bem-estar da população. Estes impactos, devido à sua severidade, devem ser devidamente mitigados para que não interfiram nos Direitos Humanos dos cidadãos.

As usinas eólicas são comumente instaladas em regiões de em que a população sofre de vulnerabilidade social e econômica, como por exemplo, comunidades litorâneas. Populações com essa característica normalmente dependem do seu território e da disponibilidade dos recursos naturais para realizar suas atividades de subsistência. Dessa maneira, as alternativas locacionais previstas no Estudo de Impacto Ambiental devem ser respeitadas como garantia de respeito aos direitos dos cidadãos.

Já para as usinas termelétricas, a compensação à sociedade pela exploração de recursos não renováveis como gás natural e petróleo é feita por meio do pagamento de royalties ao setor público. A ideia é que estes royalties sejam revertidos em ações e investimentos que beneficiem a sociedade impactada, porém isso nem sempre acontece devido aos casos recorrentes de corrupção, além da distribuição desigual destes recursos.

Nota-se que existem diversas maneiras de violação dos Direitos Humanos por parte da geração centralizada de energia. Contudo, existem também medidas que visam evitar que essa violação aconteça, e por isso, este indicador é classificado como gerenciável, e dentro do limite recomendado para sustentabilidade.

Posse e acesso à fonte energética

Como o campus está condicionado ao consumo de energia por meio das redes concessionárias, ele não possui acesso direto à fonte energética. O acesso à energia derivada da geração centralizada está condicionado aos termos das concessionárias, dessa maneira, para fazer o uso da energia, o cliente se submete às tarifas e impostos regulamentados pelo governo.

Foi identificado que em algumas faturas de energia do campus dos anos de 2017 e 2018 constavam notificações por débitos referentes a faturas não pagas de meses anteriores, gerando alguns questionamentos: o que levou a administração do campus a não pagar determinadas faturas? É possível que o orçamento da universidade não tenha coberto o valor destas faturas, levando ao atraso no pagamento? Assim, é necessário repensar se não seria economicamente mais viável para o campus investir em alguma forma de geração distribuída, o que poderia gerar uma economia e melhor adequação do orçamento. Em todo caso, como as faturas em falta foram pagas antes que houvesse corte no fornecimento de energia, conclui-se que o campus possui acesso adequado à energia, estando dentro do limite recomendado para sustentabilidade.

5.2 Cenário alternativo solar

Para o cenário alternativo solar, os indicadores serão avaliados de acordo com a fonte energética solar fotovoltaica, considerando que o campus aderisse à geração distribuída de energia.

5.2.1 Indicadores econômicos

Energia obtida sobre a energia investida – EROI

O EROI para o cenário alternativo solar foi adotado segundo Oliveira *et al.* (2018). Foi considerada uma irradiação de 1800 kWh/m²/ano (HOMER Pro, 2020), o que se aproxima mais da condição de irradiação mínima de 1500 kWh/m²/ano, do que da condição máxima de 2500 kWh/m²/ano, exemplificadas por Oliveira *et al.* (2018). Assim, os valores de EROI definidos são de 5,15 para módulos de silício monocristalino, e de 6,93 para silício policristalino.

Segundo Fujii (2015), apesar do limite de EROI recomendado para sustentabilidade seja maior do que 20, para o caso da tecnologia solar fotovoltaica como geração distribuída deve-se considerar que, pelo fato fonte energética estar próxima ao consumidor final, existem menos perdas energéticas e investimentos em infraestrutura do que outras fontes que se aplicam em geração centralizada; assim, existe uma otimização no transporte e distribuição de energia. Então neste caso, um baixo EROI padrão não quer dizer que o sistema não seja sustentável. Como Hall *et al.* (2014) considera que para que uma fonte energética consiga atender as demandas energéticas mais básicas da sociedade o limite mínimo de EROI seja igual a 3, conclui-se que o cenário alternativo solar esteja dentro do limite para a sustentabilidade.

Duração das reservas disponíveis

Como a energia solar fotovoltaica utiliza o recurso solar, pode-se inferir que as reservas disponíveis são inesgotáveis, sendo assim um recurso sustentável.

Possibilidade de substituição por outro recurso

Como as reservas disponíveis do recurso solar são inesgotáveis, não existe necessidade de substituição do recurso. O sistema é considerado sustentável de acordo com este indicador.

