

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUCAS DA SILVA ROSA

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE PLANTA
FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE DE DISTRIBUIÇÃO EM
BAIXA TENSÃO: UM ESTUDO DE CASO**

FLORIANÓPOLIS, 2019.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUCAS DA SILVA ROSA

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE PLANTA
FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE DE DISTRIBUIÇÃO EM
BAIXA TENSÃO: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador:
Prof. Everthon Taghori Sica, Dr.Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2019.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Rosa, Lucas da Silva

Simulação e análise de desempenho de planta fotovoltaica conectada à rede de distribuição em baixa tensão: um estudo de caso / Lucas da Silva Rosa ; orientação de Everthon Taghori Sica. - Florianópolis, SC, 2019. 65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.
Inclui Referências.

1. Energia renovável. 2. Energia fotovoltaica. 3. Sistema fotovoltaico conectado à rede. 4. Análise de decisão multicriterial. I. Sica, Everthon Taghori . II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica. III. Título.

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE PLANTA
FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE DE DISTRIBUIÇÃO EM
BAIXA TENSÃO: UM ESTUDO DE CASO**

LUCAS DA SILVA ROSA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 03 de dezembro, 2019.

Banca Examinadora:



Prof. Everthon Taghori Sica, Dr.Eng.



Prof. Edison Antonio Cardoso Aranha Neto, Dr.Eng.



Prof. Daniel Tenfen, Dr.Eng.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Fábio e Eunice, por toda força e incentivo nas horas difíceis, por todo apoio nessa jornada e por tornarem os meus sonhos o de vocês. Sem vocês nada disso seria possível.

Aos meus avós, Císínio, Arlete e Marta, que sempre sonharam com essa conquista. Sou muito grato a vocês.

Aos meus irmãos, Bruno e Enzo, por toda parceria e amizade durante a nossa vida. À Valentina, por toda compreensão e paciência no período de execução deste trabalho.

Ao meu orientador, Everthon Taghori Sica, pelas inúmeras vezes em que me auxiliou e guiou durante a elaboração deste trabalho. Sem o teu apoio isso não seria possível. Aos amigos que fizeram parte dessa caminhada e que levarei para o resto da minha vida.

A todos os professores que acompanharam essa trajetória e foram de extrema importância à minha formação profissional e pessoal.

RESUMO

O uso de energias renováveis é de elevada importância para matriz elétrica de um país, por ser, principalmente, uma energia que não polui o meio ambiente. O aumento da demanda de energia elétrica, em conjunto com acordos para diminuição de poluição e a redução da dependência pela fonte hídrica, tem resultado em uma busca por novas fontes de energia renováveis. Desta forma, a energia fotovoltaica se destaca como uma alternativa devido ao seu abundante potencial e ampla disponibilidade na superfície terrestre. Nos últimos anos o Brasil tem presenciado um grande aumento no mercado fotovoltaico, tanto na geração distribuída quanto na geração centralizada, principalmente devido aos altos níveis de radiação solar em território brasileiro, a redução dos custos de implantação dessas plantas e a evolução da tecnologia fotovoltaica. Deste modo, é imprescindível mensurar o desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), sendo esse o objetivo deste trabalho. Para tanto, será utilizado a análise de decisão multicritério a qual é vastamente utilizada no setor de energia, principalmente quando a análise envolve múltiplos objetivos e múltiplos interesses, o que permite escolhas mais apropriadas e eficientes. A implementação do modelo elaborado por Camila Novak, em seu trabalho intitulado “Proposta de avaliação do desempenho de plantas fotovoltaicas conectadas à rede elétrica em baixa tensão por um modelo multicriterial” se mostra de extrema importância, pois a performance dos SFCRs influencia diretamente no nível de confiabilidade destes sistemas. No entanto, a expansão da energia fotovoltaica no Brasil poderá sofrer uma queda, causada pela possível revisão da Resolução Normativa Nº 482/2012 da ANEEL, a qual pretende onerar em até 60% a energia elétrica injetada na rede de distribuição.

Palavras-chave: Energia renovável. Energia fotovoltaica. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Análise de decisão multicriterial.

ABSTRACT

The use of renewable energy is of high importance for a country's electrical matrix, as it is mainly an energy that does not pollute the environment. The increasing demand of electricity, alongside with agreements to reduce pollution and reducing dependence on water sources, has resulted in a search for new renewable energy sources. Thus, photovoltaic energy stands out as an alternative due to its abundant potential and wide availability on the earth's surface. In recent years, Brazil has seen a large increase in the photovoltaic market, both in distributed generation and centralized generation, mainly due to the high levels of solar radiation in Brazilian territory, the reduction of the installation costs of these plants and the evolution of photovoltaic technology. Thus, it is essential to measure the performance of grid connected photovoltaic systems, which is the purpose of this work. To do so, it will be used multicriteria decision analysis, which has been widely used in the energy sector, especially when the analysis involves multiple objectives and multiples interests, which allows more appropriate and efficient choices. The implementation of the multicriteria model elaborated by Camila Novak, in her work entitled "Proposal to evaluate the performance of photovoltaic plants connected to the low voltage grid by a multicriterial model" is extremely important, since the performance of the SFCRs directly influences the level of reliability of these systems. However, an expansion of photovoltaic energy in Brazil may fall, due to review of the ANEEL Normative Resolution No. 482/2012, that intends to charge up to 60% of the electricity injected into the distribution network.

Keywords: Renewable Energy. Photovoltaic energy. Grid-connected photovoltaic systems. Multicriteria decision analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de células fotovoltaicas de silício cristalino	16
Figura 2 - Central Fotovoltaica Nova Olinda.....	17
Figura 3 - SFCR em uma residência	17
Figura 4 – Curva I x V do módulo fotovoltaico CS6U-345P	19
Figura 5 - Curva típica de potência e tensão de um SFCR	19
Figura 6 - Curva I-V de duas células fotovoltaicas conectadas em série	20
Figura 7 - Diagrama de ligação com a rede de um SFCR.....	21
Figura 8 - Escala de comparação dos pares.....	27
Figura 9 - Matriz de comparação par a par	27
Figura 10 – Fotografia aérea do SFCR de 3,060 kWp do Câmpus IFSC Florianópolis-Centro	34
Figura 11 - Modelo em 3D construído com o SketchUp.....	35
Figura 12 – Modelo em 3D do SFCR.	35
Figura 13 - Parâmetros técnicos do SFCR.....	36
Figura 14 - Principais resultados da simulação	37
Figura 15 - Resultados dos principais parâmetros de avaliação	37
Figura 16 - <i>Performance Ratio</i> do SFCR.	38
Figura 17 - Diagrama de perdas do SFCR.....	38
Figura 18 - Árvore de critérios e subcritérios.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de Saaty	28
Tabela 2 - Configuração do SFCR	34
Tabela 3 – Conceito e definição da escala ordinal	40
Tabela 4 – Conceito e definição da escala cardinal.	44
Tabela 5 - Características da simulação do SFCR instalado em Blumenau.	46
Tabela 6 - Equações dos critérios.	47
Tabela 7 - Desempenho dos SFCRs nos critérios de código A1.1, 1.2, 1.3, 1.4 e 1.5.....	49
Tabela 8 - Desempenho dos SFCRs nos critérios de código B1.1, 1.2, 1.3, 1.4 e C1.1.....	49
Tabela 9 - Desempenho dos SFCRs nos critérios de código C1.2, 1.3, A2.1, A2.2	49
Tabela 10 - Desempenho dos SFCRs nos critérios de código A2.3, 2.4, 2.5 e A3.1.	50
Tabela 11 - Desempenho dos SFCRs nos critérios de código A3.2, 3.3 e 3.4.....	50
Tabela 12 - Desempenho das alternativas no critério A1.1.....	50
Tabela 13 - Desempenho das alternativas no critério A1.2.....	51
Tabela 14 - Desempenho das alternativas no critério A1.3.....	51
Tabela 15 – Desempenho das alternativas no critério B1.1.....	51
Tabela 16 - Desempenho das alternativas no critério B1.2.....	52
Tabela 17 - Desempenho das alternativas no critério B1.3.....	52
Tabela 18 - Desempenho das alternativas no critério <i>Performance Ratio</i>	52
Tabela 19 - Desempenho das alternativas no critério Custo de Energia economizada.	53
Tabela 20 - Desempenho das alternativas no critério Custo nivelado de energia.	53
Tabela 21 - Desempenho das alternativas no critério <i>Payback</i> Energético.	54
Tabela 22 - Desempenho das alternativas no critério <i>Payback time</i> de carbono.....	54
Tabela 23 - Desempenho das alternativas no critério Uso da área requerida.....	54
Tabela 24 - Matriz de comportamento econômico dos critérios A1.1, 1.2, 1.3 e 1.4.	55
Tabela 25 - Matriz de comportamento econômico dos critérios A1.5, B1.1, B1.2 e B1.3.	55
Tabela 26 - Matriz de comportamento econômico dos critérios B1.4, C1.1, C1.2 e C1.3.....	55

Tabela 27 - Matriz de comportamento econômico dos critérios A2.1, A2.2, A2.3 e A2.4.	55
Tabela 28 - Matriz de comportamento econômico dos critérios A2.5, A3.1, A3.2, A3.3 e A3.4.	55
Tabela 29 - <i>Trade-offs</i> dos critérios A1.1, 1.2, 1.3 e 1.3.	56
Tabela 30 - <i>Trade-offs</i> dos critérios A1.4, B1.1, 1.2 e 1.3.	56
Tabela 31 - <i>Trade-offs</i> dos critérios B1.4, C1.1, 1.2 e 1.3.	56
Tabela 32 - <i>Trade-offs</i> dos critérios A2.1, 2.2, 2.3 e 2.4.	57
Tabela 33 - <i>Trade-offs</i> dos critérios A2.5, A3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.	57
Tabela 34 - Valor global das alternativas.	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Definição do Problema	11
1.2	Justificativa	11
1.3	Objetivos	12
1.3.1	Objetivo Geral	12
1.3.2	Objetivos Específicos	12
1.4	Estrutura do trabalho	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	Geração Distribuída	14
2.2	Potência Instalada em Sistemas de GD	14
2.3	Sistemas Fotovoltaicos	15
2.3.1	Sistemas Fotovoltaicos Isolados	16
2.3.2	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR).....	16
2.3.2.1	<i>Componentes de um SFCR</i>	18
3	ANÁLISE DE DESEMPENHO PARA SFCR	22
3.1	Principais Métodos de Avaliação de Desempenho	22
3.2	Metodologia Multicritério	22
3.2.1	Principais métodos de ADMC	26
3.2.1.1	<i>AHP</i>	26
3.2.1.2	<i>MAUT</i>	29
3.2.1.3	<i>PROMETHEE</i>	31
3.2.1.4	<i>ELECTRE</i>	32
3.3	PVsys	32
4	ESTUDO DE CASO	34
4.1	Simulação com PVsys	34
4.2	Modelo Multicriterial de Avaliação de Desempenho	39
4.3	Implementação do Modelo Multicriterial	46
5	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A utilização de recursos hídricos é a principal fonte para produção de energia no Brasil, principalmente através das Usinas Hidrelétricas (UHEs), que corresponde a cerca de 61% da energia elétrica instalada na matriz energética brasileira, de acordo com o Banco de Informações de Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (2019). Embora, a matriz energética brasileira atual seja considerada hidro-termo-eólica, a energia produzida pelas hidrelétricas é considerada fonte importante de inércia para o Sistema Interligado Nacional (SIN). Porém, traz consigo algumas desvantagens futuramente, pois dependem dos níveis pluviométricos e grandes áreas para sua construção.

Em virtude disso, o Brasil investe em novas fontes de energia renováveis, especialmente a energia fotovoltaica, que possui grandes vantagens, sendo as principais: reduzir o custo da fatura de energia elétrica para o consumidor; a não emissão de gases do efeito estufa quando considerado a operação; além de reduzir o uso das linhas de transmissão e distribuição, pois as plantas podem estar localizadas próximas ao centro de carga.

A energia fotovoltaica cresce, agressivamente, no mundo, sobretudo no Brasil, nos últimos anos, devido aos recentes avanços tecnológicos, ao aumento da demanda de energia elétrica e a ambição de tornar as matrizes energéticas mais renováveis. Os projetos de grandes centrais fotovoltaicas, de microgeração e minigeração distribuída, estão cada vez mais presentes no Sistema Elétrico de Potência (SEP) do Brasil nos últimos anos.

O número de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) aumenta expressivamente no Brasil, e conta com o incentivo da publicação da Resolução Normativa nº 482/2012, da ANEEL (2012), que viabiliza a geração de energia a partir de fontes renováveis, possibilitando cidadãos brasileiros de gerarem sua própria energia através da mini e microgeração distribuída de energia elétrica (SOUZA; OLIVEIRA, 2018). No entanto, em outubro de 2019 foi aberta a consulta pública da ANEEL nº 025/2019, a qual altera a Resolução Normativa nº 482/2012 e aprova a revisão do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), com o intuito de

onerar por meio de ICMS ou redução de subsídio à produção por energia fotovoltaica nas modalidades de mini e microgeração.

Desta forma, este trabalho trata-se da continuação e implementação do modelo multicriterial proposto no trabalho realizado por Camila Novak, intitulado como Proposta de avaliação de desempenho de plantas fotovoltaicas conectadas à rede elétrica em baixa tensão por um modelo multicriterial.

1.1 Definição do Problema

A energia elétrica é essencial para grande parte dos setores econômicos, desde a agricultura à indústria. O elevado nível de poluição, em conjunto com as mudanças climáticas e o alto custo do petróleo são fatores que evidenciam a magnitude das energias renováveis. Deste modo, há uma elevada necessidade em utilizar energias limpas proveniente de fontes diversas, tais como a solar, eólica e biomassa (YADAV; KUMAR; CHANDEL, 2015). A energia solar, mesmo que intermitente, é uma das soluções mais promissoras para a crise global de energia (OLIVEIRA; SODRE, 2018). O alto nível de irradiação solar em território brasileiro em conjunto com incentivos fiscais e a evolução da tecnologia fotovoltaica tornam viáveis a implantação de plantas fotovoltaicas conectadas à rede de distribuição em Baixa Tensão (BT). Desta forma, com a finalidade de prezarmos uma matriz energética diversificada, mas, sobretudo, eficiente e eficaz, há a necessidade de avaliar o desempenho energético e técnico dessas plantas fotovoltaicas por meio de um modelo de performance.

1.2 Justificativa

No Brasil, a transformação da energia eólica em eletricidade já está bastante difundida. Atualmente, de acordo com o BIG da ANEEL (2019), a energia eólica é responsável por 8,85% (15.590.193 kW) de toda a capacidade instalada da matriz energética elétrica brasileira. Em contrapartida, o fornecimento de energia elétrica a partir da energia solar ainda não apresenta uma contribuição expressiva na matriz, com uma capacidade instalada de 2.293.935 kW, o que representa a 1,30% da matriz energética elétrica brasileira.

