

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

SANDRO NASCIMENTO VIANA

**ANÁLISE DO FATOR DE DIMENSIONAMENTO DE
INVERSORES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO**

**Alegrete
2018**

SANDRO NASCIMENTO VIANA

**ANÁLISE DO FATOR DE DIMENSIONAMENTO DE
INVERSORES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva

**Alegrete
2018**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo autor através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

V614a Viana, Sandro Nascimento

Análise de Dimensionamento de Inversores em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede de Distribuição / Sandro Nascimento Viana.

52 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2018.

"Orientação: Guilherme Sebastião da Silva".

1. Sistemas Elétricos de Potência. 2. Geração Distribuída. 3. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede de Distribuição.

I. Título.

SANDRO NASCIMENTO VIANA

**ANÁLISE DO FATOR DE DIMENSIONAMENTO DE INVERSORES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 4 de dezembro de 2018.

Banca examinadora:


Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva
Orientador


Prof. Dr. Fláudio Fernandes dos Santos
UNIPAMPA


Prof. Dr. Jumar Luis Russi
UNIPAMPA

*Dedico esse trabalho as pessoas mais importantes da minha vida, meus pais, **Sandoval e Tânia**, minha irmã **Taniele** e meu sobrinho **Martin**.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Agradeço aos meu pais, Sandoval e Tânia, minha irmã Taniele, e meu sobrinho Martin, que sempre acreditaram em mim, e nunca deixaram de me apoiar

Ao professor Guilherme, meu orientador, pela oportunidade em trabalhar com ele, e que desde a primeira conversa abraçou a ideia, me auxiliando em tudo.

A empresa Esco-GD, que me concedeu a oportunidade de estágio, e assim poder coletar todos os dados para o trabalho de conclusão do curso.

A Universidade Federal do Pampa, seu corpo docente, direção e administração.

Ao meu amigo Matheus Serpa, que nunca mediu esforços para me ajudar. Aos amigos Fabricio Manganeli, Leonardo Richter, Roberta Marques, Marco Luft, por várias noites de estudos.

Agradeço aos demais colegas e amigos que me apoiaram nesta grande caminhada.

*“Dar o melhor de si é mais importante
que ser o melhor”.*

Mike Lerner

RESUMO

Esse trabalho de conclusão de curso apresenta uma análise do dimensionamento de inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) através do Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) e de índices de mérito. O FDI é avaliado de acordo com o local de operação, uma vez que maiores índices de irradiação tendem a exigir uma maior utilização do inversor. Como o sistema fotovoltaico poucas vezes opera em seu nível máximo de potência e os inversores atuais permitem o subdimensionamento, existe a possibilidade de variar custo/benefício do sistema instalado. Assim, neste trabalho foram analisados 4 sistemas de diferentes localidades, buscando a melhor relação entre inversor e o gerador fotovoltaico, que são obtidas pela razão kWh/kWp. Os principais resultados apontaram que o subdimensionando o sistema, o investimento inicial será menor, por ter um número reduzido de inversores. No estudo realizado a instalação de uma potência de módulos fotovoltaicos superior à potência do inversor possibilitou que o inversor fornecesse uma maior potência que a nominal, que é limitada pela potência máxima ou potência de pico do inversor, a qual também é fornecida pelo fabricante. Notou-se, na produção de energia que o subdimensionamento do inversor possibilitou uma maior geração de energia. Apesar dos resultados levantados, cabe enfatizar que o FDI é muito importante para um SFCR, e que ele depende muito da localidade, devido ao clima (radiação e temperatura).