5.2.2 Indicadores ambientais

Poluição atmosférica

A geração de energia por meio da tecnologia solar fotovoltaica não emite gases poluentes. Neste caso, as emissões estão associadas ao processo produtivo do sistema fotovoltaico, que envolve a obtenção do silício metalúrgico e sua transformação para silício cristalino, a fabricação das células fotovoltaicas e outros componentes como vidro, armações de alumínio, dispositivos eletrônicos (TOLMASQUIM, 2016). Entretanto, como este indicador tem abrangência local, ou seja, avalia o impacto da poluição atmosférica no local de produção de energia, conclui-se que, pelo fato de não haverem emissões durante a geração de energia, o sistema é sustentável.

Poluição terrestre

Como a sugestão para o cenário alternativo solar é que os módulos fotovoltaicos sejam instalados no telhado dos prédios do campus, não existe impacto ao solo. Como a qualidade do solo é inalterada, considera-se o cenário sustentável de acordo com este indicador.

Poluição aquática

A geração de energia por meio da tecnologia solar fotovoltaica não tem interação direta com o meio aquático. Assim, não existe alteração da qualidade hídrica, e o cenário se encontra dentro do limite considerado para a sustentabilidade.

5.2.3 Indicadores humanos

Impactos no meio social

Como impactos no meio social, pode-se citar a interferência na infraestrutura do campus durante a instalação dos painéis fotovoltaicos, o que poderia causar um desconforto na comunidade acadêmica durante suas atividades rotineiras; contudo, é um impacto que pode ser gerenciado fazendo a instalação em um período de férias, quando as atividades estão suspensas, evitando este desconforto.

Também pode ocorrer um impacto visual com a instalação dos painéis fotovoltaicos, o que pode ser mitigado ou minimizado com um projeto arquitetônico adequado. Como os impactos ao meio social identificados possuem maneiras de mitigação ou minimização, o indicador é classificado como gerenciável, e, portanto, dentro dos limites para a sustentabilidade.

Violação dos Direitos Humanos

Não foi identificada nenhuma forma de interferência da geração de energia fotovoltaica nos Direitos Humanos, o que classifica este indicador como negligenciável e assim, dentro dos limites para a sustentabilidade.

Posse e acesso à fonte energética

O acesso à energia solar fotovoltaica é considerado livre, uma vez que provem de um recurso abundante e que se dá na forma de geração distribuída, facilitando os termos de posse e acesso à fonte energética. O único entrave identificado neste caso é que ainda existe uma relação com a rede concessionária ao utilizá-la como forma de armazenamento de energia. Em todo caso, classifica-se este indicador como acessível, estando dentro dos limites para a sustentabilidade.

5.3 Comparação do grau de sustentabilidade dos dois cenários

O Quadro 2 mostra um resumo dos resultados obtidos na avaliação dos indicadores para os cenários referência e alternativo solar.

Quadro 2 – Resumo dos resultados obtidos na avaliação dos indicadores.

Indicador	Limite recomendável	Avaliação para o cenário referência		Avaliação para o cenário alternativo solar	
		Valor obtido	Sustentável?	Valor obtido	Sustentável?
Energia obtida sobre a energia investida	> 20	68,1	Sim	5,15 – 6,93	Sim ³
Duração das reservas disponíveis	→∞	-	Depende do indicador seguinte	→∞	Sim
Possibilidade de substituição por outro recurso	→∞	Sim	Não	Não	Sim
Poluição atmosférica	< limites legais ou padrões internacionais	Dentro dos limites legais	Sim	0	Sim
Poluição terrestre	Qualidade do solo inalterada pelo sistema	Alteração considerável na qualidade do solo	Não	Qualidade do solo inalterada pelo sistema	Sim
Poluição aquática	Qualidade hídrica inalterada pelo sistema	Alteração considerável na qualidade hídrica	Não	Qualidade hídrica inalterada pelo sistema	Sim
Impactos no meio social	Gerenciável	Gerenciável	Sim	Gerenciável	Sim
Violação dos direitos humanos	Gerenciável	Gerenciável	Sim	Negligenciável	Sim
Posse e acesso à fonte energética	Acessível	Acessível	Sim	Acessível	Sim

Fonte: Elaboração própria a partir de FUJII, 2015.

Antes de fazer um apanhado geral dos resultados obtidos com a análise dos indicadores, é importante ressaltar a diferença entre as abordagens adotadas para cada cenário durante a avaliação. Como o cenário referência vale-se da geração centralizada de energia, a perspectiva sobre a geração de energia e as fontes energéticas utilizadas não é tão precisa quanto no cenário alternativo

³ Limite diferenciado para a fonte solar fotovoltaica distribuída.

solar, no qual se tem conhecimento da origem de geração de energia, do local e público que essa geração irá afetar diretamente. Assim, existem níveis diferentes de agregação de informação na avaliação dos cenários, o que pode influenciar no resultado final.