Todavia, segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2019), a energia fotovoltaica, baseada na conversão direta da irradiação solar em energia elétrica, atingiu 500 MW de potência instalada em mini e microgeração distribuída, o que corresponde a mais de 49 mil SFCRs, o que traz economia e sustentabilidade ambiental.

Com o aumento da instalação dos SFCRs há uma elevada necessidade de inspeção e avaliação da eficiência e desempenho dessas plantas, que influencia diretamente o nível de confiabilidade dos sistemas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo de plantas fotovoltaicas e analisar o seu desempenho a partir de modelos matemáticos e simulações.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Implementar um modelo multicriterial de avaliação de desempenho de plantas fotovoltaicas;
- b) Simular indicadores de desempenho de plantas fotovoltaicas no software PVsyst;
- c) Analisar a performance da instalação fotovoltaica do bloco central do IFSC Câmpus-Florianópolis;
- d) Utilizar a simulação do PVsyst como alternativa de mensuração de performance junto ao modelo multicriterial.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em 5 Capítulos, começando com a introdução (Capítulo 1) e finalizando com a conclusão (Capítulo 5), além das referências bibliográficas. O Capítulo 2 apresenta o conceito de geração distribuída, as diferentes formas que pode ser utilizada, dando ênfase aos SFCR. O Capítulo 3 apresenta os diferentes parâmetros de análise de desempenho dos SFCR. O Capítulo 4 exibe o estudo de caso, com a simulação no PVsyst, a implementação do modelo multicriterial e a análise dos resultados. Já o Capítulo 5 mostra as conclusões obtidas no trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Geração Distribuída

A Geração Distribuída (GD) é uma expressão utilizada com a finalidade de caracterizar a geração de energia elétrica produzida junto ou próxima dos centros de carga, independente da potência, tecnologia e fonte de energia. Por estarem próximos aos centros de carga, a GD possui uma grande vantagem quando comparada a geração centralizada, pois provoca uma economia nos investimentos em linhas de transmissão e redução nas perdas do sistema (INEE, 2019).

No Brasil, as usinas hidrelétricas, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs) são responsáveis por aproximadamente 61% da geração de energia elétrica (ANEEL, 2019). As UHEs, em sua grande parte, são construídas afastadas dos centros de carga, o que evidencia a necessidade de um sistema de transmissão extenso e interligado, como é o Sistema Interligado Nacional (SIN).

A GD complementa esse sistema no fornecimento de energia, contribuindo para que a oferta de energia possa atender a demanda (VERGÍLIO, 2012). A GD inclui várias formas de produção de energia elétrica, renováveis ou não, sendo as mais destacadas:

- a Cogeração qualificada;
- o Grupo Gerador Diesel;
- as Centrais de Biomassa;
- as Eólicas; e
- os Sistemas fotovoltaicos.

2.2 Potência Instalada em Sistemas de GD

Segundo a Resolução Normativa nº 687 da ANEEL de novembro de 2015, que altera o art. 2º da Resolução Normativa nº 482 de 2012, que define as faixas de potência dos sistemas de GD. Dessa forma, fica classificado conforme mostrado a seguir:

- Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência menor ou igual a 75 kW e que utilize a cogeração qualificada, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalação de unidades consumidoras;

- Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalação de unidades consumidoras;

2.3 Sistemas Fotovoltaicos

O Sol é a fonte de energia de maior importância em nosso planeta. Diariamente, a superfície terrestre recebe quantidades de energia em forma de luz e calor, que, se utilizadas seriam suficientes para suprir muitas das necessidades neste mesmo período. Este fato comprova que a energia solar constitui uma fonte inesgotável de energia, com enorme potencial de captação e conversão em outras formas de energia, principalmente térmica e elétrica (VILLALVA, 2015).

Grande parte das fontes de energia, incluindo hidráulica, eólica e biomassa, são formas indiretas de energia solar, visto que a partir da energia do Sol ocorre a evaporação, a qual motiva o ciclo das águas que induz a geração de eletricidade por meio das hidrelétricas. Além disso, induz a circulação atmosférica em grande escala, formando assim os ventos (PINHO; GALDINO, 2014).

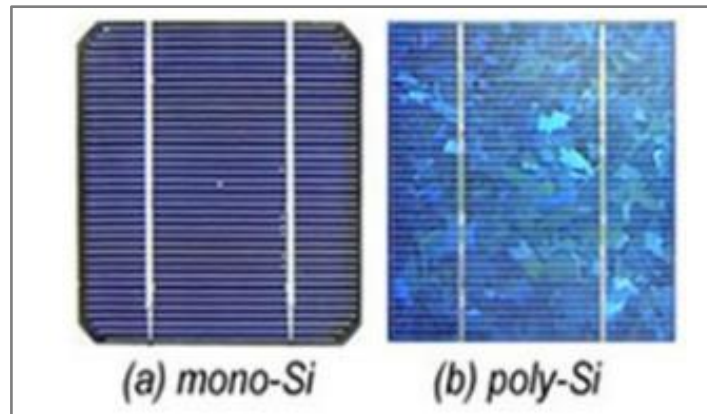
De forma direta, a energia solar pode ser utilizada como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos ou ambientes; e convertida diretamente em energia elétrica, através de efeitos sobre materiais, entre eles o termoelétrico e fotovoltaico.

No efeito fotovoltaico, a radiação solar incide sobre certos materiais semicondutores, que são capazes de absorver a energia contida nos fótons presentes na radiação incidente, transformando-a em eletricidade (ZILLES, 2012).

A unidade básica para a conversão de energia solar em eletricidade é a célula fotovoltaica, a qual é feita de materiais semicondutores. O material mais utilizado para confecção de células fotovoltaicas é o silício (Si).

As células de Si podem ser fabricadas por silício mono e policristalino ou amorfo, sendo as células do monocristalino mais eficientes que as do policristalino (BENEDITO, 2009). A Figura 1 mostra exemplos dos tipos de células de silício cristalino.

Figura 1 - Tipos de células fotovoltaicas de silício cristalino



Fonte: Fusano (2013).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFI) ou SFCR.

2.3.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados

Os SFI são aplicados em casos onde a energia convencional não está disponível, seja por restrições técnicas ou falta de interesse das concessionárias em levar energia elétrica para regiões de baixa densidade demográfica. Geralmente os SFIs são compostos por módulo fotovoltaico, inversor, elementos de proteção, controlador de carga e banco de baterias (BENEDITO, 2009).

2.3.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR)

Os SFCR são sistemas que podem ser de grande porte (centrais fotovoltaicas) conforme a Figura 2, que geralmente são afastados das áreas urbanas,

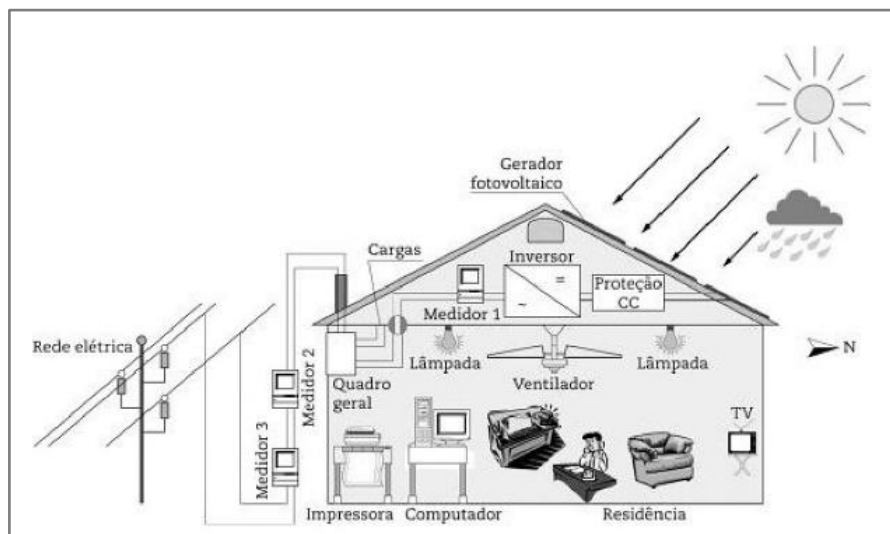
ou de pequeno porte, os quais usualmente são associados a residências, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 2 - Central Fotovoltaica Nova Olinda



Fonte: Enel Green Power (2019).

Figura 3 - SFCR em uma residência



Fonte: Zilles (2012).

Por operarem conectados à rede, onde a energia produzida pode ser consumida pela carga ou injetada diretamente na rede elétrica convencional, os SFCR dispensam a necessidade do uso de armazenadores de energia. Esses sistemas de geração de energia buscam gerar eletricidade para o consumo local, com o âmbito de diminuir ou até eliminar o consumo de energia proveniente da rede de distribuição local ou ainda de gerar excedente de energia para injeção na rede (NOVAK, 2018).

Para que seja possível avaliar um SFCR, é necessário analisar os componentes do conjunto.

2.3.2.1 Componentes de um SFCR

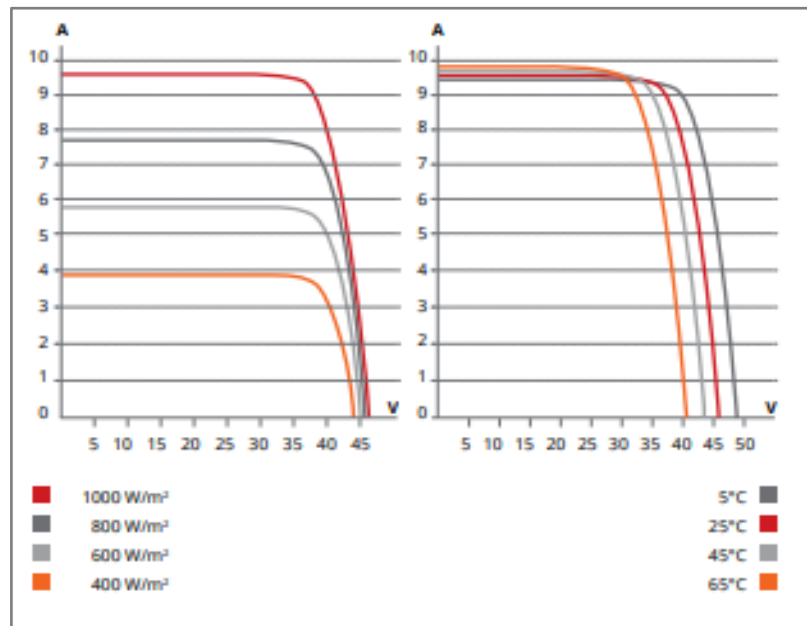
Um SFCR usualmente é composto por módulos fotovoltaicos (gerador fotovoltaico), um inversor para conexão à rede, dispositivos de proteção, um medidor bidirecional de energia e um quadro geral.

As células fotovoltaicas são agrupadas em associações em série ou paralelo para produzir corrente e tensão apropriadas às funcionalidades elétricas a que se destinam. Após a definição da configuração desejada, o conjunto de células são encapsuladas para formar um módulo fotovoltaico.

Além de compor a associação de células, o módulo fotovoltaico serve para proteger as células de intempéries, isolá-las eletricamente de contatos externos e fornecer ao sistema maior rigidez mecânica (ZILLES, 2012).

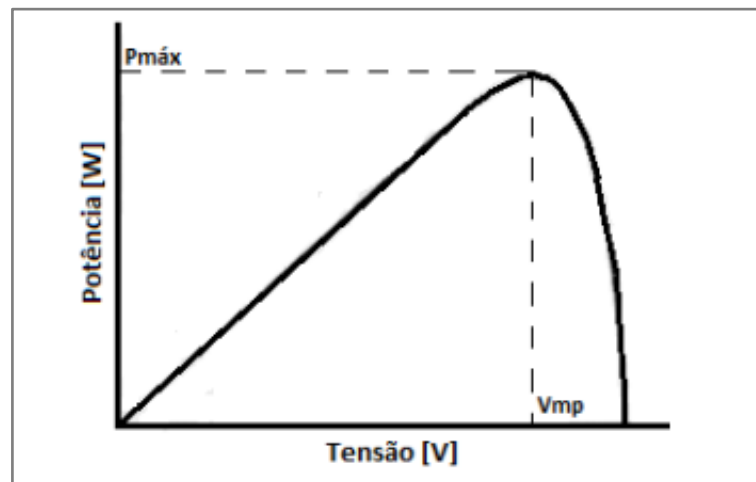
A potência de saída nos terminais dos módulos não é constante, pois depende da corrente e da tensão, em que ambas dependem da irradiância e temperatura (NOVAK, 2018). As características dos módulos fotovoltaicos são diretamente influenciadas pela intensidade luminosa e pela temperatura das células. A Figura 4 mostra a curva de I (corrente) e V (tensão) para o módulo fotovoltaico CS6U-345P, do fabricante Canadian Solar, enquanto a Figura 5 apresenta a curva típica de potência de um SFCR.

Figura 4 – Curva I x V do módulo fotovoltaico CS6U-345P



Fonte: Canadian Solar (2018).

Figura 5 - Curva típica de potência e tensão de um SFCR



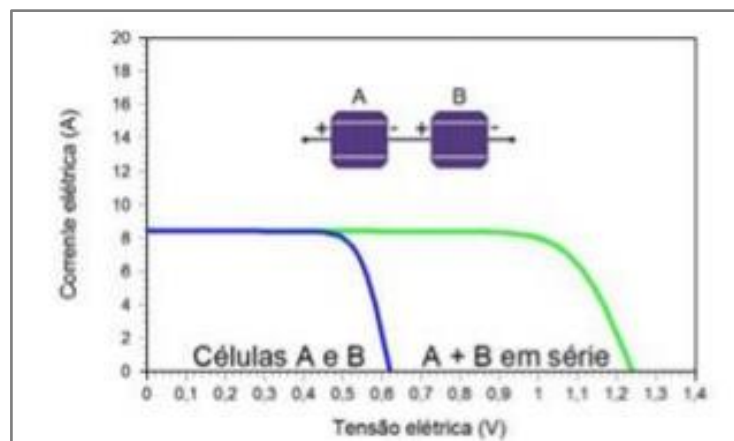
Fonte: Fadigas (2018).

O módulo fotovoltaico é capaz de fornecer a corrente elétrica máxima especificada em seu catálogo, na condição padrão de teste (STC), quando a irradiância solar incidente for de 1000 W/m^2 a uma temperatura de 25°C . Pelo fato da corrente ser diretamente proporcional a irradiância, quanto menor a irradiância, menor será a corrente (NOVAK, 2018).

No caso da tensão, esta é inversamente proporcional a temperatura de operação. Quanto maior for a temperatura, menor será a tensão, e quanto menor a temperatura de operação, maior será a tensão.

Os módulos fotovoltaicos podem ser associados em série ou em paralelo. Quando conectados em série, que são chamadas de strings, servem para definir o nível de tensão que entrará no lado CC do inversor. Por estarem conectados em série, a tensão dos módulos se soma, conforme a Figura 6, enquanto a corrente permanece inalterada. Na conexão em paralelo, mais utilizada nos SFIs, os módulos são conectados com a finalidade de proporcionar uma maior corrente, pois as correntes dos módulos são somadas, permanecendo o mesmo nível de tensão.