Palavras-chave: fator de dimensionamento, inversor, sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT

This work of course completion presents an analysis of the design of inverters for grid connected photovoltaic systems (SFCR) through the Inverter Dimensioning Factor (FDI) and merit indices. The FDI is evaluated according to the location of operation, since higher irradiation rates tend to require greater use of the inverter. As the photovoltaic system rarely operates at its maximum power level and the current inverters allow subdimensioning, there is the possibility of varying cost / benefit of the installed system. Thus, in this work 4 systems from different locations were analyzed, searching for the best relation between inverter and photovoltaic generator, which are obtained by the ratio kWh / kWp. The main results pointed out that the underdimensioning of the system, the initial investment will be smaller, having a reduced number of investors. In the study the installation of a photovoltaic module power higher than the inverter power allowed the inverter to provide a higher power than the rated power, which is limited by the maximum power or peak power of the inverter, which is also supplied by the manufacturer. In the production of energy, it was noted that the undersized inverter made it possible to generate more energy. Despite the results, it is important to emphasize that FDI is very important for a SFCR, and that it depends a lot on the locality due to the climate (radiation and temperature).

Keywords: sizing factor, inverter, photovoltaic systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema fotovoltaico conectado à rede.....	16
Figura 2 - Módulo fotovoltaico.....	17
Figura 3 - Inversor centralizado.....	18
Figura 4 - Inversores com strings.....	19
Figura 5 - Inversor multi-string (configuração CC paralelo)	20
Figura 6 - Inversor módulo integrado (módulo CA)	21
Figura 7 - Fluxograma do algoritmo para obtenção do FDI.....	22
Figura 8 - Classificação de inversores por princípio de operação.....	23
Figura 9 - Curvas de potência de saída e temperatura dos inversores.....	24
Figura 10 - Curva de saída de potência dos inversores.....	24
Figura 11 - Potência de saída do inversor com e sem efeito de corte.....	25
Figura 12 – Gráfico do rendimento anual.....	26
Figura 13 – Gráfico do valor Presente Líquido.....	26
Figura 14 - Diagrama elétrico do SFCR.....	31
Figura 15 – Gráfico da potência nominal e potência máxima para números de inversores.....	32
Figura 16 – Gráfico da potência dos arranjos fotovoltaicos.....	33
Figura 17 - Número de inversores por arranjo de painéis.....	33
Figura 18 - Curva de saída de potência do inversor não saturada.....	36
Figura 19 - Curva de saída de potência do inversor saturada.....	37
Figura 20 - SFCR instalado no telhado com 126,4 kWp de potência total.....	39
Figura 21 - Diagrama elétrico do SFCR.....	40
Figura 22 - Gráfico de energia produzida por cada inversor.....	41
Figura 23 – Gráfico da irradiação solar diária média mensal.....	41
Figura 24 - Gráfico de geração de cada inversor no mês de outubro.....	42
Figura 25 - Gráfico mensal de geração total do sistema no mês de outubro...	43
Figura 26 – Gráfico do fator de dimensionamento do inversor.....	43
Figura 27 – Gráfico do fator de produtividade.....	44
Figura 28 – Gráfico do fator de capacidade.....	44
Figura 29 – Gráfico da relação custo/energia.....	45
Figura 30 – Curva de geração dia saturado.....	45
Figura 31 – Curva de geração dia não saturado.....	46

Figura 32 – Curva de geração dia nublado.....	46
Figura 33 – Gráfico do fator de produtividade das 3 condições.....	47
Figura 34 – Gráfico do fator de capacidade das 3 condições.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características técnicas dos inversores.....	23
Tabela 2 - Comparação dos métodos utilizados.....	27
Tabela 3 - Dados dos componentes do sistema.....	35
Tabela 4 - Dados gerais do sistema não saturado.....	37
Tabela 5- Dados gerais do sistema saturado.....	38
Tabela 6 –Valores de produção de cada inversor.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CBGD - Congresso Brasileiro de Geração distribuída