O cenário referência foi identificado como sustentável em cinco dos nove indicadores, sendo destes cinco, três indicadores humanos, um indicador ambiental e um indicador econômico. O cenário alternativo solar, por sua vez, foi considerado sustentável em todos os nove indicadores.

De acordo com os resultados, o cenário referência pode ser considerado sustentável, com algumas ressalvas. Devido ao fato de a geração de energia centralizada derivar-se de grandes empreendimentos, os impactos se tornam mais severos, principalmente do ponto de vista ambiental. Acredita-se que, como as hidrelétricas são consideradas uma fonte renovável de energia, os impactos ambientais causados por ela são negligenciados, o que se torna preocupante visto que esta fonte representa a maior fração da matriz elétrica brasileira. São impactos irreversíveis à fauna e flora locais, e também ao meio social onde a hidrelétrica é construída, que são gerenciados, porém nunca revertidos, pois alteram permanentemente a dinâmica de vida da população local. Além disso, existe a dependência direta das usinas termelétricas, que também têm grande impacto ao meio ambiente devido aos combustíveis fósseis utilizados.

Já o cenário alternativo solar é considerado 100% sustentável na perspectiva dos indicadores de sustentabilidade, atingindo o limite recomendável em todos os indicadores. Neste caso, existe total domínio da procedência da energia e os impactos ambientais causados diretamente no local são negligenciáveis. Os impactos sociais não são severos, podendo ser gerenciados com medidas simples. Contudo, deve-se levar em consideração a abrangência da análise dos indicadores, que é local em sua maioria. Devido à abrangência local e regional dos impactos, não foram considerados os impactos provenientes do processo produtivo das placas fotovoltaicas, que provêm de uma indústria energointensiva e com diversos impactos. Outro ponto a se ressaltar é que muitas vezes esse processo produtivo ocorre na China, país onde os Direitos Humanos são limitados.

Conclui-se que a adoção do cenário alternativo solar traria maior sustentabilidade energética para o campus, além de ser uma oportunidade para otimização, racionamento e gerenciamento do uso de energia, com maior participação na produção de energia.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo avaliou sob o ponto de vista técnico, econômico e ambiental a instalação da tecnologia solar fotovoltaica como forma de geração de energia para o campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto.

Com a modelagem dos cenários no HOMER Pro, verificou-se que é possível suprir parte da demanda de energia do campus com a energia dos painéis fotovoltaicos, e que com a instalação destes é possível reduzir cerca de 49% o custo da energia para o campus, que passaria de R\$ 0,64 no cenário referência para R\$ 0,32 no cenário alternativo solar. O tempo de retorno do investimento inicial, de aproximadamente 6 anos, é curto em relação ao tempo de vida do sistema instalado, considerado de 20 anos, o que faz valer a pena o investimento visando o benefício à longo prazo. Atualmente existem sistemas fotovoltaicos com durabilidade ainda maior, o que pode prolongar o investimento. Também foi verificado que seria viável a instalação dos painéis fotovoltaicos nos telhados dos prédios do campus Morro do Cruzeiro, o que é um ponto positivo, visto que não seria demandada uma área extra para instalação de uma fazenda solar.

A utilização do sistema de *net-metering* é uma ótima opção para o campus, visto que possibilita armazenar o excesso de energia produzida e resgatá-lo quando houver necessidade, sem que haja custos extremos de faturamento. Além disso, não existe uma cobrança para se conectar à rede, é apenas necessário fazer uma solicitação e passar por um procedimento de vistoria. Dessa maneira, além do investimento inicial previsto no estudo, só existiriam os custos de mão de obra para instalação e posterior manutenção. O sistema de *net-metering* brasileiro permite também que a energia armazenada na rede seja regatada para suprir o consumo de energia em outras unidades inscritas no mesmo CNPJ; dessa maneira, com o excedente de energia produzido no campus Morro do Cruzeiro, seria possível suprir o consumo de energia de outros campus da UFOP, e até mesmo nas repúblicas federais.