Figura 6 - Curva I-V de duas células fotovoltaicas conectadas em série



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

O equipamento utilizado para converter a corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada, é chamado de inversor. O inversor sincroniza a corrente alternada com a tensão da rede elétrica, viabilizando assim a conexão do sistema fotovoltaico à rede.

Um inversor conectado à rede, também conhecido como *grid-tie*, transfere a energia produzida diretamente ao quadro de distribuição de força do sistema. Desta maneira, a energia é utilizada por toda a carga. Enquanto houver luz solar, toda energia produzida será injetada e utilizada pelo sistema. Se a energia gerada não for suficiente para abastecer toda a carga, a carga então busca a diferença na rede de distribuição em que está conectado. Caso a energia produzida seja maior que a energia que a carga necessita, a energia excedente é então injetada na rede.

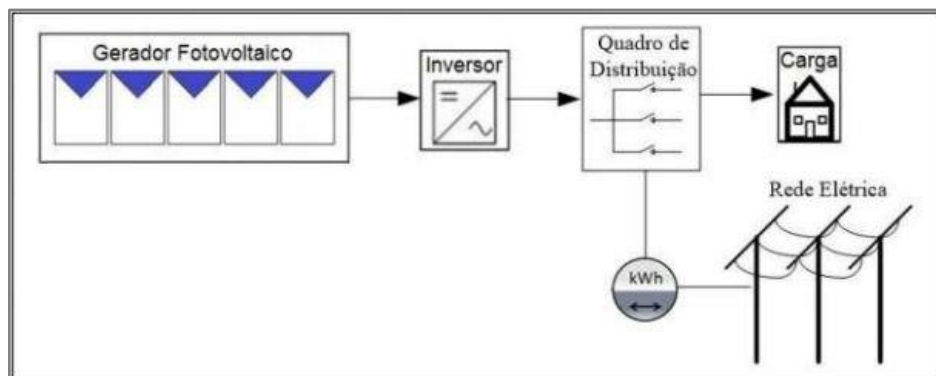
Durante o período noturno, como não há produção de energia fotovoltaica, o sistema é abastecido diretamente pela rede de distribuição. Esse processo é gerenciado pelo inversor e não há necessidade de intervenção do usuário (BARROS, 2011).

Como o sistema é conectado à rede, é obrigatório que o inversor possua a função de anti-ilhamento, a qual garante que em caso de falta de energia da rede, o inversor desativa automaticamente, evitando a energização indevida da rede elétrica em que está conectado. Isso ocorre pois caso alguma manutenção esteja prevista neste período, não coloque os funcionários da rede de distribuição em perigo.

Os medidores bidirecionais de energia, localizados no padrão de entrada, são utilizados para que se tenha ciência de quanto o SFCR está gerando, consumindo e injetando na rede.

Os dispositivos de proteção, como o próprio nome diz, são utilizados para proteger e evitar qualquer tipo de avarias no sistema gerador e no local da instalação. Usualmente são compostos de chaves seccionadoras, fusíveis, disjuntores e dispositivos de proteção contra surto (DPS). A Figura 7 apresenta um diagrama de conexão de um SFCR.

Figura 7 - Diagrama de ligação com a rede de um SFCR.



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

3 ANÁLISE DE DESEMPENHO PARA SFCR

3.1 Principais Métodos de Avaliação de Desempenho

Segundo Fusano (2013), os estudos e a análise do desempenho dos sistemas fotovoltaicos são de extrema importância para que seja mantido o progresso contínuo da tecnologia e da indústria fotovoltaica. Para os fabricantes, estes são comprovantes de qualidade dos produtos existentes. Para o setor de pesquisa e desenvolvimento dos produtos, são medidas relevantes para auxiliar a reconhecer necessidades futuras.

A geração anual de energia de um sistema fotovoltaico resulta da quantidade total de radiação solar disponível na localização geográfica da instalação. Este valor pode ser presumido a partir de dados meteorológicos, os quais informam a irradiação, em kWh/m², em um plano horizontal, das estações meteorológicas mais próximas ao sistema.

Abaixo seguem alguns fatores que podem influenciar na geração de um SFCR:

- a localização, orientação e a inclinação dos módulos FV;
- a potência pico dos módulos FV;
- a eficiência dos módulos FV;
- a eficiência do inversor utilizado; e
- as perdas entre as conexões do SFCR e os consumidores.

3.2 Metodologia Multicritério

A metodologia multicritério difere da multiobjetivo quanto a aplicação e a implementação. A primeira aborda o problema com enfoque econômico usufruindo de técnicas de apoio à decisão usufruindo dos conceitos da Teoria de Utilidade e do Ótimo de Pareto. A segunda aborda o problema com enfoque tecnológico usufruindo de técnicas de Otimização Matemática. Contudo, ambas são consideradas aptas à problemas com múltiplos atributos e objetivos. Quando um problema de otimização possui apenas um objetivo, existe uma única solução ótima. Em contraste, em um

problema multiobjetivo ou multicritério com objetivos que se conflitam, não existe uma solução única, mas um conjunto de soluções ótimas. Neste caso, o conceito multidimensional de "dominância" é utilizado para precisar se uma solução é superior a outras soluções (RODRIGUEZ, 2010).

Segundo Cucchiella e D'adamo (2015), a Análise de Decisão Multicritério (ADMC) é aplicada em problemas de decisão, especialmente em avaliações de sustentabilidade e sua função é importante em problemas no planejamento energético. A Análise de Decisão Multicritério (ADMC) é vastamente utilizada no setor de geração de energia. Além disso, a abordagem multidimensional, que caracteriza a ADMC, permite analisar a performance e a evoluir o processo de tomada de decisão.

A ADMC melhora a qualidade das decisões envolvendo múltiplos critérios, fazendo escolhas mais apropriadas e eficientes. Alguns métodos de ADMC são: *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, *Elimination and Choice Expressing Reality (ELECTRE)*, *Multiattribute Utility Theory (MAUT)*, e *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)*. Em seu estudo, Chucchiella e D'adamo (2015) propuseram avaliar a sustentabilidade de projetos de geração alternativa através de múltiplos indicadores. A metodologia implementada baseada na análise multicritério onde foi proposta a avaliação de diferentes sistemas fotovoltaicos no contexto ambiental, econômico e energético. Os indicadores utilizados foram: *Energy Payback Time (EPBT)*; *Energy Return on Investment (EROI)*; *Greenhouse Gas per kilowatt-hour (GHG/kWh)*, *Greenhouse Gas Payback Time (GPBT)*; *Greenhouse Gas Return on Investment (GROI)*; *Net Present Value (NPV)*; *Discounted Payback Time (DPBT)*, e *Discounted Agreggate Cost Benefit (D(B/C)_A)*.

Athanasios (2008) classificou dez fontes de geração de energia através da metodologia multicritério fundamentado no método de Processo de Hierarquia Analítica (AHP). Para essa avaliação foram criados critérios e, seguidamente, imputadas importâncias relativas e pontuações a eles. Esses critérios tinham relação com vertentes tecnológicas, econômicas e de sustentabilidade. Com isso, a avaliação por tipo de planta de energia expos uma perspectiva diferente de resultados dando ênfase a contribuição de cada critério para cada fonte. Nessa análise, a fonte de energia solar fotovoltaica ocupa a quinta posição com 12,33%, principalmente por ser uma fonte de energia renovável e não possuir custos de combustível (critério de avaliação).

Azzolin (2015) elaborou uma metodologia para mapeamento e priorização de fontes de GD através de recursos renováveis para suporte à nova ótica de planejamento da distribuição, somente para lugares onde as fontes escolhidas foram a eólica, fotovoltaica, hídrica e biomassa. A metodologia contempla a elaboração de um mapeamento dos recursos energéticos disponíveis em uma área delimitada para estudo, apontando os pontos mais favoráveis de aproveitamento. Com os recursos mapeados, é determinada a capacidade energética que os mesmos representam. Então, ocorre ainda a etapa de priorização das fontes mapeadas – primeiramente sob o ponto de vista da distribuidora e seguidamente, sob o ponto de vista dos investidores -, a partir de múltiplos critérios de ordem quantitativa e qualitativa, de maneira a indicar a melhor forma de participação das fontes em duas perspectivas diferentes de análise.

Santos *et al.* (2019) propuseram uma avaliação das potências regiões do estado de Sergipe que apresentam os melhores parâmetros para a instalação de usinas fotovoltaicas. Utilizando a análise de decisão multicritério, para definição do local mais adequado em relação aos critérios considerados, foi aplicado o método AHP, baseado em dados gerados no processamento digital de imagens. Os critérios utilizados nesse estudo foram:

- a radiação solar;
- a temperatura;
- a precipitação;
- a rede elétrica; e
- a malha rodoviária.

Mendes, Pereira e Sthel (2019) elaboraram uma avaliação de qual fonte renovável de energia, a energia fotovoltaica ou energia eólica, na GD é a mais apropriada na cidade de Campos dos Goytacazes/RJ. Para fazer tal avaliação, utilizaram a análise de decisão multicritério, considerando para tomada de decisão aspectos quantitativos e qualitativos. O método de ADMC escolhido para o estudo foi o AHP e os critérios considerados foram: econômico; técnico; ambiental; e social. Ao fim do estudo foi concluído que a energia fotovoltaica era a melhor solução para o caso proposto.

Santos, Ribeiro e Rangel (2017) utilizaram a ADMC, através do método PROMETHEE II para avaliar as fontes de energias renováveis no sudeste brasileiro, sendo elas: energia fotovoltaica; energia hidrelétrica; biomassa; e energia eólica. Foram considerados aspectos econômicos, ambientais e tecnológicos. Para elaboração do estudo, foram escolhidos sete critérios que fossem capazes de mensurar e descrever diferentes aspectos e dimensões relacionadas à produção energética na região, sendo eles:

- a relação potencial/demanda;
- a disponibilidade;
- o potencial produtivo;
- a Emissão de CO₂ direta;
- o Impacto implantação;
- o Custo Nivelado de Energia; e
- a Eficiência Conversão;

A partir da avaliação, foi obtido que a energia hidráulica e biomassa são mais competitivas que as energias fotovoltaica e eólica. No entanto, o resultado depende diretamente das preferências do decisor, devido a ordenação utilizada na implementação do método.

Abreu, Erthal, Da Hora, Souza e Santos (2019) propuseram uma pesquisa para avaliar as potencialidades, viabilidades e impactos de fontes de combustíveis fósseis, em especial o gás natural, e identificar através da ADMC a melhor alternativa de fonte de energia renovável para a região definida. As alternativas de fonte de energia escolhidas foram: hidrelétrica; biomassa; eólica; e fotovoltaica. A metodologia utilizada consistiu na aplicação de um questionário com seis perguntas em relação aos quatro tipos de fonte de energia e atribuído pesos a cada um dos critérios para fazer a análise decisória. Os atributos definidos para a pesquisa foram:

- a potencialidade;
- a estabilidade na geração;
- a viabilidade econômica;
- a viabilidade técnica;

- os Impactos sociais; e
- os impactos ambientais.

O método aplicado no estudo foi o PROMETHEE II, o qual ordenou as fontes de energia renováveis em forma decrescente, que resultou na energia fotovoltaica como a melhor alternativa para região estudada.

3.2.1 Principais métodos de ADMC

3.2.1.1 AHP

Segundo Leite e Freitas (2012), o método AHP é uma das abordagens que pode ser utilizada quando o tomador de decisão emprega seu julgamento e entendimento para fazer uma análise entre critérios restritivos para uma determinada situação. De acordo com Gomes (2009), o AHP é fundamentado na comparação paritária dos critérios, visando responder duas perguntas principais: Quais são os critérios de maior importância? Qual a proporção dessa importância?

Segundo Berzins (2009), para obter as respostas desses questionamentos, os decisores necessitam atribuir valores numa escala de 1 a 9 para cada critério, comparando-os par a par. Gomes (2009) indica que esse método só deve ser escolhido quando os parâmetros puderem ser comparáveis entre si.

Antes de iniciar um problema e aplicar a AHP deve-se organizar uma hierarquia de objetivos ou critérios dos diferentes pontos de vista envolvidos. Montar a estrutura hierárquica usualmente é a parte mais difícil de aplicação do AHP (ALVES; NYKIEL; BELDERRAIN, 2007).

Sica (2009) afirma que o método AHP possibilita empregar os modelos de maneira realista, a partir da inclusão de medidas tangíveis e intangíveis, levando em consideração fatores qualitativos ou quantitativamente mensuráveis.

Segundo Casaroto e Kopittke (1998), o método AHP é baseado em três princípios: decomposição, julgamentos comparativos e síntese das prioridades. Os critérios podem ser classificados como quantitativos ou qualitativos, sem necessitar de uma escala numérica, pois as comparações ocorrem de forma relativa entre as alternativas. A maior vantagem do método AHP é a possibilidade de comparações

relativas sem necessidade de escala absoluta para um critério, tornando mais fácil a análise de critérios qualitativos.

Como desvantagem, o método AHP exige operações matriciais e consequentemente um conhecimento em Geometria Analítica e Álgebra Linear e etc.

De acordo com Santos *et al.* (2019) após a divisão do problema de tomada de decisão em níveis e a organização hierárquica dos objetivos ou critérios, é feita a comparação de pares dos componentes de cada nível, na qual se define a importância de um elemento x , para cada elemento do nível em questão, em relação ao elemento y . Isto é feito a partir de uma escala semântica de cinco níveis baseados na tabela Saaty e encontram-se na Figura 8. Em geral, é feita uma comparação aos pares.

Figura 8 - Escala de comparação dos pares

1	Preferência de x sobre y é indiferente
3	Preferência de x sobre y é fraca
5	Preferência de x sobre y é moderada
7	Preferência de x sobre y é forte
9	Preferência de x sobre y é absoluta

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2019).

Para construção da matriz de comparação par a par, também conhecida como matriz de Roberts, é necessária a classificação dos níveis de impacto em uma escala ordinal, onde o primeiro nível é considerado o melhor e o último o pior. Após a elaboração da escala ordinal, é aplicado o método AHP.

A matriz de comparação par a par, é construída a partir de avaliações fundamentadas através da escala de Saaty e pode ser vista na Figura 9.

Figura 9 - Matriz de comparação par a par

a_{11}	a_{12}	a_{13}	...	a_{1n}
a_{21}	a_{22}	a_{23}	...	a_{2n}
.
.
.
a_{n1}	a_{n2}	a_{n3}	...	a_{nn}

Fonte: Mendes, Pereira e Sthel (2019).

Após a construção das matrizes, é necessário obter os autovetores, que podem ser obtido por aproximação geométrica, limitados a uma matriz com dimensão 5x5, definidos como a média de cada linha, devendo ser calculados através da soma dos elementos de cada linha da matriz normalizada e da divisão desta soma pelo número de elementos da linha.