CRESESB - Centro de Referências para a Energia Solar e Eólicas

FC – Fator de Capacidade

FDI – Fator de Dimensionamento do Inversor

FV – Sistema Fotovoltaicos

GD – Geração Distribuída

LABSOL - Laboratório de Energia Solar

LABSOLAR - Laboratório de Energia Solar

MPP – *Maximum Power Point*, Ponto de Máxima Potência

MPPT - Rastreamento do Ponto de Máxima Potência

PR – Taxa de Desempenho ou Performance Ratio

RN – Resolução Normativa

SFCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

SFVI – Sistemas Fotovoltaicos Isolados

SPPM – Seguimento do Ponto Máximo de Potência

STC - *Standart Test Conditions*, Valores nas Condições

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

VPL – Valor Presente Líquido

YF – *Final Yield*, Fator de Produtividade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos.....	16
2.1.1 Objetivos Específicos	16
1.2 Justificativa	16
1.3 Organização do Trabalho	17
2 CONCEITOS INICIAIS E REVISÃO DAS TÉCNICAS DE DIMENSIONAMENTO DE INVERSORES.....	18
2.1 Conceitos de Sistemas Fotovoltaicos	18
2.1.2 Módulo fotovoltaico.....	18
2.1.3 Configuração dos sistemas conectados à rede	19
2.1.4 Revisão das técnicas de dimensionamento.....	23
2.2 Conceitos de Fatores.....	30
2.2.1 Fator de dimensionamento do inversor	30
2.2.2 Índices de mérito	30
2.3 Considerações finais do capítulo	32
3 DIMENSIONAMENTO DE INVERSORES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE	33
3.1 Inversor.....	33
3.2 Limites de Operação do Inversor	33
3.3 Métodos de Análise	35
3.4 Exemplo numérico da metodologia.....	36
3.4.1 Análise do sistema sem saturação.....	37
3.4.2 Análise do sistema com saturação.....	39
3.4.3 Comparação entre os sistemas.....	40
3.5 Considerações finais do capítulo	40
4 RESULTADO	41
4.1 Descrição do Sistema.....	41
4.2 Resultados do Sistema	42
4.2.1 Geração mensal do sistema.....	42
4.2.2 FDI e índices de mérito	45
4.2.3 Custo/Energia	47
4.2.3 Curvas diárias das condições saturada, não saturada e com dia nublado	48
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5.1 Trabalhos Futuros.....	52
REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a geração distribuída por fontes renováveis no Brasil cresceu significativamente a partir da Resolução Normativa (RN) 482/2012 que estabeleceu o regime jurídico para geração distribuída e o sistema de compensação de energia elétrica, regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual é responsável pelas condições de acesso da geração distribuída na matriz energética brasileira. Em 2015 essa resolução foi alterada através da RN 687/2015. Em 2017 ocorreram mais algumas mudanças introduzidas pela RN 786/2017, uma destas sendo a ampliação da potência instalada de centrais geradoras de fontes renováveis para valores entre 75 kW e 5 MW, suprimindo a diferença entre as fontes hidráulicas e demais fontes renováveis. As energias renováveis são fontes limpas de geração e também classificadas como fontes de energia alternativas e inesgotáveis, sendo fornecidas pela natureza (ARAÚJO; RANK; BUENO, 2016).

A utilização de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) é uma forma de geração de energia elétrica renovável. A conexão desses sistemas à rede diminui a parcela das fontes primárias, como a hidráulica e a térmica. Um SFCR pode ser dimensionado para suprir uma parte ou o total da demanda de energia de uma edificação, uma vez que pode ser instalada diretamente na cobertura ocupando um espaço já utilizado (ARAÚJO; RANK; BUENO, 2016).

Os principais componentes de um SFCR são os módulos fotovoltaicos, os inversores, medidores. Vários fatores são considerados para dimensionar um SFCR visando um melhor custo-benefício para o projeto. O dimensionamento do inversor é diretamente relacionado com a capacidade do gerador fotovoltaico, sendo assim, o subdimensionamento do inversor é visto como uma forma de redução do custo de um SFCR, uma vez que os geradores fotovoltaicos poucas vezes atingem sua capacidade nominal, visto que estes dependem da irradiância incidente no plano dos painéis e da temperatura do ambiente (PAIVA, 2015).