É importante ressaltar que a modelagem foi feita com base em uma curva de carga estimada, e devido a isso, fica sugerido para trabalhos futuros que a modelagem seja refeita com dados de medição real do consumo de energia em todos os prédios do campus. Como os resultados do trabalho foram positivos no sentido da substituição do cenário atual por um cenário com painéis fotovoltaicos, é recomendável que a administração do campus invista em uma avaliação mais precisa sobre esta questão, proporcionando resultados fieis a realidade, que permitam avaliar economicamente a possibilidade de investir na instalação de painéis fotovoltaicos.

Com a análise dos indicadores de sustentabilidade, concluiu-se que a adoção do cenário alternativo solar é uma opção mais sustentável para o campus Morro do Cruzeiro, em vista do cenário energético atual. Isto adequaria o campus à um dos requisitos do Decreto nº 7746, que exige a adoção de práticas sustentáveis que abrangem o uso da energia elétrica, sendo esta uma das regras para a adoção do Plano de Logística Sustentável (BRASIL, 2012).

Por fim, conclui-se que o estudo atingiu todos os objetivos propostos. Destaca-se a importância do estudo para avaliar do ponto de vista ambiental o uso da energia no campus Morro do Cruzeiro, detectando possibilidades de melhoria que podem tornar ativa a participação da UFOP rumo ao desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas – ANA. Indicadores de Qualidade. Disponível em <https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/qualidade-da-agua/indicadores-de-qualidade>. Acesso em 28 de setembro de 2020.
- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição. Disponível em <https://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>. Acesso em 11 de agosto de 2020.
- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA. Banco de Dados. Disponível em <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWYyZWZmOWI4LWVjYjYtNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em 28 de julho de 2020.
- Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. Boletim de Recursos e Reservas de Petróleo e Gás Natural 2019. Disponível em <http://www.anp.gov.br/arquivos/dados-estatisticos/reservas/boletim-reservas-2019.pdf>. Acesso em 21 de outubro de 2020.
- ALVES, Simone Fonseca et al. Indicadores de sustentabilidade para institutos de pesquisa e inovação da área nuclear. *Brazilian Journal of radiation sciences*, v. 4, n. 1, 2016.
- BOCASANTA, Stephane Louise et al. Avaliação de Sustentabilidade: Eficiência Energética em Edifícios de uma Universidade Comunitária. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 6, n. 2, p. 140-149, 2017.
- BONZI, Ramón Stock. Meio século de Primavera silenciosa: um livro que mudou o mundo. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, n. 28, p. 207-215, jul./dez. 2013. Editora UFPR
- BORGES, Otávio Henrique de Melo. Redução das emissões de gases efeito estufa devido ao uso de energia eólica. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário de Formiga – UNIFOR. Formiga – MG. Novembro de 2018.

BORLACHENCO, Natascha Góes Cintra; GONÇALVES, Ariadne Barbosa. Expansão agrícola: elaboração de indicadores de sustentabilidade nas cadeias produtivas de Mato Grosso do Sul. *Interações* (Campo Grande), v. 18, n. 1, p. 119-128, 2017.

BRASIL. ANEEL. Nota técnica DEA 19/14: Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos.

BRASIL. ANEEL. Perguntas e Respostas sobre a aplicação da Resolução Normativa nº 482/2012 – atualizado em 25/05/2017.

BRASIL. ANEEL. Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica (...).

BRASIL. ANEEL. Resolução Normativa Nº 569, de 23 de julho de 2013. Modifica a abrangência na aplicação do fator de potência para faturamento do excedente de reativos de unidades consumidoras e altera a Resolução Normativa nº. 414, de 9 de setembro de 2010.

BRASIL. Decreto nº 7746 de 5 de Junho de 2012. Estabelece critérios e práticas para a promoção do desenvolvimento nacional sustentável (...). *Diário Oficial da União*. 5 de Junho de 2012.

BRASIL. Instrução Normativa nº 10 de 12 de novembro de 2012. Estabelece regras para elaboração dos Planos de Gestão de Logística Sustentável (...). *Diário Oficial da União*. 12 de novembro de 2012.

Companhia Elétrica de Minas Gerais – CEMIG. Manual de Gerenciamento de Energia. 2011. Disponível em [https://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/Eficiencia_Energetica/Documents/MANUAL%20DE%20GERENCIAMENTO%20DE%20ENERGIA%202011_BAIXA_16-01_LOS%20\(2\).pdf](https://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/Eficiencia_Energetica/Documents/MANUAL%20DE%20GERENCIAMENTO%20DE%20ENERGIA%202011_BAIXA_16-01_LOS%20(2).pdf). Acesso em 21 de agosto de 2019.