Berzins (2009) afirma que a próxima etapa é a realização do teste de inconsistência, o qual auxilia na verificação de desvios entre as comparações. O resultado zero indica a consistência perfeita, enquanto os valores maiores que 0,1 pode causar erros nas decisões. O Resultado de Consistência (RC) é obtido através das equações (1) e (2):

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (1)$$

e,

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - \eta}{\eta - 1} \quad (2)$$

Em que:

$\lambda_{m\acute{a}x}$ – É o maior autovalor da matriz de julgamentos;

η – Dimensão da matriz, que é sempre quadrada;

IR – Índice tabelado em função de η , encontrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Tabela de Saaty

η	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0,00	0,00	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2019).

Após a realização de todos os passos, o cálculo de RC é o fator decisivo para a aceitação do resultado obtido. A matriz será considerada consistente se o valor de RC for menor que 0,1 e inconsistente se for maior que 0,1, o que pode ocasionar a troca de pesos importância das variáveis ou desconsiderar algumas restrições, caso os resultados não sejam satisfatórios.

O resultado da matriz de comparação par a par é o comportamento econômico de cada um dos níveis classificados na escala ordinal anteriormente.

3.2.1.2 MAUT

Segundo Raupp *et al.* (2018), a MAUT é uma extensão da Teoria da Utilidade e mede a utilidade da solução das possibilidades a partir de uma função matemática, levando em conta todos os atributos do problema em questão. A MAUT ordena as alternativas associando os critérios em um único modelo de síntese, facilitando os *trade-offs*. Fundamenta-se em dois cenários de preferências: preferência estrita e indiferença.

Segundo Novak (2018), a MAUT é baseada no fundamento em que qualquer problema de decisão existe uma função de valor real $v(.)$ sobre o grupo de possibilidades que o decisor almeja explorar.

O modelo multicritério tem a possibilidade de ser construído a partir de atributos individuais, relacionados às ações que serão analisadas. O objetivo essencial dos atributos é mensurar a performance de todas as potenciais ações (SICA, 2009).

Um dos primeiros passos na aplicação da MAUT baseia-se na modelagem de preferências do decisor, através da função utilidade ou de valor econômico. No período da fase de elaboração da estrutura de preferências do decisor que se determina um valor para consequência em que o decisor demonstra incerteza entre optar por esse valor, o equivalente certo, ou continuar na incerteza do problema (FERREIRA, 2009).

Segundo Gomes, Araya e Carignano (2009), as etapas para o desenvolvimento da MAUT são:

- identificar os tomadores de decisão;
- definir as alternativas;
- definir os critérios relevantes para o problema de decisão;
- avaliar as alternativas em relação aos critérios;
- determinar a importância relativa dos critérios;

- determinar a avaliação global de cada alternativa;
- realizar a análise de sensibilidade.

Segundo Araújo Júnior (2013) a MAUT parte da elaboração de funções utilidades individuais v_i para cada critério "i", para em seguida associar as inúmeras funções em somente uma função utilidade. Essas inúmeras funções utilidades podem ser associadas em apenas uma função utilidade na forma aditiva ou multilinear.

A forma aditiva é uma simplificação da forma multilinear. Esta propriedade é capaz de simplificar bastante o trabalho de obtenção da utilidade total, porém só pode ser utilizada quando há independência entre os critérios. O resultado da função aditiva (3) serão valores entre 0 e 1 e a soma dos *trade-offs* deve ser igual a 1. O valor 0 corresponde ao desempenho da pior alternativa e o 1 da melhor alternativa possível.

$$v(w_1, \dots, w_n) = \sum_{i=1}^n w_i v_i(a) \quad (3)$$

Em que $v_i(a)$ representa o desempenho da alternativa a conforme o i -ésimo critério, e w_i representa o *trade-off* do i -ésimo critério.

Nos casos em que a forma aditiva não pode ser utilizada, a forma multilinear (4) é uma forma de agregação mais geral, tendo a possibilidade de viabilizar a dependência entre critérios.

$$v(w_1, \dots, w_n) = \prod_{i=1}^n [v_i(a)]^{w_i} \quad (4)$$

Com as associações das funções utilidades em uma única função, as constantes w_i são determinadas confrontando os critérios dois a dois, de maneira a atribuir maior valor ao critério de maior importância ao decisor.

Segundo Ferreira (2009) os resultados da execução dos métodos embasados na MAUT são ricos no que se refere às relações de dominância, conduzindo a uma função utilidade que permite organizar todas as ações, da melhor para a pior.

Segundo Sica *et al.* (2009) uma das possibilidades para a função de valor econômico é obtida, de forma geral, a partir da equação a seguir.

$$v(i) = \frac{e^{\alpha K} - 1}{e^{\alpha} - 1} \quad (5)$$

Em que α e K variam conforme o tipo de critério em análise.

$\alpha \in \mathbb{R}^*$ - para atribuir comportamento econômico avesso;

$\alpha \in \mathbb{R}^*$ + para atribuir comportamento econômico propenso;

$$K = \frac{a_i - \min(a_i)}{\max(a_i) - \min(a_i)}, \text{ para critério crescente, onde quanto maior o valor,} \quad (6)$$

melhor é economicamente;

$$K = \frac{\max(a_i) - a_i}{\max(a_i) - \min(a_i)}, \text{ para critério decrescente, onde quanto menor o valor,} \quad (7)$$

melhor é economicamente.

3.2.1.3 PROMETHEE

O PROMETHEE, que foi criado por Brans e Vincke em 1985, é um método adequado às situações em que os critérios podem ser representados em forma de valores. Para uma alternativa "A", sua ordenação é obtida pelo somatório das preferências de "A" sobre todas as demais alternativas, menos o somatório das demais alternativas sobre "A" (WERNKE; BORNIA, 2001).

Segundo Cavalcante e Almeida (2005), a família de métodos PROMETHEE são divididos em:

- PROMETHEE I: Pré-ordem parcial, problemática de escolha;
- PROMETHEE II: Estabelece uma pré-ordem completa entre as alternativas, podendo ser utilizado na problemática da escolha;
- PROMETHEE III: Ampliação da noção da indiferença, tratamento probabilístico dos fluxos;
- PROMETHEE IV: Pré-ordem completa ou parcial. Problemática de escolha e ordenamento. Destinado aos casos em que o conjunto de soluções é contínuo;

- PROMETHEE V: Após a implementação do PROMETHEE II, são introduzidas restrições, identificadas no problema, e incorpora-se uma filosofia de otimização inteira;

- PROMETHEE VI: Pré-ordem completa ou parcial. Problemática de escolha e ordenamento. Destinado as situações onde o decisor não consegue estabelecer um valor fixo de peso para cada critério;

- PROMETHEE – GAIA – Extensão dos resultados do PROMETHEE, através de um procedimento visual e interativo.

3.2.1.4 ELECTRE

Segundo Roy e Bouyssou (1993) o método ELECTRE faz uma abordagem sistemática da relação entre todos os possíveis pares de diferentes opções. O grau de preferência das opções quando comparada as demais é o parâmetro utilizado para obter o resultado. Esta metodologia acarreta na elaboração de relações de preferência, a geração dos índices de concordância e discordância, além de avaliar os resultados obtidos de uma análise global de todas as relações de preferências derivadas.

O *trade-off* de cada critério é escolhido pelos tomadores de decisão, fazendo com que não exista para esse método uma ferramenta matemática que gere os *trade-offs* dos critérios, como ocorrem para alguns dos métodos de ADMC (CALILI *et al.* 2010).

3.3 PVsyst

PVsyst é um *software* de dimensionamento e simulação fotovoltaica, desenvolvido pela Universidade de Genebra, com o qual é possível prever o quanto de energia elétrica uma planta fotovoltaica irá gerar. Foi projetado para ser utilizado por arquitetos, engenheiros e pesquisadores. Os resultados são apresentados em forma de relatórios, que incluem gráficos e tabelas específicas.

Através das características geográficas da localidade é possível obter a irradiação solar horizontal utilizando o PVsyst. Com os dados de irradiação solar e as

características da planta é possível prever o quanto a planta fotovoltaica deverá gerar durante o ano.

Segundo Lobo *et al.* (2018), o PVsyst possui uma vasta base de dados contendo vários componentes de SFCR. A simulação no PVsyst requer *inputs* meteorológicos, sendo alguns: irradiação global horizontal e temperatura. Além dos *inputs* meteorológicos, necessita-se de alguns parâmetros essenciais, tais como: inclinação dos módulos, modelo dos módulos FV, modelo do inversor, configuração da planta fotovoltaica, características da mesa e albedo. Após a simulação, o *software* apresenta no resultado final o total de energia gerada e o total de energia que é injetada na rede de distribuição.

O design de uma planta fotovoltaica depende da sua localização, pois cada localidade recebe diferentes níveis de irradiação solar. Isso ocorre devido à posição deste local em relação ao sol. Essa diferença de posição é observada através da latitude, longitude e altitude do local.

Ângulo de inclinação é a inclinação a qual os módulos fotovoltaicos são instalados voltados ao sol. A posição do sol varia diariamente em relação à terra, então os ângulos de instalação dos módulos também variam. Usualmente o ângulo de inclinação a ser utilizado é o de mesmo valor da latitude da localidade considerada. Ademais, possui as seguintes características a serem consideradas:

- Albedo é a quantidade de reflexão que a superfície da terra causa e depende do material e da textura do chão em que será feita a planta fotovoltaica.

- *Performance ratio* (PR) é o parâmetro aplicado para avaliar a performance da planta fotovoltaica. A PR da planta é a relação entre a produção de energia da planta e a irradiação incidente na localização escolhida (YADAV; KUMAR; CHANDEL, 2015).

O *software* PVsyst considera as perdas de eficiência que ocorrem durante o processo de geração fotovoltaica. Um dos resultados do PVsyst gera um diagrama que indica as perdas computadas desde a irradiação horizontal até a energia injetada na rede (OLIVEIRA; SODRE, 2018).

4 ESTUDO DE CASO

O SFCR a ser estudado está localizado no Câmpus IFSC Florianópolis-Centro, localizado na Avenida Mauro Ramos. O sistema foi instalado em 2014, possui potência instalada de 3,060 kWp. A Figura 10 mostra sua localização.

Figura 10 – Fotografia aérea do SFCR de 3,060 kWp do Câmpus IFSC Florianópolis-Centro



Fonte: IFSC (2019).

O SFCR é composto por 12 módulos fotovoltaicos policristalinos do modelo Canadian Solar CS6P-255P / 255Wp, contendo 1 inversor Fronius Galvo 2.5-1. A Tabela 2 apresenta detalhadamente a configuração do sistema.

Tabela 2 - Configuração do SFCR

Strings	Qtd. Inversor	Inversor (kWp)	Orientação Mód.	Qtd. Mód.	Pot. (kWp)
1	1	2,5	15°	12	3,060

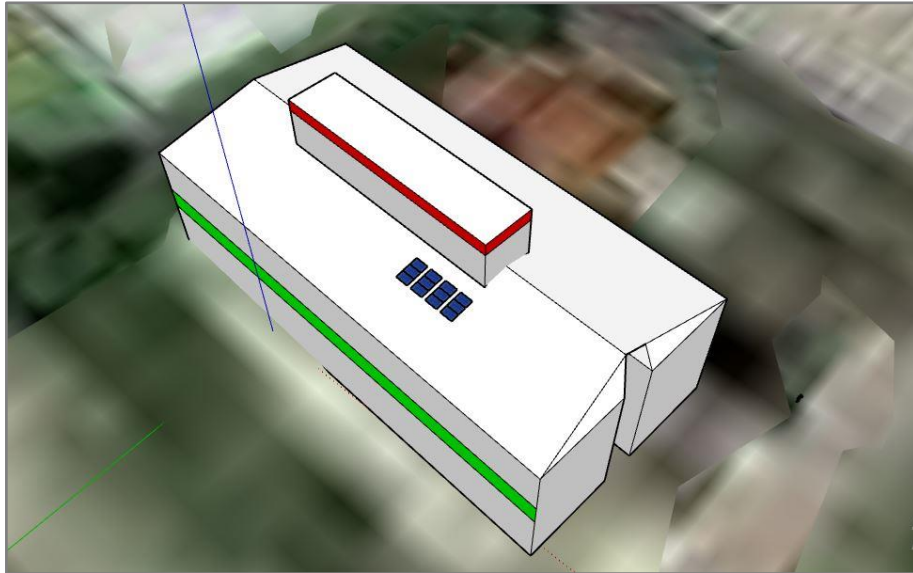
Fonte: Elaboração própria (2019).

4.1 Simulação com PVsyst

Com a modelagem tridimensional que o *software* SketchUp proporciona, foi feita a réplica do desenho da planta utilizada no estudo de caso. A reprodução digital tridimensional do local de instalação oferece com maior precisão as medidas do

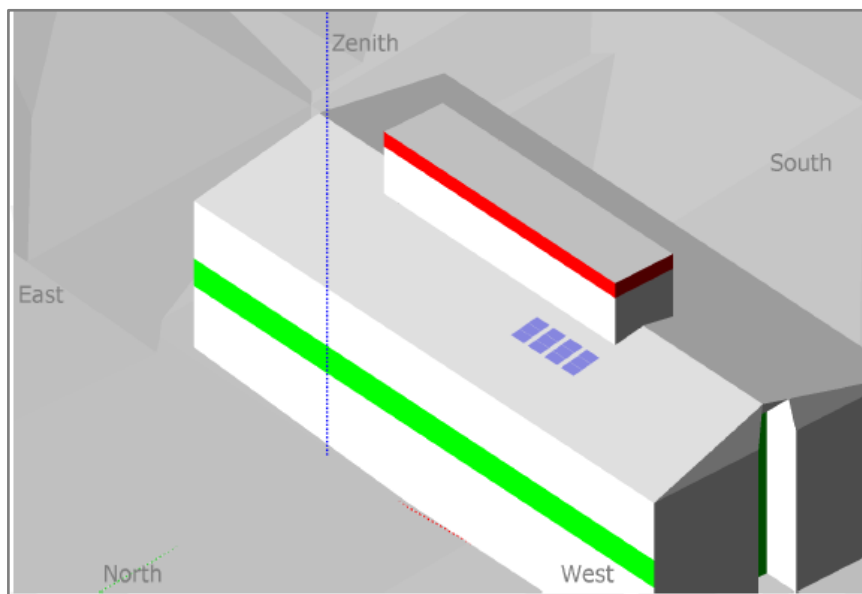
projeto, além de melhorar a visualização do projeto arquitetônico. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Figura 12 encontram-se as ilustrações digitais do prédio onde está instalado o SFCR.

Figura 11 - Modelo em 3D construído com o SketchUp



Fonte: Elaboração própria (2019).

Figura 12 – Modelo em 3D do SFCR.



Fonte: Elaboração própria (2019).

Para iniciar a simulação no PVsyst foram escolhidas as características do SFCR. Para o projeto em questão, os dados de entrada estipulados foram:

- a inclinação dos módulos: 15°

- o modelo dos módulos FV: Canadian Solar CS6P-255P
- o modelo do inversor: Fronius Galvo 2.5-1
- o arranjo: 1 string com 12 módulos FV.

Na Figura 13 encontram-se os parâmetros técnicos utilizados para simulação do sistema.

Figura 13 - Parâmetros técnicos do SFCR.