Dependendo do número de painéis fotovoltaicos pode-se variar a quantidade de inversores, pois um SFCR tem um custo inicial alto de instalação. Esse investimento inicial retornará por meio da redução do consumo de energia proveniente da concessionária, que é o motivo principal de se fazer um investimento desse porte. Pensando em um melhor custo-benefício, a possibilidade de um subdimensionamento permite, em alguns casos, a redução de custo através da instalação de um gerador

fotovoltaico com um inversor de menor potência quando comparada à potência dos arranjos fotovoltaicos. Para a escolha do inversor, o Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI), que é definido como a razão entre a potência nominal do inversor e a potência nominal ou potência de pico do gerador fotovoltaico, é um fator importante por considerar as características climáticas, a radiação solar e a temperatura de cada localidade, além da tecnologia dos módulos e da curva de eficiência do inversor (MACÊDO, 2006).

1.1 Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo geral realizar análises comparativas do fator de dimensionamento de inversores e de índices de mérito com propósito de auxiliar no subdimensionamento dos SFCR.

2.1.1 Objetivos Específicos

Este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Revisar as técnicas e métodos utilizados na literatura para a análise do fator de dimensionamento nos SFCR;
- Estudar os componentes e configurações dos SFCR;
- Realizar a coleta de dados de produção de energia do sistema a ser estudado;
- Realizar um estudo da eficiência dos inversores operando subdimensionados.

1.2 Justificativa

A busca por fontes de energias renováveis e menos poluentes vem sendo promovida cada vez mais pela sociedade. A energia solar é um tipo de fonte de energia renovável e possui inúmeras vantagens para sua utilização, tanto a partir dos Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI) quanto dos SFCR, sendo uma fonte limpa e confiável (ARAÚJO; RANK; BUENO, 2016). O sistema fotovoltaico conectado à rede é uma solução para a diversificação da matriz elétrica brasileira com capacidade de atuar como Geração Distribuída (GD).

Dentre os componentes que compõem um sistema fotovoltaico, destaca-se a capacidade de operação do inversor com potências superiores à potência nominal do mesmo. Esta característica torna possível esses sistemas operarem

subdimensionados com intuito de diminuir o investimento inicial, que é consideravelmente alto principalmente em função do custo do inversor. Assim, em alguns casos, pode-se obter grandes benefícios financeiros aos clientes subdimensionando o inversor.

1.3 Organização do Trabalho

O trabalho está dividido em 5 capítulos.

O capítulo 2 retrata uma breve revisão bibliográfica de 4 sistemas fotovoltaicos conectados à rede e conceitos iniciais e configurações de um SFCR.

O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada nesse trabalho. Apresenta os conceitos de inversores, limites de operação do inversor e métodos de análise.

O capítulo 4 apresenta os resultados prévios obtidos com a aplicação da metodologia a partir do sistema descrito

O capítulo 5 apresenta os comentários finais, enfatizando as principais contribuições desse trabalho.