Companhia Elétrica de Minas Gerais – CEMIG. Valores de Tarifa e Serviços. Disponível em <https://www.cemig.com.br/pt->

br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx. Acesso em 24 de junho de 2020.

DA CUNHA KEMERICH, Pedro Daniel; RITTER, Luciana Gregory; DE BORBA, Willian Fernando. Indicadores de sustentabilidade ambiental: métodos e aplicações. Revista Monografias Ambientais, v. 13, n. 4, p. 3718-3722, 2014.

DAHER, Chico. Nota sobre bloqueio orçamentário. Ufop.br, 2019. Disponível em <https://ufop.br/noticias/reitoria/nota-sobre-bloqueio-orcamentario>. Acesso em 22 de julho de 2019.

DA SILVA, Gilberto Soares; DE AZEVEDO ALMEIDA, Lia. Indicadores de sustentabilidade para instituições de ensino superior: uma proposta baseada na revisão de literatura. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 8, n. 1, p. 123-144, 2019.

DE ARAGÃO PEDROSO, Luiz Lúcio et al. Demandas atuais e futuras da biomassa e da energia renovável no Brasil e no mundo/Current and future demands for biomass and renewable energy in Brazil and worldwide. Brazilian Journal of Development, v. 4, n. 5, p. 1980-1996, 2018.

DE AZEVEDO, João Paulo Minardi; DO NASCIMENTO, Raphael Santos; SCHRAM, Igor Bertolino. Energia eólica e os impactos ambientais: um estudo de revisão. Revista Uningá, v. 51, n. 1, 2017.

DIAS, Livia. Fontes Renováveis: Energia Eólica. Curso de Fontes Energéticas e Meio Ambiente. Ago-dez. de 2018. Notas de Aula.

DIAS, Livia. Fontes Renováveis: Biomassa. Curso de Fontes Energéticas e Meio Ambiente. Ago-dez. de 2018. Notas de Aula.

DOS REIS, Lineu Belico; SANTOS, Eldis Camargo. Energia elétrica e sustentabilidade: aspectos tecnológicos, socioambientais e legais. Editora Manole, 2006.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Aspectos Fundamentais de Planejamento Energético. Dezembro de 2005.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Atlas da Eficiência Energética – Relatório de Indicadores. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Nota Técnica. Rio de Janeiro: EPE, 2012. 58 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Balanço Energético Nacional: Relatório síntese, ano base 2019. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Nota de Discussão - Recursos Energéticos Distribuídos: Impactos no Planejamento Energético. 11 de julho de 2018. Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/ND%20-%20Recursos%20Energ%C3%A9ticos%20Distribu%C3%ADdos.pdf>. Acesso em 05 de agosto de 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Nota Técnica DEA 19/14: Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Nota Técnica DEA 016/2019: Modelo de Mercado da Micro e Minigeração Distribuída (4MD): Metodologia – Versão PDE 2029. Rio de Janeiro: EPE, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2019.

ENERGISA, Grupo. Setor Elétrico Brasileiro. Disponível em <https://ri.energisa.com.br/a-energisa/setor-eletrico-brasileiro/>. Acesso em 08 de julho de 2020.

EURECICLO. Conferências ambientais: a história por trás das tendências da sustentabilidade. Disponível em <https://blog.eureciclo.com.br/conferencias-ambientais/>. Acesso em 13 de agosto de 2020.

FEIL, Alexandre André; SCHREIBER, Dusan. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: desvendando as sobreposições e alcances de seus significados. Cadernos Ebape. BR, v. 15, n. 3, p. 667-681, 2017.

FUHRMANN, Gustavo Lamim. Análise dos Novos Condicionantes da Oferta Nacional de Gás Natural e a Demanda Termelétrica no Próximo Decênio. 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FUJII, Ricardo Junqueira. Sustentabilidade energética: uma análise do equilíbrio econômico, humano e natural. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Global Footprint Network. How The Footprint Works. Disponível em <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>. Acesso em 14 de setembro de 2020.

HALL et al. EROI of different fuels and the implications for society. Energy Policy. Issue 64, pp 141-152, 2014.

HIGINO, Gonçalo Nobre. Indicadores de desempenho ambiental do sector eléctrico em Portugal. 2014. Tese de Doutorado. Disponível em <https://run.unl.pt/handle/10362/14763>. Acesso em 28 de setembro de 2020.