The screenshot displays the 'Grid system definition, Variant: "New simulation variant"' interface. Key sections include:

- Global System configuration:** Number of kinds of sub-arrays: 1. Simplified Schema button.
- Global system summary:**

Nb. of modules	12	Nominal PV Power	3.1 kWp
Module area	19 m ²	Maximum PV Power	3.0 kWdc
Nb. of inverters	1	Nominal AC Power	2.5 kWac
- PV Array:**
 - Sub-array name and Orientation:** Name: PV Array, Tilt: 10°, Azimuth: -4°, Orient: Fixed Tilted Plane.
 - Presizing Help:** No sizing selected. Enter planned power: 0.0 kWp, or available area(modules): 0 m².
 - Select the PV module:** Canadian Solar Inc., 255 Wp 25V, Si-poly, CS6P - 255P, Until 2016, Manufacturer 2015. Sizing voltages: Vmpp (65°C) 24.6 V, Voc (-10°C) 42.0 V.
 - Select the inverter:** Fronius International, 2.5 kW, 165 - 440 V, HF Tr, 50/60 Hz, Galvo 2.5-1, Since 2013. Output voltage 230 V Mono 50Hz. Nb. of inverters: 1. Operating Voltage: 165-440 V, Input maximum voltage: 550 V, Global Inverter's power: 2.5 kWac.
 - Design the array:**
 - Number of modules and strings: Mod. in series: 12 (between 7 and 13), Nbre strings: 1.
 - Operating conditions: Vmpp (65°C) 295 V, Vmpp (20°C) 370 V, Voc (-10°C) 505 V.
 - Plane irradiance: 1000 W/m².
 - Max. operating power at 1000 W/m² and 50°C: 2.7 kW.
 - Array nom. Power (STC): 3.1 kWp.

Fonte: Elaboração própria (2019).

Com uma ferramenta existente no *software* PVsyst é possível importar a construção tridimensional feita no SketchUp e utilizá-la na simulação, pois o *software* analisa a localização geográfica e os possíveis sombreamentos existentes que possam interferir na geração de energia elétrica do sistema.

Após importar o desenho tridimensional construído no *software* SketchUp, foi feita a simulação do SFCR no PVsyst e os resultados obtidos encontram-se nas Figuras 14, 15, 16 e 17.

Figura 14 - Principais resultados da simulação

PVSYST V6.84		09/10/19	Page 4/5
Grid-Connected System: Main results			
Project :			
Simulation variant : New simulation variant Simulation for the 1st year of operation			
Main system parameters		System type	Tables on a building
Near Shadings		Detailed electrical calculation	(acc. to module layout)
PV Field Orientation		tilt	10° azimuth -4°
PV modules		Model	CS6P - 255P Pnom 255 Wp
PV Array		Nb. of modules	12 Pnom total 3060 Wp
Inverter		Model	Galvo 2.5-1 Pnom 2500 W ac
User's needs		Unlimited load (grid)	
Main simulation results			
System Production		Produced Energy 3261 kWh/year	Specific prod. 1066 kWh/kWp/year
		Performance Ratio PR 67.66 %	

Fonte: Elaboração própria (2019).

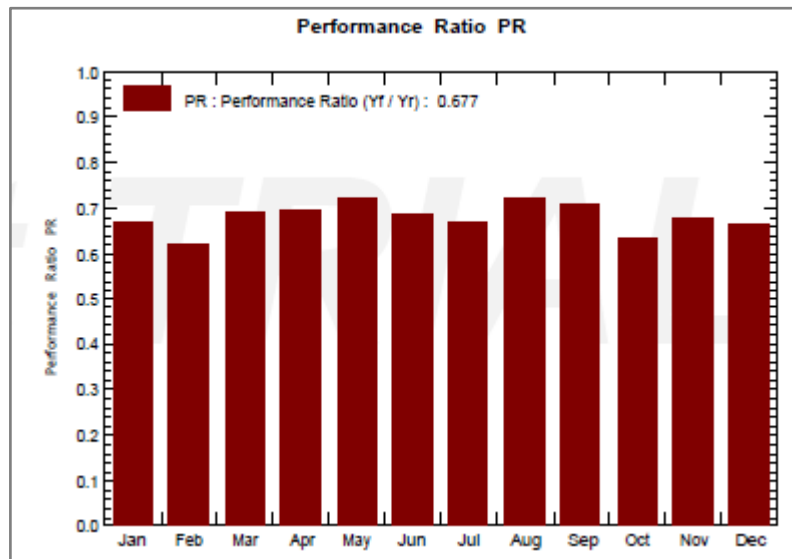
Figura 15 - Resultados dos principais parâmetros de avaliação

Balances and main results								
	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR
January	159.8	78.09	25.27	157.7	132.6	338.1	321.9	0.667
February	135.9	81.15	24.79	137.4	114.0	297.3	260.1	0.619
March	136.2	70.01	24.35	141.8	120.1	312.8	298.1	0.687
April	112.7	58.57	21.41	122.1	102.3	272.6	260.0	0.696
May	98.5	47.62	18.26	112.0	94.6	258.2	246.3	0.719
June	81.6	38.15	16.50	94.4	80.8	223.2	197.3	0.683
July	86.4	43.83	15.22	98.1	83.4	231.7	201.7	0.672
August	105.0	54.75	16.72	116.3	97.4	267.6	255.3	0.717
September	109.4	57.43	18.07	115.3	97.4	262.6	250.1	0.709
October	145.8	78.61	21.06	149.1	124.8	331.4	290.2	0.636
November	166.1	86.91	22.44	165.3	138.2	360.5	343.9	0.680
December	168.5	92.79	24.50	165.5	136.5	352.4	335.8	0.663
Year	1506.0	787.91	20.70	1575.1	1322.0	3508.4	3260.9	0.677

Legends:	GlobHor	Horizontal global irradiation	GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings
	DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
	T_Amb	T amb.	E_Grid	Energy injected into grid
	GlobInc	Global incident in coll. plane	PR	Performance Ratio

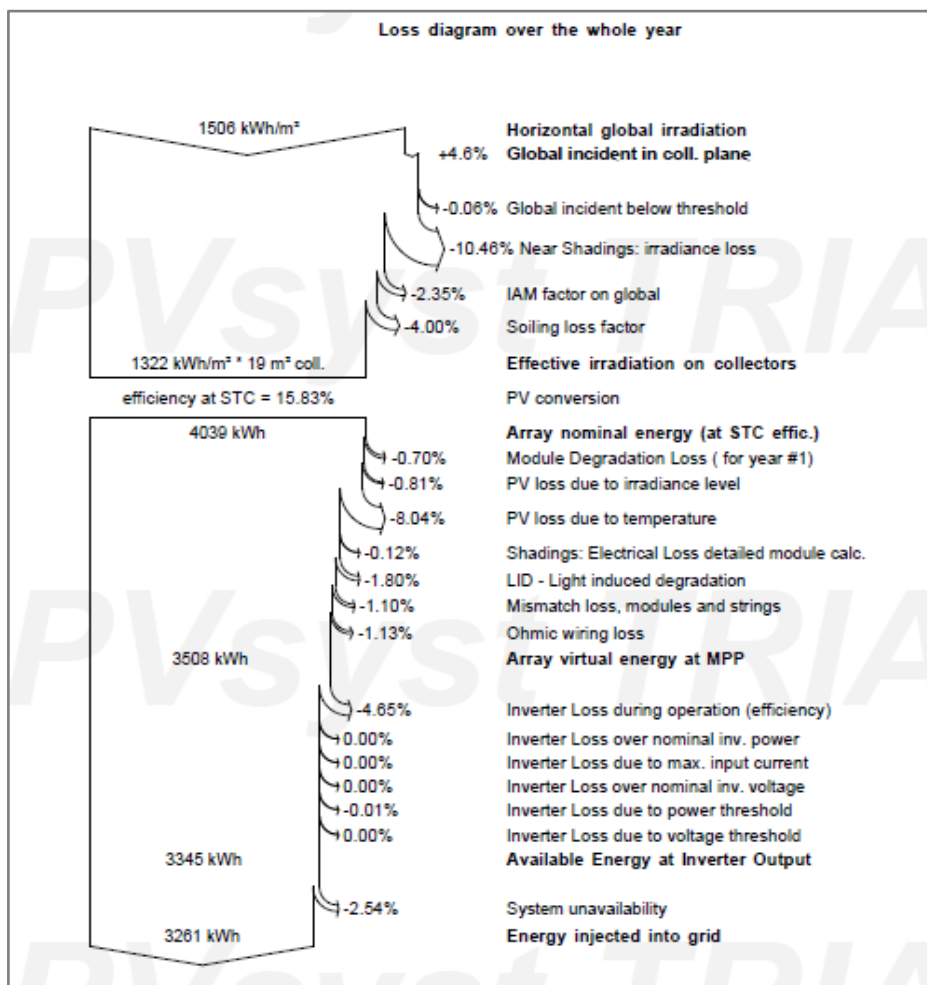
Fonte: Elaboração própria (2019).

Figura 16 - Performance Ratio do SFCR.



Fonte: Elaboração própria (2019).

Figura 17 - Diagrama de perdas do SFCR.



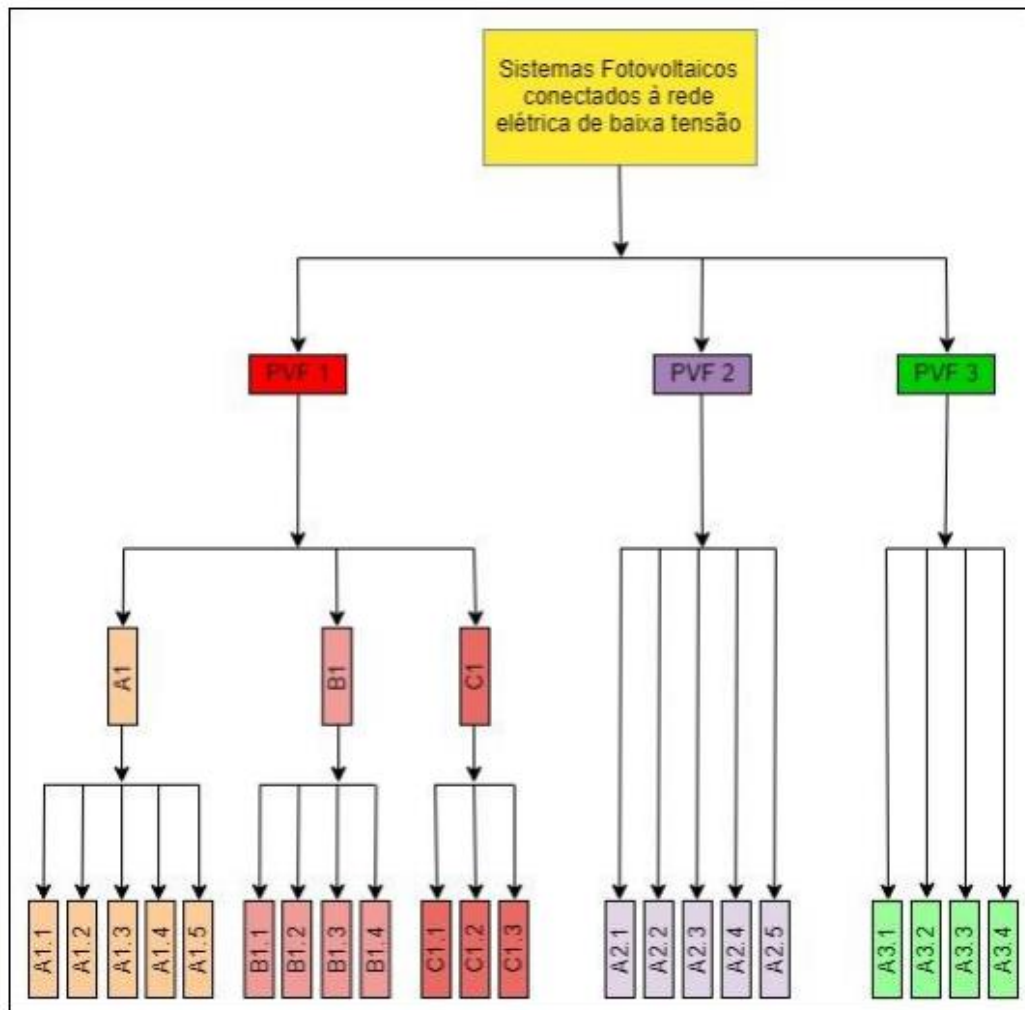
Fonte: Elaboração própria (2019).

4.2 Modelo Multicriterial de Avaliação de Desempenho

O modelo a ser implementado foi elaborado e proposto por Camila Novak no ano de 2018 e utiliza dois métodos da ADMC, a MAUT e o AHP. Na Figura 18 encontra-se a estrutura arborescente do modelo, onde é possível encontrar os Pontos de Vistas Fundamentais, Pontos de Vista Elementares e seus Descritores.

Segundo Nascimento e Sica (2019), os descritores são associados aos atributos e são classificados em três aspectos: qualitativos ou quantitativos; discretos ou contínuos; e diretos, indiretos ou construídos. Um descritor pode ser definido como qualitativo quando faz uso de expressões semânticas. Quando o descritor for formado por um número finito de níveis, é definido como discreto. Se for definido por uma função matemática contínua, o descritor é definido contínuo. O descritor direto é aquele capaz de associar naturalmente um atributo, já o descritor indireto não descreve diretamente, no entanto permite torná-lo operacional. Por fim, o descritor construído é alcançado através de expressões semânticas e para descrevê-lo utiliza-se de elementos vigorosamente conectados.

Figura 18 - Árvore de critérios e subcritérios.



Fonte: Novak (2018).

O modelo multicriterial em questão está dividido em 3 pontos de vista fundamentais, sendo eles: técnico; econômico-financeiro; e socioambiental. Na Tabela 3 e Tabela 4 encontram-se todas as informações dos critérios.