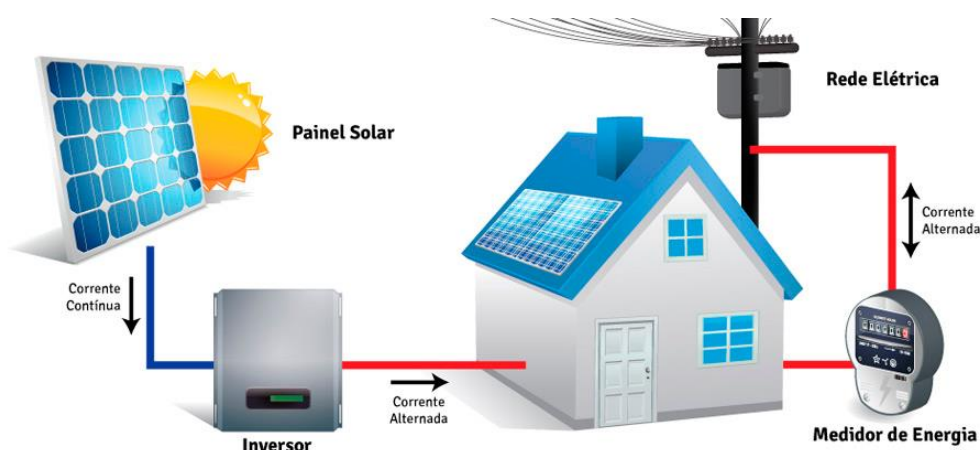
2 CONCEITOS INICIAIS E REVISÃO DAS TÉCNICAS DE DIMENSIONAMENTO DE INVERSORES

Inicialmente são apresentados os conceitos de sistemas fotovoltaicos. Após a revisão da literatura é composta por uma análise de alguns sistemas já instalados em diferentes localidades e uma breve contextualização sobre alguns fatores para o dimensionamento de um SFCR.

2.1 Conceitos de Sistemas Fotovoltaicos

O Sistema Fotovoltaico (FV) é um conjunto de equipamentos que permite transformar energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. O sistema é composto basicamente por módulos fotovoltaicos, que são responsáveis pela captação e transformação de energia solar em energia elétrica CC, e conversores CC/CA, já que os módulos fotovoltaicos têm como saída uma corrente na forma contínua. Para conectar o sistema na rede elétrica é indispensável a utilização de um inversor, de medidores com a função de medir a quantidade de energia consumida e a injetada na rede elétrica. Um esquema típico de SFCR é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Sistema fotovoltaico conectado à rede



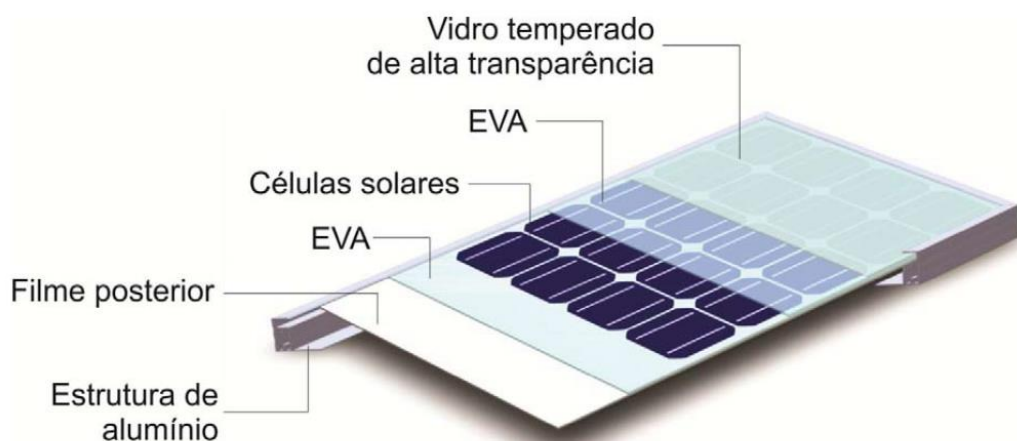
Fonte: Universo Solar (2015, não paginado)

2.1.2 Módulo fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas de baixa potência conectadas em arranjos, afim de se obter uma potência maior. Um módulo

pode ser constituído por um conjunto de 36 a 216 células fotovoltaicas (PINHO; GALDINO, 2014). Tais células são responsáveis pela conversão de energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. As células fotovoltaicas são fabricadas em sua maioria com lâminas de silício mono ou policristalino (PINHO; GALDINO, 2014). Na Figura 2 são apresentados os componentes da estrutura de um painel fotovoltaico.

Figura 2 - Módulo fotovoltaico



Fonte: Pinho e Galdino (2014, p.132)

Os módulos podem ser associados em arranjos série ou em paralelo afim de aumentar os valores de corrente, de tensão e de potência do sistema fotovoltaicos. Em um SFCR, a ligação mista entre os módulos permite multiplicar o ponto de máxima potência de operação do sistema, atingindo maiores níveis de potência.