História da Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em <https://ufop.br/historia-da-ufop>. Acesso em 22 de julho de 2019.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Indicadores de desenvolvimento sustentável : Brasil : 2015. IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais [e] Coordenação de Geografia. – Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Dados de irradiação para o Estado de Minas Gerais. Disponível em

http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017_MG.html. Acesso em 30 de abril de 2020.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos no Brasil e Possíveis Efeitos no Setor Elétrico. Texto para Discussão. Rio de Janeiro. Maio de 2018.

INTERACADEMY COUNCIL. Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho. Tradução de Maria Cristina Vidal Borba e Neide Ferreira Gaspar. São Paulo: Fapesp, 2010.

KURAHASSI, Luiz Fernando. Gestão da energia elétrica-bases para uma política pública municipal. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LOPES, Yona; FERNANDES, Natalia Castro; MUCHALUAT-SAADE, Débora Christina. Geração distribuída de energia: Desafios e perspectivas em redes de comunicação. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, v. 33, p. 40, 2015.

MACHADO, Fernando Vieira. Indicador de Sustentabilidade Energética – Um modelo de avaliação para a governança regulatória. III Encontro da ANPPAS. Brasília – DF. Maio de 2006.

NADAUD, Gabriela Caiuby Ariani. Acesso à energia elétrica de populações urbanas de baixa renda: o caso das favelas do Rio de Janeiro. UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético, 2012.

NEOSOLAR. “Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica e Seus Componentes”. Disponível em <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>. Acesso em 04 de agosto de 2020.

OLIVEIRA, A. F.; TRIGOSO, F. B. M.; GASI, F. Eficiência do Ciclo de Vida Energético dos Módulos Fotovoltaicos no Contexto Brasileiro. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado - RS, 17 a 20 de abril de 2018.

Oliveira Miguel Advogados. STJ Vai Julgar Repetitivo Sobre Tributação De Tarifas De Energia. Disponível em <http://www.oliveiramiguel.adv.br/blog-ler.aspx?id=124>. Acesso em 06 de julho de 2020.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Conhecimento: Perguntas e Respostas. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/perguntas-e-respostas>. Acesso em 29 de julho de 2020.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Energia agora: Carga e Geração. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>. Acesso em 11 de julho de 2020.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. O que é ONS? Disponível em <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>. Acesso em 06 de julho de 2020.

Organização das Nações Unidas – ONU. Indicadores de Desenvolvimento Sustentável: Diretrizes e Metodologias. 3ª Edição. Outubro de 2007. Nova York.

PORTAL ENERGIA. “Quais as medidas standard dos painéis solares fotovoltaicos”. Disponível em <https://www.portal-energia.com/medidas-paineis-solares-fotovoltaicos-147346/>. Acesso em 28 de outubro de 2020.

RIBEIRO, Henrique Frazão. Análise do Comportamento de Usinas Termelétricas no Sistema Interligado Nacional. 2019. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

RIGOTTO, Raquel Maria. Inserção da saúde nos estudos de impacto ambiental: o caso de uma termelétrica a carvão mineral no Ceará. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 14, p. 2049-2059, 2009.

SANTIAGO, L. S.; DIAS, M. F. Matriz de indicadores de sustentabilidade para a gestão de resíduos sólidos urbanos. *Revista Eng. Sanit. Ambient.* vol.17 no.2 Rio de Janeiro. Abr./Junho 2012.

- SCHUCHTER, Guilherme Pacheco. Emissão de gases de efeito estufa em reservatórios hidrelétricos. Monografia de Especialização. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG. Agosto de 2010.
- SILVA, Lara Raquel de Jesus Rodrigues; SHAYANI, Rafael Amaral; OLIVEIRA, Marco Aurélio Gonçalves de. Análise comparativa das fontes de energia solar fotovoltaica, hidrelétrica e termelétrica, com levantamento de custos ambientais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR-CBENS. 2018.
- SIMAS, Moana; PACCA, Sergio. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. Estudos avançados, v. 27, n. 77, p. 99-116, 2013.
- SOARES, J. A. S.; CÂNDIDO, G. A.. Indicadores de sustentabilidade energética: uma ferramenta de apoio à formulação de políticas energéticas mais sustentáveis. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.10, n.2, p.284-303, 2019.
- TAYRA, Flávio; RIBEIRO, Helena. Modelos de indicadores de sustentabilidade: síntese e avaliação crítica das principais experiências. Saúde e Sociedade, v. 15, n. 1, p. 84-95, 2006.
- TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Rio de Janeiro: EPE, v. 1, n. 1, p. 10, 2016.