Tabela 3 – Conceito e definição da escala ordinal

Código	Critério	Conceito	Escala Ordinal	Unidade	Classificação
A1.1	Energia elétrica produzida	Quantidade de energia elétrica relativa			
		produzida em um intervalo de tempo.	A ⁺ 95	Adimensional	Quantitativo
		Nele, o melhor valor aceitável é 95 e o pior aceitável 0.	A ⁻ 0		Contínuo
		Direto			

A1.2	Fator de capacidade	Razão entre a produção efetiva de energia e o que seria produzido se ela produzisse na sua capacidade nominal Neste, o melhor valor é N1 e o pior N5.	N1 > 28,3 N2 [28,3;17,5[N3 [17,5;13,8[N4 [13,8;10,1[N5 < 10,1	%	Quantitativo Discreto Direto
A1.3	Fator de dimensionamento do inversor	Razão entre a potência nominal do inversor e a potência pico do SFCR. Neste critério, o melhor valor aceitável é N1 e o pior valor aceitável é N4.	N1 [0,6;0,85[N2 [0,85;0,95[N3 [0,95;1,00[N4 [1,00;1,05]	Adimensional	Quantitativo Discreto Direto
A1.4	Capacidade de armazenamento	Capacidade do banco de baterias (em horas) em atender a carga nominal durante um determinado período de tempo. Neste critério, o melhor valor aceitável é N1 e o pior valor aceitável é N5.	N1 > 10 N2 [10; 7,5[N3 [7,5;5[N4 [5;2,5] N5 < 2,5	Horas	Quantitativo Discreto Direto
A1.5	Capacidade de modularidade	Define a capacidade de incremento de potência de geração com relação à sua potência nominal instalada (kW) pela adição de unidades geradoras modulares. Nele, o melhor valor aceitável é 100 e o pior aceitável 0.	A* 100 A+ 0	%kW	Quantitativo Contínuo Construído
B1.1	Variabilidade da fonte primária	A possibilidade de obtenção da energia no momento desejado, traduzindo a possibilidade de atendimento da demanda. Neste critério, o melhor valor aceitável é 0 e o pior aceitável 1.	A* 0 A+ 1	Adimensional	Quantitativo Contínuo Construído

B1.2	Potencial energético	Montante estimado de geração para cada fonte energética.	N1	> 22	MJ/m ² /dia	Quantitativo
		Neste critério, o melhor valor aceitável é N1 e o pior valor aceitável é N6.	N2	[22; 20[
			N3	[20;18[Discreto
			N4	[18;16[Direto
			N5	[16;14]		
			N6	< 14		
B1.3	Retorno Energético do Investimento - EROI	Define a razão entre quanta energia deve ser gerada por um sistema de geração de energia elétrica e a quantidade de energia necessária para criar e implementar este sistema.	A*	35	Adimensional	Quantitativo
		Neste critério, o melhor valor aceitável é 35 e o pior valor aceitável é 3.	A*	3		
						Contínuo
						Direto
B1.4	Performance Ratio	Define o rendimento do sistema em relação a um sistema teórico ideal e sem perdas, com base na razão entre a produtividade final (YF) e a produtividade de referência (YR).	N1	> 90	%	Quantitativo
		Neste critério, o melhor valor aceitável é N1 e o pior valor aceitável é N5.	N2	[90; 85[
			N3	[85;80[Discreto
			N4	[80;75]		Direto
			N5	< 75		
C1.1	Taxa de distorção harmônica de tensão - THDv	Caracteriza a deformação da corrente na presença de harmônicas	N1	< 1,5	%	Quantitativo
		Neste critério, o melhor valor aceitável é N1 e o pior valor aceitável é N5.	N2	[1,5; 2,5[
			N3	[2,5;5,0[Contínuo
			N4	[5,0;8,0]		Direto
			N5	> 8,0		
C1.2	Taxa de distorção harmônica de corrente - THDi	Caracteriza a deformação da tensão na presença de harmônicas.	A*	0,5	%	Quantitativo
		Neste critério, o melhor valor aceitável é 0,5 e o pior valor aceitável é 4.	A*	4		
						Discreto
						Direto
C1.3	Fator de potência com harmônicos	É o quociente entre a potência ativa média P em W e a potência aparente S em VA.	A*	1,00	Adimensional	Quantitativo
		Neste critério, o melhor valor aceitável é 1,00 e o pior valor aceitável é 0,92.	A*	0,92		
						Contínuo
						Direto

A2.1	Periodicidade e de manutenção	Tempos sugeridos pelos fabricantes, ou definidos pelo conhecimento adquirido em sistemas similares, para manutenções preventivas.	N1	Bienal	Adimensional	Qualitativo Discreto Direto
			N2	Anual		
			N3	Semestral		
			N4	Mensal		
			N5	Semanal		
			N6	Diária		
A2.2	Facilidade de manutenção	Define a quão facilitada ou complicada é a manutenção do SFCR. Neste critério, o melhor valor aceitável é N1 e o pior valor aceitável é N5.	N1	Fácil/Disponível	Adimensional	Qualitativo Discreto Construído
			N2	Complexidade/média/Acessível		
			N3	Muito complexa/Acessível		
			N4	Muito complexa/Pouco acessível		
			N5	Muito complexa/Indisponível		
A2.3	Custos de energia economizada	O custo da energia economizada permite comparar economicamente os investimentos em eficiência energética e em produção de energia.			R\$/(kWh/ano)	Quantitativo
A2.4	Custo nivelado de energia	Analisa, em valor presente, os custos globais de um sistema (investimento, operação e manutenção) e o montante de energia (medido em quilowatts hora – kWh) que ele gera ao longo de sua vida útil. Neste critério, o melhor valor aceitável é N1 e o pior valor aceitável é N5.	N1	< 402,00	R\$/MWp	Quantitativo Discreto Direto
			N2	[402,00;463,00[
			N3	[463,00; 541,00[
			N4	[541,00; 602,00[
			N5	> 602,00		
A2.5	Payback energético	O período de tempo (em anos) necessário para "pagar" a soma do investimento original em SFCR. Neste critério, o melhor valor aceitável é N1 e o pior valor aceitável é N5.	N1	< 4,1	Anos	Quantitativo Discreto Direto
			N2	[4,1;6,3[
			N3	[6,3; 8,5[
			N4	[8,5;10,6[
			N5	> 10,6		

A3.1	Payback time de carbono	Calcula quanto tempo o sistema deve que funcionar para compensar o CO2 por ele emitido durante a sua fabricação, implantação, manutenção e uso.	A ⁺ < 4 A ⁻ > 60	Anos	Quantitativo Contínuo Direto
		Neste critério, o melhor valor aceitável é < 4 e o pior valor aceitável é > 60.			
A3.2	Uso da terra (área requerida)	Define a área requerida para a implantação da planta fotovoltaica em análise.	N1 < 22,51 N2 [22,51;27,33[N3 [27,33;29,46[N4 [29,46;37,04] N5 > 37,04	m ² /kW	Quantitativo Discreto Direto
		Neste critério, o melhor valor aceitável é N1 e o pior valor aceitável é N5.			
A3.3	Poluição sonora	Definido como qualquer alteração no som ambiente, que possa prejudicar as atividades humanas.	A ⁺ 0 A ⁻ 70	dB	Quantitativo Contínuo Direto
		Neste critério, o melhor valor aceitável é 0 e o pior valor aceitável é 70.			
A3.4	Poluição visual	Define qualquer alteração na paisagem, em virtude do incremento de elementos visuais.	N1 Agrega valor à paisagem N2 Sem interferência N3 Desconforto visual N4 Anteparo para outros planos	Adimensional	Qualitativo Discreto Construído
		Neste critério, o melhor valor aceitável é N1 e o pior valor aceitável é N4.			

Fonte: Adaptado de Novak (2018).

Tabela 4 – Conceito e definição da escala cardinal.

Código	Critério	Definição	Equacionamento
A1.1	Energia elétrica produzida	Arbitrado como comportamento propenso e considerado crescente.	$v_{1.1}(i) = \frac{e^{2(\frac{a_i-0}{95-0})} - 1}{e^2 - 1}$
A1.2	Fator de capacidade	Arbitrado como comportamento propenso e considerado crescente.	Tomado através do método AHP e equivalente ao polinômio $v(.) = 0,0747x^2 - 0,6904x + 1,5993$
A1.3	Fator de dimensionamento do inversor	Arbitrado como comportamento propenso e considerado crescente.	Tomado por meio do método AHP, e equivalente ao polinômio $v(.) = 0,1168x^2 - 0,9125x + 1,7887$

A1.4	Capacidade de armazenamento	Arbitrado como comportamento propenso e considerado crescente.	Tomado através do método AHP e definido pelo polinômio $v(.) = 0,0626x^2 - 0,6279x + 1,5722$
A1.5	Capacidade de modularidade	Arbitrado como comportamento propenso e considerado crescente.	$v_{1.5}(i) = \frac{e^{2(\frac{a_i-0}{100-0})} - 1}{e^2 - 1}$
B1.1	Variabilidade da fonte primária	Arbitrado como comportamento avesso e considerado crescente.	$v_{1.1}(i) = \frac{e^{-2(\frac{a_i-0}{1-0})} - 1}{e^{-2} - 1}$
B1.2	Potencial energético	Arbitrado como comportamento propenso e considerado crescente.	Tomado através do método AHP e definido pelo polinômio $v(.) = 0,0451x^2 - 0,5038x + 1,4184$
B1.3	Retorno Energético do Investimento - EROI	Arbitrado como comportamento propenso e considerado crescente.	$v_{1.3}(i) = \frac{e^{2(\frac{a_i-3}{35-3})} - 1}{e^2 - 1}$
B1.4	Performance Ratio	Arbitrado como comportamento propenso e considerado crescente.	Tomado através do método AHP e definido pelo polinômio $v(.) = -0,0162x^3 + 0,21852x^2 - 1,0572x + 1,8556$
C1.1	Taxa de distorção harmônica de tensão - THDv	Arbitrado como comportamento avesso e considerado decrescente.	Tomado através do método AHP e definido pelo polinômio $v(.) = -0,012x^3 + 0,1742x^3 - 0,9231x + 1,7616$
C1.2	Taxa de distorção harmônica de corrente - THDi	Arbitrado como comportamento avesso e considerado decrescente.	$v_{1.2}(i) = \frac{e^{-2(\frac{\max(a_i) - a_i}{0,5-4})} - 1}{e^{-2} - 1}$
C1.3	Fator de potência - com harmônicos	Arbitrado como comportamento propenso e considerado crescente.	
A2.1	Periodicidade de manutenção	Arbitrado como comportamento avesso e considerado decrescente.	Tomado através do método AHP e definido pelo polinômio $v(.) = 0,0486x^2 - 0,527x + 1,4362$
A2.2	Facilidade de manutenção	Arbitrado como comportamento avesso e considerado crescente.	Tomado através do método AHP e definido pelo polinômio $v(.) = -0,0068x^3 + 0,1299x^2 - 0,8178x + 1,696$
A2.3	Custos de energia economizada	Arbitrado como comportamento propenso e considerado decrescente.	$v_{2.3}(i) = \frac{e^{-2(\frac{\max(a_i) - a_i}{0,5-4})} - 1}{e^{-2} - 1}$
A2.4	Custo nivelado de energia	Arbitrado como comportamento propenso e considerado decrescente.	Tomado através do método AHP e definido pelo polinômio $v(.) = -0,0117x^3 + 0,1753x^3 - 0,9377x + 1,7764$
A2.5	Payback energético	Arbitrado como comportamento propenso e considerado decrescente.	Tomado através do método AHP e definido pelo polinômio

			$v(.) = -0,0134x^3 + 0,1954x^2 - 1,0067x + 1,8244$
A3.1	Payback time de carbono	Arbitrado como comportamento avesso e considerado decrescente.	$v_{3.1}(i) = \frac{e^{-2(\frac{\max(a_i) - 4}{4 - 60})} - 1}{e^{-2} - 1}$
A3.2	Uso da terra (área requerida)	Arbitrado como comportamento propenso e considerado crescente.	Tomado através do método AHP e definido pelo polinômio $v(.) = -0,007x^3 + 0,1311x^2 - 0,8204x + 1,6932$
A3.3	Poluição sonora	Arbitrado como comportamento avesso e considerado decrescente.	$v_{3.3}(i) = \frac{e^{-2(\frac{\max(a_i) - 0}{0 - 70})} - 1}{e^{-2} - 1}$
A3.4	Poluição visual	Arbitrado como comportamento avesso e considerado decrescente.	Tomado através do método AHP e definido pelo polinômio $v(.) = 0,0193x^3 - 0,0556x^2 - 0,4602x + 1,4965$

Fonte: Adaptado de Novak (2018).

4.3 Implementação do Modelo Multicriterial

Para analisar a fidelidade do modelo multicriterial foram utilizadas como alternativas a simulação da planta fotovoltaica do IFSC-Câmpus Florianópolis no *software* PVsyst, o próprio SFCR instalado no IFSC-Câmpus Florianópolis, e outra simulação de um SFCR na cidade de Blumenau/SC.

As características da simulação do *software* PVsyst do SFCR instalado em uma residência na cidade de Blumenau encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Características da simulação do SFCR instalado em Blumenau.

Mód. FV.	Inversor	Pot.	Geração anual	Irrad. Méd.
325 Wp	3,0 kW	3,9 kWp	4.437,7 kWh	1.499,4 kWh/m ²

Fonte: Elaboração própria (2019).

Os dados de geração do SFCR instalado no Bloco Central do Câmpus IFSC-Florianópolis foram obtidos junto ao Laboratório de Planejamento Integrado de Recursos Energéticos, ao decorrer do ano de 2019, e foram utilizados para calcular os índices de desempenho apresentados no modelo.

Alguns critérios do modelo multicriterial possuem equações, as quais encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Equações dos critérios.

Código	Critério	Equacionamento
A1.2	Fator de capacidade	$FC = \frac{E_{gerada} \text{ (com perdas)}}{E_{nominal}}$
A1.3	Fator de dimensionamento do inversor	$FDI = \frac{P_{INV}}{P_{FV}},$ <p>em que P_{INV} é a potência nominal do inversor e P_{FV} é a potência nominal do SFCR.</p>
B1.1	Variabilidade da fonte primária	$V_{anual} = \frac{V_{d,a}}{N_d} = \frac{\sum_{d=1}^{365} \left[\frac{DQM_d}{HSP_d} \right]}{N_d}$ <p>em que</p> $DQM_d = \sqrt{\frac{\sum_{a=1}^{10} (HSP_{d,a} - \overline{HSP}_{d,a})^2}{N_a}}$ <p>é o desvio quadrático médio para o dia d do ano, N_d é o número de dias com dados válidos, N_a é o número de anos com dados válidos, $HSP_{d,a}$ representa o total diário de horas de sol pleno para o dia d no ano a e é o valor médio de $HSP_{d,a}$ no período considerado. $\overline{HSP}_{d,a}$ é o valor médio de $HSP_{d,a}$ no dia considerado.</p>
B1.2	Potencial energético	$P = \frac{A \cdot 0,001 \cdot \eta \cdot R \cdot 365 \cdot 0,27777 \cdot 1000}{8760}$ <p>Em que</p> <p>A: área de estudo, em km²; η: eficiência energética e operacional; R: radiação solar diária, em MJ/m²/dia.</p>
B1.3	Retorno Energético do Investimento - EROI	$EROI = \frac{LT}{EPBT}$ $EPBT = \frac{w_1}{I \cdot \eta \cdot \varepsilon}$ <p>Em que LT é a vida útil do sistema em anos, $EPBT$ é o tempo de recuperação de energia do sistema, w_1 é a energia investida primária, ε é o fator de conversão de energia elétrica para primária, I é a insolação total incidente nos módulos, η é a eficiência dos módulos e PR é a performance ratio do sistema.</p>

B1.4	Performance Ratio	$PR = \frac{E_G / \left(\frac{G_{POA}}{Irr_{STC}} \right)}{P_{FV}}$ <p>Em que E_G é a energia gerada em um intervalo de tempo, G_{POA} é a irradiação solar no plano dos módulos no mesmo intervalo de tempo, Irr_{STC} é a irradiância solar nas STC (1 kWh/m²) e P_{FV} é a potência nominal do SFCR.</p>
C1.3	Fator de potência – com harmônicos	$fp = \frac{P}{S}$ <p>Em que P é a potência ativa e S a potência aparente.</p>
A2.3	Custos de energia economizada	$CCEE = \frac{CCVA}{EE}$ <p>Em que EE é a energia gerada anualmente e $CCVA$ é o custo do ciclo de vida anualizado (R\$).</p> $CCVA = \frac{CCV}{X \cdot P_A}$ <p>Em que CCV é o custo do ciclo de vida, X é o fator descapitalização e P_A é o fator de amortização.</p>
A2.4	Custo nivelado de energia	$LCOE = \frac{It + OM}{Et}$ $It = \frac{Inv}{\frac{1}{r} - \frac{1}{2(1+r)^n}}$ <p>Em que r é a taxa de desconto anual considerada para o investimento, n é o tempo de vida útil do sistema, OM são gastos com operação e manutenção (10% ao ano), Et é a energia gerada total durante a vida útil do SFCR, Inv é o investimento inicial do sistema (R\$), (NISA, 2014).</p>
A2.5	Payback energético	$P_{Ayback} = \frac{Investimento}{Eg \times Valor \ da \ tarifa}$ <p>Em que Eg é a energia gerada em (kWh/mês)</p>
A3.1	Payback time de carbono	$PBT_{CO2} = \frac{Emiss\tilde{a}o \ total}{Emiss\tilde{a}o \ evitada} \ (anos)$

Fonte: Adaptado de Novak (2018).