2.1.3 Configuração dos sistemas conectados à rede

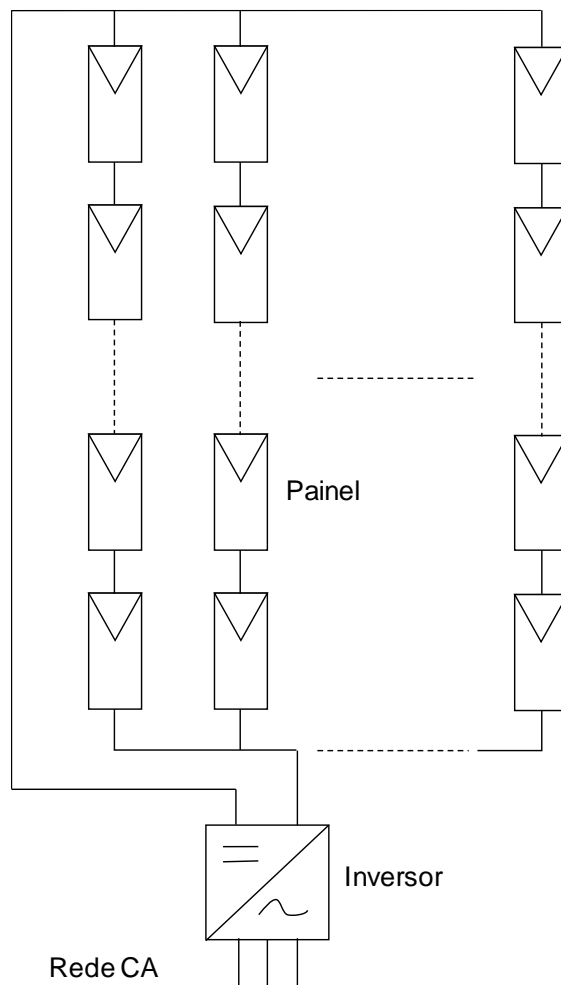
Os inversores conectados à rede, de modo geral, podem ser classificados em quatro diferentes configurações, tais como: (i) Inversor central; (ii) inversor com *strings* (iii) inversor *multi strings* e (iv) inversor com módulo integrado.

2.1.2.1 Inversor central

Nessa configuração há apenas um inversor conectado à rede e os módulos são ligados em série e em paralelo, conforme é apresentado na Figura 3. Esta configuração é utilizada para a obtenção de um elevado nível de potência, sendo mais utilizados em SFCR com potências entre 20 kW e 400 kW (RAMPINELLI;

KRENZINGER; ROMERO, 2013). A principal vantagem desta configuração é a redução de custos pelo fato de ter menores correntes nos condutores, possibilitando a diminuição das suas seções. Como desvantagens tem-se maiores perdas devido à um único sistema de Seguimento do Ponto Máximo de Potência (SPPM), menor confiabilidade do sistema por razão do número grande de fileiras de módulos, onde o SPPM pode ser afetado pelo fenômeno de sombreamento.