Os resultados da implementação do modelo, aplicado às três alternativas em análise, encontram-se nas Tabelas 7, 8, 9, 10 e 11.

Tabela 7 - Desempenho dos SFCRs nos critérios de código A1.1, 1.2, 1.3, 1.4 e 1.5.

Classificação	Quantitativo	Quantitativo	Quantitativo	Quantitativo	Quantitativo
	Propenso	Propenso	Propenso	Propenso	Propenso
	Crescente	Crescente	Crescente	Crescente	Crescente
Critérios	Energia Elétrica produzida	Fator de capacidade	FDI	Capacidade de armazenamento	Capacidade de modularidade
PVsys	81	12,2	0,82	3	100
IFSC	92	13,8	0,82	3	100
SFCR 1	82	13,0	0,77	4	100

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 8 - Desempenho dos SFCRs nos critérios de código B1.1, 1.2, 1.3, 1.4 e C1.1.

Classificação	Quantitativo	Quantitativo	Quantitativo	Quantitativo	Quantitativo
	Averso	Propenso	Propenso	Propenso	Averso
	Crescente	Crescente	Crescente	Crescente	Decrescente
Critérios	Variabilidade da fonte primária	Potencial energético	Retorno Energético do Investimento - EROI	Performance Ratio	Taxa de distorção harmônica de tensão - THDv
PVsys	0,78	11	11	68	4
IFSC	0,93	11	11	74	4
SFCR 1	0,84	9	13	76	3,5

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 9 - Desempenho dos SFCRs nos critérios de código C1.2, 1.3, A2.1, A2.2

Classificação	Quantitativo	Quantitativo	Qualitativo	Qualitativo
	Averso	Propenso	Averso	Propenso
	Decrescente	Crescente	Decrescente	Crescente
Critérios	Taxa de distorção harmônica de corrente - THDi	Fator de potência - com harmônicos	Periodicidade de manutenção	Facilidade de manutenção
PVsys	4	0,95	Bienal	Complexidade/média/Acessível
IFSC	4	0,95	Bienal	Complexidade/média/Acessível
SFCR 1	3,5	0,99	Semestral	Fácil/Disponível

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 10 - Desempenho dos SFCRs nos critérios de código A2.3, 2.4, 2.5 e A3.1.

Classificação	Quantitativo	Quantitativo	Quantitativo	Quantitativo
	Averso	Propenso	Propenso	Averso
	Decrescente	Decrescente	Decrescente	Decrescente
Crêterios	Custos de energia economizada	Custo nivelado de energia	Payback energético	Payback time de carbono
PVsys	1828,8	687,9	2,7	2,0
IFSC	1828,8	608,5	2,4	2,0
SFCR 1	1435,4	483,0	1,7	3,0

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 11 - Desempenho dos SFCRs nos cr terios de código A3.2, 3.3 e 3.4.

Classificação	Quantitativo	Quantitativo	Qualitativo
	Propenso	Averso	Averso
	Crescente	Decrescente	Decrescente
Crêterios	Uso da terra (�rea requerida)	Poluição sonora	Poluição visual
PVsys	19,3	59	Sem interferência
IFSC	19,3	59	Sem interferência
SFCR 1	23,7	50	Sem interferência

Fonte: Elaboração própria (2019).

Em posse das expressões que definem os cr terios e que estão apresentadas na Tabela 6, as alternativas de análise do cr terio Energia Elétrica (EE) produzida, código A1.1, têm o desempenho apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Desempenho das alternativas no cr terio A1.1.

Energia elétrica produzida [%]	PVsys	IFSC	SFCR 1
Geração anual [kWh]	3260,9	3707,2	4437,7
Geração anual nominal [kWh]	4039	4039	5381
EE	81	92	82

Fonte: Elaboração própria (2019).

Conforme a Tabela 12, verifica-se que a alternativa IFSC tem um desempenho 9% maior que a alternativa SFCR 1 e 10% maior que a alternativa PVsys.

Para o cr terio Fator de Capacidade, as alternativas de análise têm desempenho conforme a Tabela 13.

Tabela 13 - Desempenho das alternativas no critério A1.2.

Fator de Capacidade [Adimensional]	PVsyst	IFSC	SFCR 1
Geração anual [kWh]	3260,9	3707,2	4437,7
Pot. nominal [kWp]	3,06	3,06	3,9
FC	12,2	13,8	13,0

Fonte: Elaboração própria (2019).

Desta forma, como a Tabela 13 indica, a alternativa IFSC obteve o melhor desempenho em relação às outras alternativas, sendo 4% melhor que a alternativa SFCR 1 e 10% melhor que a alternativa PVsyst.

Para o critério Fator de Dimensionamento do Inversor, as alternativas de análise têm desempenho apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 - Desempenho das alternativas no critério A1.3.

FDI [Adimensional]	PVsyst	IFSC	SFCR 1
Potência nominal [kWp]	3,06	3,06	3,9
Potência do Inversor [kW]	2,5	2,5	3
FDI	0,82	0,82	0,77

Fonte: Elaboração própria (2019).

Assim, conforme exposto na Tabela 14, a alternativa em que obteve melhor desempenho é o SFCR 1.

Para o critério Variabilidade da fonte primária, os SFCRs em análise tiveram desempenho conforme Tabela 15.

Tabela 15 – Desempenho das alternativas no critério B1.1.

Variabilidade da fonte primária [Adimensional]	PVsyst	IFSC	SFCR 1
Média de HSP/mês [horas]	4,63	4,55	4,31
HSP/ano [horas]	1689,95	1660,9	1572,6
Σ DQMd	4,98	5,80	5,12
Vannual	0,93	0,78	0,84

Fonte: Elaboração própria (2019).

Assim, como exposto na Tabela 15, a alternativa que obteve o melhor desempenho foi IFSC.

Para o critério Potencial energético, as alternativas desta pesquisa tiveram desempenho conforme Tabela 16.

Tabela 16 - Desempenho das alternativas no critério B1.2.

Potencial Energético [MJ/m ² /dia]	PVsyst	IFSC	SFCR 1
Área de estudo [km]	675,4	675,4	519,8
Eficiência energética e operacional [Adimensional]	0,9	0,9	0,9
Radiação solar diária [MJ/m ² /dia]	16	16	16
Potencial Energético	11	11	9

Fonte: Elaboração própria.

Conforme exposto na Tabela 16, as alternativas PVsyst e IFSC empataram como melhores alternativas neste critério, sendo 18% melhor que a alternativa SFCR 1.

Para obter o desempenho das alternativas no critério Retorno energético sobre energia investida, código B1.3, foi considerado como energia primária investida o valor médio de 3.914 MJ.m⁻² e fator de conversão de energia elétrica para primária de 0,35 (MHR, 2018). Os desempenhos encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Desempenho das alternativas no critério B1.3.

Retorno energético sobre energia investida [Adimensional]	PVsyst	IFSC	SFCR 1
Energia primária investida [MJ.m ⁻²]	3.914	3.914	3.914
Performance Ratio [%]	0,68	0,68	0,76
Fator de conversão de energia elétrica para primária	0,35	0,35	0,35
Eficiência do módulo FV. [%]	0,159	0,159	0,167
Insolação total incidente nos módulos FV. [MJ.m ⁻² /ano]	5669,97	5873,00	5397,47
EROI	11,2	11,6	12,5

Fonte: Elaboração própria (2019).

Desta forma, conforme exposto na Tabela 17, a alternativa que obteve o melhor desempenho foi o SFCR 1.

Para o critério *Performance Ratio* (PR), considerado um dos parâmetros mais importantes na análise de desempenho de SFCR, as alternativas tiveram desempenho mostrado na tabela.

Tabela 18 - Desempenho das alternativas no critério *Performance Ratio*.

Performance Ratio [%]	PVsyst	IFSC	SFCR 1
Irradiação global	1575,1	1631,6	1499,4
Geração anual [kWh]	3260,9	3707,2	4437,7
Pot. nominal [kWp]	3,06	3,06	3,9
PR	68	74	76

Fonte: Elaboração própria (2019).

Conforme exposto na Tabela 18, a alternativa que obteve o melhor desempenho foi o SFCR 1, sendo 4% melhor que a alternativa IFSC.

O critério Custo de Energia Economizada (CEE), para calcular o Custo do ciclo de vida foi considerado como investimento inicial os valores de R\$18.360,00 para as alternativas PVsyst e IFSC, e R\$15.600,00 para a alternativa SFCR1. Para os custos de operação e manutenção foram considerados 10% do investimento inicial. Os SFCRs em análise tiveram os seguintes desempenhos, como mostra a Tabela 19.

Tabela 19 - Desempenho das alternativas no critério Custo de Energia economizada.

Custo de Energia Economizada [R\$/kWh]	PVsyst	IFSC	SFCR 1
Fator de amortização [adimensional]	15,7	15,7	15,7
Fator de descapitalização [adimensional]	0,95	0,95	0,95
Taxa de desconto anual [%a.a]	0,1	0,1	0,1
Custo do Ciclo de Vida [R\$]	27277,05	27277,05	21410,07
CEE	1828,8	1828,8	1435,5

Fonte: Elaboração própria (2019).

Para obter o desempenho do critério Custo nivelado de energia, que utilizou a equação mostrada na Tabela 6, foi calculada a geração de energia total nos 25 anos de vida útil do sistema com algumas ressalvas. Para os anos de 1 a 5, a energia gerada é a nominal com perdas. Para os anos de 6 a 10, considera-se uma perda da capacidade de 2%a.a. Para os anos de 10 a 25, considerou-se uma perda de capacidade de 5%a.a. Desta forma, os desempenhos obtidos encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Desempenho das alternativas no critério Custo nivelado de energia.

Custo Nivelado de Energia [R\$/kWh]	PVsyst	IFSC	SFCR 1
Investimento [R\$]	18.360	18.360	15.600
Taxa de desconto anual [%a.a]	10%	10%	10%
Vida útil [anos]	25	25	25
Custo com O.M na vida útil [R\$]	45.900	45.900	39.000
LCOE	687,9	608,5	483,0

Fonte: Elaboração própria (2019).

O desempenho das alternativas no *Payback* energético, critério que representa o tempo em anos necessários para recuperar o investimento inicial, encontra-se na Tabela 21. Foi estipulado como valor de tarifa de energia, 0,47R\$/kWh.

Tabela 21 - Desempenho das alternativas no critério *Payback* Energético.

Payback Energético [anos]	PVsyst	IFSC	SFCR 1
Investimento [R\$]	18.360	18.360	15.600
Geração anual [kWh]	3260,9	3707,2	4437,7
Tarifa [R\$/kWh]	0,47	0,47	0,47
Payback	2,7	2,4	1,7

Fonte: Elaboração própria (2019).

Conforme exposto na Tabela 21, a alternativa que apresentou o melhor *Payback* energético foi a alternativa SFCR 1.

O critério *Payback time* de Carbono, o qual calcula quanto tempo o sistema esteve em funcionamento para compensar a emissão de CO₂ por toda sua vida útil, foi calculado utilizando a equação demonstrada na Tabela 6. O desempenho das alternativas encontra-se na Tabela 22.

Tabela 22 - Desempenho das alternativas no critério *Payback time* de carbono.

<i>Payback time</i> de Carbono [anos]	PVsyst	IFSC	SFCR 1
Emissão evitada	1703,49	1802,04	2318,25
Emissão total	3730,47	3946,28	5076,73
PB CO₂	2	2	2

Fonte: Elaboração própria (2019).

Conforme visto na Tabela 22, as alternativas tiveram o mesmo desempenho neste critério.

No critério Uso da área requerida, que define a área requerida para implantação do sistema fotovoltaico em análise, as alternativas propostas tiveram o desempenho conforme a Tabela 23.

Tabela 23 - Desempenho das alternativas no critério Uso da área requerida.

Uso da Terra [m²/kW]	PVsyst	IFSC	SFCR 1
Pot. nominal [kWp]	3,06	3,06	3,9
Pot. Módulo [Wp]	255	255	325
Área do módulo FV. [m²]	1,61	1,61	1,98
Área requerida	19,3	19,3	23,7

Fonte: Elaboração própria (2019).

Para obter a matriz de comportamento econômico, que evidencia o desempenho das alternativas em cada um dos critérios, que utilizaram as equações 5, 6 e 7, estão apresentadas nas Tabelas 24, 25, 26, 27, 28.

Tabela 24 - Matriz de comportamento econômico dos critérios A1.1, 1.2, 1.3 e 1.4.

Critérios	Alternativas	Energia Elétrica produzida	Fator de capacidade	FDI	Capacidade de armazenamento
V(i)	PVsyst	0,70	0,06	1,00	0,06
	IFSC	0,93	0,20	1,00	0,06
	SFCR 1	0,72	0,06	1,00	0,06

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 25 - Matriz de comportamento econômico dos critérios A1.5, B1.1, B1.2 e B1.3.

Critérios	Alternativas	Capacidade de modularidade	Variabilidade da fonte primária	Potencial energético	Retorno Energético do Investimento - EROI
V(i)	PVsyst	0,00	0,41	0,00	0,10
	IFSC	0,00	0,15	0,00	0,11
	SFCR 1	0,00	0,32	0,00	0,13

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 26 - Matriz de comportamento econômico dos critérios B1.4, C1.1, C1.2 e C1.3.

Critérios	Alternativas	Performance Ratio	Taxa de distorção harmônica de tensão - THDv	Taxa de distorção harmônica de corrente - THDi	Fator de potência - com harmônicos
V(i)	PVsyst	0,00	0,23	0,00	0,17
	IFSC	0,00	0,23	0,00	0,17
	SFCR 1	0,08	0,23	0,29	0,74

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 27 - Matriz de comportamento econômico dos critérios A2.1, A2.2, A2.3 e A2.4.

Critérios	Alternativas	Periodicidade de manutenção	Facilidade de manutenção	Custos de energia economizada	Custo nivelado de energia
V(i)	PVsyst	1,00	0,53	0,57	0,00
	IFSC	1,00	0,53	0,57	0,00
	SFCR 1	0,27	1,00	0,76	0,52

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 28 - Matriz de comportamento econômico dos critérios A2.5, A3.1, A3.2, A3.3 e A3.4.

Critérios	Alternativas	Payback energético	Payback time de carbono	Uso da terra (área requerida)	Poluição sonora	Poluição visual
V(i)	PVsyst	1,00	0,04	1,00	0,31	0,51
	IFSC	1,00	0,04	1,00	0,31	0,51
	SFCR 1	1,00	0,08	0,51	0,50	0,51

Fonte: Elaboração própria (2019).

Através das alternativas, levando em consideração os pontos de vista técnico, econômico-financeiro e socioambiental, evidenciou-se a função de valor econômico em cada um dos critérios quantitativos. Os critérios qualitativos foram obtidos com o método AHP, que resultou no desempenho econômico.

Para determinar qual a “melhor” alternativa dentro de um conjunto de alternativas, foi atribuído uma importância relativa (uma “nota” de 1 a 5, sendo a nota 5 mais importante e a nota 1 a menos importante) a cada um dos critérios. Estas notas, denominadas *trade-offs*, traduzem a ponderação dos critérios, e, dessa forma, pode-se determinar uma pontuação global das alternativas com base nestas notas. Os *trade-offs* e as notas aplicadas aos critérios estão apresentadas nas Tabelas 29, 30, 31, 32 e 33.

Tabela 29 - Trade-offs dos critérios A1.1, 1.2, 1.3 e 1.3.

Critérios	Energia Elétrica produzida	Fator de capacidade	FDI	Capacidade de armazenamento
Nota	4	2	3	1
Trade-offs	8,89%	4,44%	6,67%	2,22%

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 30 - Trade-offs dos critérios A1.4, B1.1, 1.2 e 1.3

Critérios	Capacidade de modularidade	Variabilidade da fonte primária	Potencial energético	Retorno Energético do Investimento - EROI
Nota	2	2	2	3
Trade-offs	4,44%	4,44%	4,44%	6,67%

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 31 - Trade-offs dos critérios B1.4, C1.1, 1.2 e 1.3.

Critérios	Performance Ratio	Taxa de distorção harmônica de tensão - THDv	Taxa de distorção harmônica de corrente - THDi	Fator de potência - com harmônicos
Nota	5	1	1	2
Trade-offs	11,11%	2,22%	2,22%	4,44%

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 32 - *Trade-offs* dos critérios A2.1, 2.2, 2.3 e 2.4.

Crítérios	Periodicidade de manutenção	Facilidade de manutenção	Custos de energia economizada	Custo nivelado de energia
Nota	1	1	3	3
Trade-offs	2,22%	2,22%	6,67%	6,67%

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 33 - *Trade-offs* dos critérios A2.5, A3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

Crítérios	Payback energético	Payback time de carbono	Uso da terra (área requerida)	Poluição sonora	Poluição visual
Nota	3	3	1	1	1
Trade-offs	6,67%	6,67%	2,22%	2,22%	2,22%

Fonte: Elaboração própria (2019).

Conforme exposto, os critérios que foram considerados mais importantes na análise de desempenho de um SFCR, foram os critérios Energia elétrica produzida, FDI, Retorno energético do investimento, *Performance ratio*, Custo de energia economizada, Custo nivelado de energia, *Payback* energético e *Payback time* de carbono.

Em posse dos *trade-offs* e da função aditiva (3), foi calculado o valor de desempenho global das alternativas, que estão expostos na tabela 34.

Tabela 34 - Valor global das alternativas.

Alternativas	Valor global
PVsys	0,35
IFSC	0,37
SFCR 1	0,43

Fonte: Elaboração própria (2019).

Dessa maneira, conforme apresentado na Tabela 34, a alternativa SFCR foi a que obteve o melhor desempenho nos critérios analisados, sendo 14% melhor que a alternativa IFSC e 18% melhor que a alternativa PVsys.

5 CONCLUSÃO

A GD, respaldada pela Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, esteve em constante expansão durante os últimos anos, principalmente devido as políticas de incentivo à geração fotovoltaica. No entanto, na Audiência Pública nº 40/2019 da ANEEL, realizada em novembro deste ano, foi discutida a possibilidade de onerar 60% da energia elétrica injetada na rede pelos sistemas de GD. Essa medida, se for adiante, pode trazer um grande retrocesso à geração fotovoltaica, principalmente na diminuição no número de SFCR instalados, visto que um dos maiores incentivos da GD é a economia que traz ao gerador.

Em um cenário de análise de desempenho de SFCR, muitos são os critérios envolvidos, o que faz com que não exista somente uma solução, mas um conjunto de soluções, o que justifica o emprego da Análise de Decisão Multicriterial. A partir da implementação do modelo de avaliação de desempenho de SFCRs, aplicado aos estudos de caso, verifica-se que as três alternativas tiveram um desempenho semelhante em relação aos critérios propostos no modelo multicriterial, conforme exposto nas Tabelas de 7 a 10. No entanto, a planta fotovoltaica do IFSC está sendo mensurada pelo modelo multicritério e pelo PVsyst. Desta forma, quando comparou-se as alternativas IFSC e PVsyst, tem-se na realidade um confronto de análises de desempenho, em que o objetivo foi verificar as discrepâncias dessas formas em cada critério. Como o valor global evidenciou, a alternativa que obteve o melhor desempenho foi a alternativa SFCR 1, principalmente por obter melhor resultado nos critérios considerados mais importantes, decorrentes da avaliação dos *trade-offs*.

Por fim, este trabalho buscou evidenciar que a GD e a análise de desempenho de SFCRs são de extrema importância para a matriz elétrica, principalmente pela estabilidade e confiabilidade que trazem ao SEP.

Como trabalhos futuros, pode-se sugerir a implementação do modelo para alternativas de SFCRs em que todos os sistemas estejam em operação, ou somente simulações. Além disso, a implementação do modelo para sistemas fotovoltaicos de geração centralizada, que também está em expansão no Brasil.

REFERÊNCIAS

ABREU, Leila; ERTHAL, Milton; DA HORA, Henrique; SOUZA, Claudio; SANTOS, Wallan. Análise Multicritério de Potencialidades para a Produção de Energia Renovável na Região Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 19., 2019, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro: Centro de Análises de Sistemas Navais, 2019.

ABSOLAR. **Energia solar fotovoltaica atinge marca história de 500 MW em microgeração e minigeração distribuída no Brasil.** Disponível em: <http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/energia-solar-fotovoltaica-atinge-marca-historica-de-500-mw-em-microgeracao-e-minigeracao-distribuid.html>. Acesso em: 20 abr. 2019.

ALVES, L. G. K.; NYKIEL, T. P.; BELDERRAIN, M. C. N. Comparação Analítica entre Métodos de Apoio Multicritério à Decisão (AMD). **Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA / 2007.** Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, outubro 2007.

ANEEL. **BIG: Banco de Informações de Geração.** Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 17 nov. 2019.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482/2012 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, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2019.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687/2015 de 24 de novembro de 2015.** Altera a Resolução Normativa nº 482 de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição - PRODIST. 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2019.

ARAÚJO JÚNIOR, Carlos Alberto de. **Metodologia de Determinação dos Níveis Metas para as Futuras Condições de Operação do Sistema Interligado Nacional.** 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2013.

ATHANASIOS, I. *et al.* Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process. **Elsevier: Energy Policy**, Kozani, out. 2008.

AZZOLIN, Herton Naressi. **Mapeamento e priorização de fontes de geração distribuída como suporte ao novo planejamento da distribuição.** 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

BARROS, Hugo Albuquerque. **Anteprojeto de um Sistema Fotovoltaico de 12 kWp Conectado à Rede**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

BENEDITO, Ricardo S. **Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por Meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, No Brasil, Sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório**. São Paulo 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

BERZINS, Lorena Jacobson. **Avaliação de Desempenho pelo AHP, através do superdecisions; Caso Inmetro**. Rio de Janeiro: Faculdades Ibmecc. Dissertação de Mestrado Profissionalizante apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração das Faculdades Ibmecc, 2009.

CALILI, R. F. *et al.* Estudo de modelos decisórios para escolha de alternativas de usinas geradoras de energia elétrica: utilização dos métodos multicritério TOPSIS, ELECTRE e AHP. In: **XIV Congresso de Ingeniería de Organización**. 2010, Donostia.

CANADIAN SOLAR. **Folha de dados da placa solar CS6U-345P**. Disponível em:

<https://www.canadiansolar.com/upload/9f6474e3a7c4881c/d421046f5307ed4c.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2019.

CASAROTTO FILHO, Nelson. KOPITKE, Bruno Hartmut. **Análise de investimentos**. São Paulo: Atlas, 1998.

CAVALCANTE, Cristiano Alexandre Virgínio; ALMEIDA, Adiel Teixeira de. Modelo multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando PROMETHEE II em situações de incerteza. **Pesquisa Operacional**, [s.l.], v. 25, n. 2, p.279-296, ago. 2005. FapUNIFESP.

CUCCHIELLA, Federica; D'ADAMO, Idiano. A Multicriteria Analysis of Photovoltaic Systems: Energetic, Environmental, and Economic Assessments. **International Journal of Photoenergy**, [s.l.], v. 2015, p.1-8, 2015. Hindawi Limited.

ENEL GREEN POWER. **NOVA OLINDA: respecting the quilombola tradition while creating shared value**. Disponível em:

<https://www.enelgreenpower.com/stories/a/2019/01/nova-olinda-quilombos-creation-of-shared-value>. Acesso em: 28 mai. 2019.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Energia Solar Fotovoltaica:**

Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica. Disponível em:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf. Acesso em: 28 mai. 2019.

FERREIRA, Heldemarcio Leite. **Modelos Multicritério de Localização de Transformadores Reserva no Contexto de Planejamento de Manutenção**. 2009. 147 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

- FUSANO, Renato Hideo. **Análise dos Índices de Mérito do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede do Escritório Verde da UTFPR**. 2013. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.
- GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisão em cenários complexos**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2009.
- IFSC. **Inaugurando o primeiro sistema fotovoltaico do IFSC**. Disponível em: https://www.ifsc.edu.br/conteudo-aberto/-/asset_publisher/1UWKZAKiOauK/content/id/822552. Acesso em: 23 set. 2019.
- INEE. INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **O que é Geração Distribuída**. Disponível em: http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp. Acesso em: 25 mai. 2019.
- LEITE, I. M. S.; FREITAS, F. F. T. Análise Comparativa dos métodos de apoio multicritério a decisão: AHP, ELECTRE e PROMETHEE. **XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Bento Gonçalves, outubro 2012.
- LOBO, Steve *et al.* Performance and Comparative Analysis of a Medium Sized, Grid Connected Photovoltaic System for Some Locations in the UAE. **2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)**, [s.l.], p.1215-1220, maio 2018. IEEE.
- MENDES, Luiz Fernando Rosa; PEREIRA, Helisa Moreira Peixoto; STHEL, Marcelo Silva. Análise Multicritério para Seleção de Fontes Renováveis de Energia em um Domicílio Urbano no Município de Campos dos Goytacazes/RJ. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [s.l.], v. 8, n. 1, p.279-298, 27 mar. 2019. Universidade Federal do Paraná.
- MHR. **Energia Gerada / Energia Investida**. Disponível em: <http://www.mhrtecnologia.com.br/energia-gerada-energia-investida>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- NASCIMENTO, Dalila Hemckmeier do; SICA, Everthon Taghori. Proposta de Avaliação dos Impactos Ambientais e Energéticos com base na Resposta da Demanda e nos Critérios Internacionais de Eficiência Energética em Edificações. In: **ENCONTRO REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRE**, Foz do Iguaçu, 2019.
- NISA, Tiago Horta. **Avaliação Económica de Sistemas Solares Fotovoltaicos Residenciais**. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica, Engenharia de Sistemas de Potência e Automação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2014.
- NOVAK, Camila. **Proposta de Avaliação do Desempenho de Plantas Fotovoltaicas Conectadas à Rede em Baixa Tensão por um Modelo Multicriterial**. 2018. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2018.

OLIVEIRA, Henrique Meira de; SODRE, Eduardo de Aguiar. Study of a grid-tied photovoltaic system in Caruaru using PVsyst and Skelion. **2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)**. Niterói, maio 2018.

PINHO, João Tavares. GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014. 530 p.

RAUPP, Igor *et al.* **Seleção multicritério de alternativa de localização de reservatórios e usinas hidroelétricas em bacias hidrográficas considerando parâmetros de indiferença e preferência**. Cadernos do Ime - Série Estatística, [s.l.], p.1-17, 5 mar. 2018. Universidade de Estado do Rio de Janeiro.

RODRIGUEZ, Arturo Alarcon *et al.* Multi-objective planning of distributed energy resources: A review of the state-of-the-art. **Elsevier: Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Glasgow, jan. 2010.

ROY, B.; BOUYSSOU, D. (1993). **Aide multicritère à la décision: methodes et cas**. Paris: Economica.

SANTOS, Ana Laura Brasileiro *et al.* Método de análise hierárquica para suporte à decisão na localização de instalações geradoras de energia solar fotovoltaica no estado de Sergipe. **Brazilian Journal Of Business**. Curitiba, p. 924-943. jun. 2019.

SANTOS, Luiza dos; RIBEIRO, Luís Gustavo Macedo; RANGEL, Luís Alberto Duncan. Avaliação de fontes renováveis de energia utilizando o Apoio Multicritério à Decisão. In: Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 14., 2017, Resende. **Anais...** Resende: Seget, 2017.

SICA, E. T. **Planejamento Integrado de Recursos Hidricos para a Geração de Energia Elétrica: um sistema de apoio à decisão multicritério e dinâmica de sistemas**, 2009. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.

SICA, Everthon Taghori *et al.* Avaliação multicritério de empreendimentos de geração e transmissão de energia elétrica: uma abordagem por meio dos critérios de projetos de MDL. In: **Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Recife, nov. 2009.

SOUZA, Thays Cristina França de; OLIVEIRA, Fabricio Bonfim Rodrigues de. Análise comparativa de dados reais e simulados de uma usina solar fotovoltaica. **2018 Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS)**. Gramado, abril 2018.

VERGÍLIO, Karen Evelline Perusso. **Geração Distribuída e Pequenas Centrais Hidrelétricas: Alternativas para a geração de energia elétrica no Brasil**. 2012. 32 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica Com ênfase em Sistemas de Energia e Automação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Érica, 2015. 224 p.

YADAV, Priya; KUMAR, Nitin; CHANDEL, S.s. Simulation and performance analysis of a 1kWp photovoltaic system using PVsyst. **2015 International Conference On Computation Of Power, Energy, Information And Communication (ICCPEIC)**. Melmaruvathur, abr. 2015.

ZILLES, Roberto *et al.* **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 208 p.