Figura 3 - Inversor centralizado



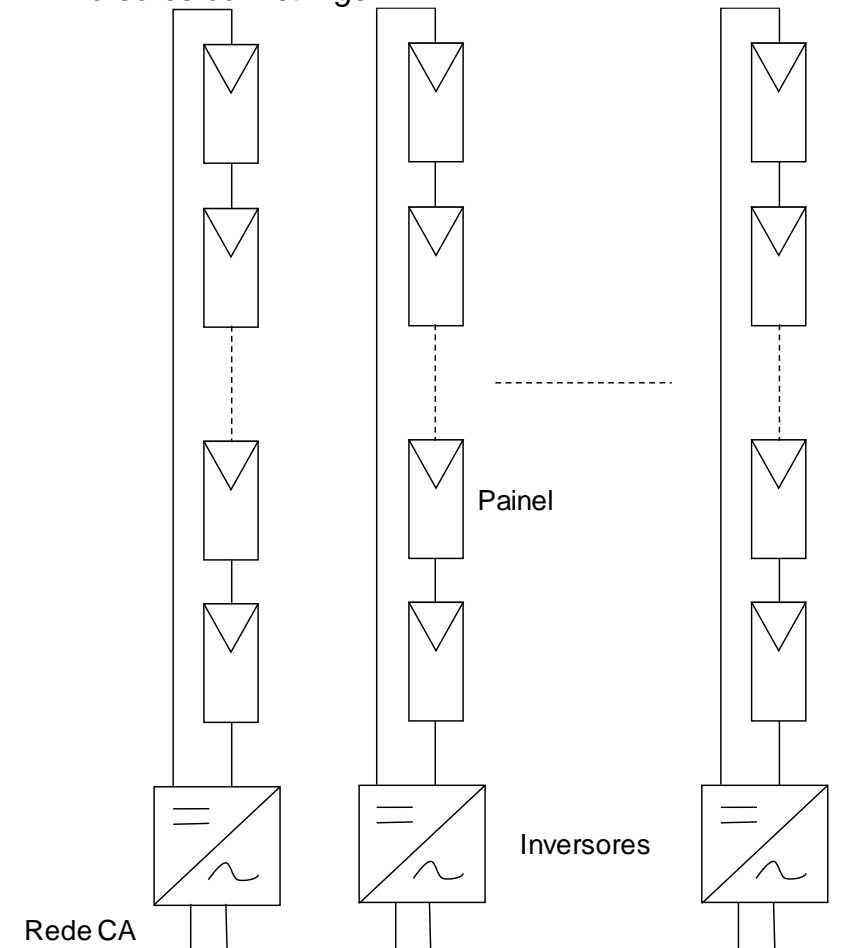
Fonte: Adaptado de Araújo, Rank e Bueno (2016, p.46)

2.1.2.2 Inversor com *strings*

O inversor com *strings* é conectado em um conjunto de módulos em série, como mostra a Figura 4, e é uma configuração muito utilizada por reduzir as perdas por sombreamento que possibilita uma produção em larga escala. Estas vantagens aumentam a confiabilidade do sistema e da eficiência energética. Porém, este sistema possui a desvantagem do aumento dos custos, uma vez que nesta configuração é

necessário um número maior de inversores de menor potência (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

Figura 4 - Inversores com *strings*

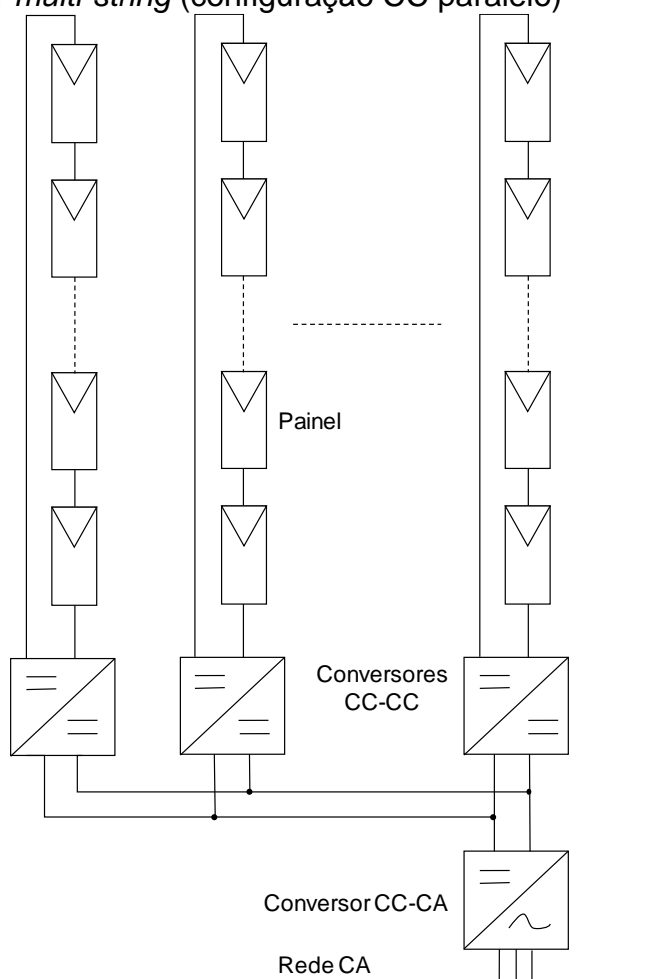


Fonte: Adaptado de Araújo, Rank e Bueno (2016, p.46)

2.1.2.3 Inversor *multi-string*

O inversor *multi-string* é uma configuração indicada para sistemas com vários arranjos com diferentes orientações, irradiância e temperatura, onde cada arranjo é conectado a um conversor CC/CC, como mostra a Figura 5, com a finalidade de concentrar o arranjo em seu ponto máximo de potência. Como principal desvantagem tem-se, uma pequena redução da eficiência do conjunto de conversores devido a inclusão de outro estágio de potência (conversor CC-CC) (DESCONZI, 2011).

Figura 5 - Inversor *multi-string* (configuração CC paralelo)

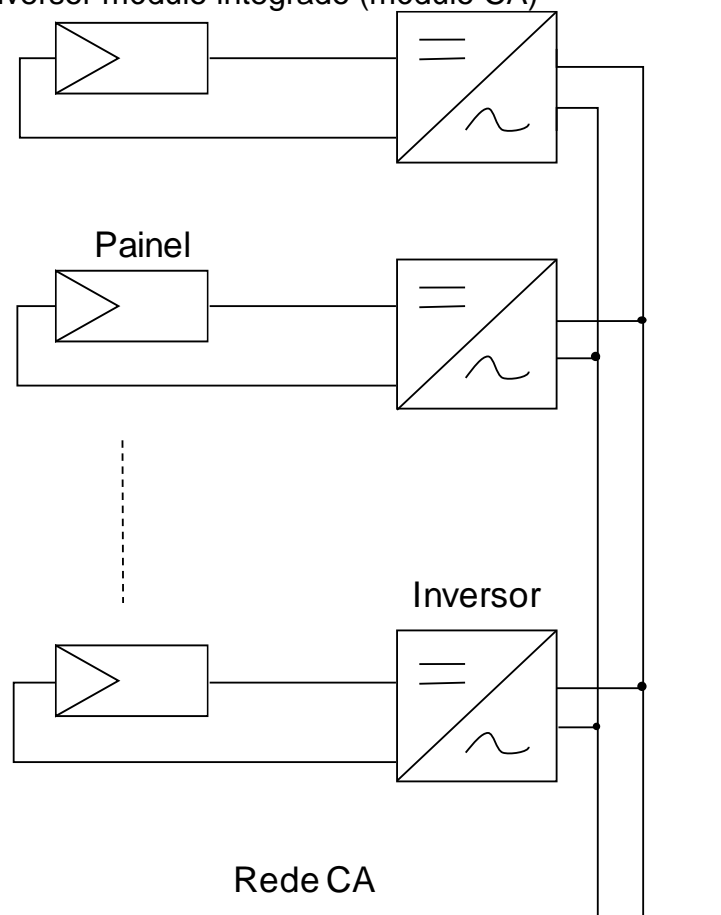


Fonte: Adaptado de Araújo, Rank e Bueno (2016, p.46)

2.1.2.4 Inversor com módulo integrado

Na configuração inversor com módulo integrado apresentado na Figura 6, cada módulo possui um inversor independente, permitindo o sistema operar constantemente no Ponto Máximo de Potência (PMP). A principal desvantagem desta configuração é o alto custo e a incompatibilidade da vida útil entre os inversores e os módulos.

Figura 6 - Inversor módulo integrado (módulo CA)



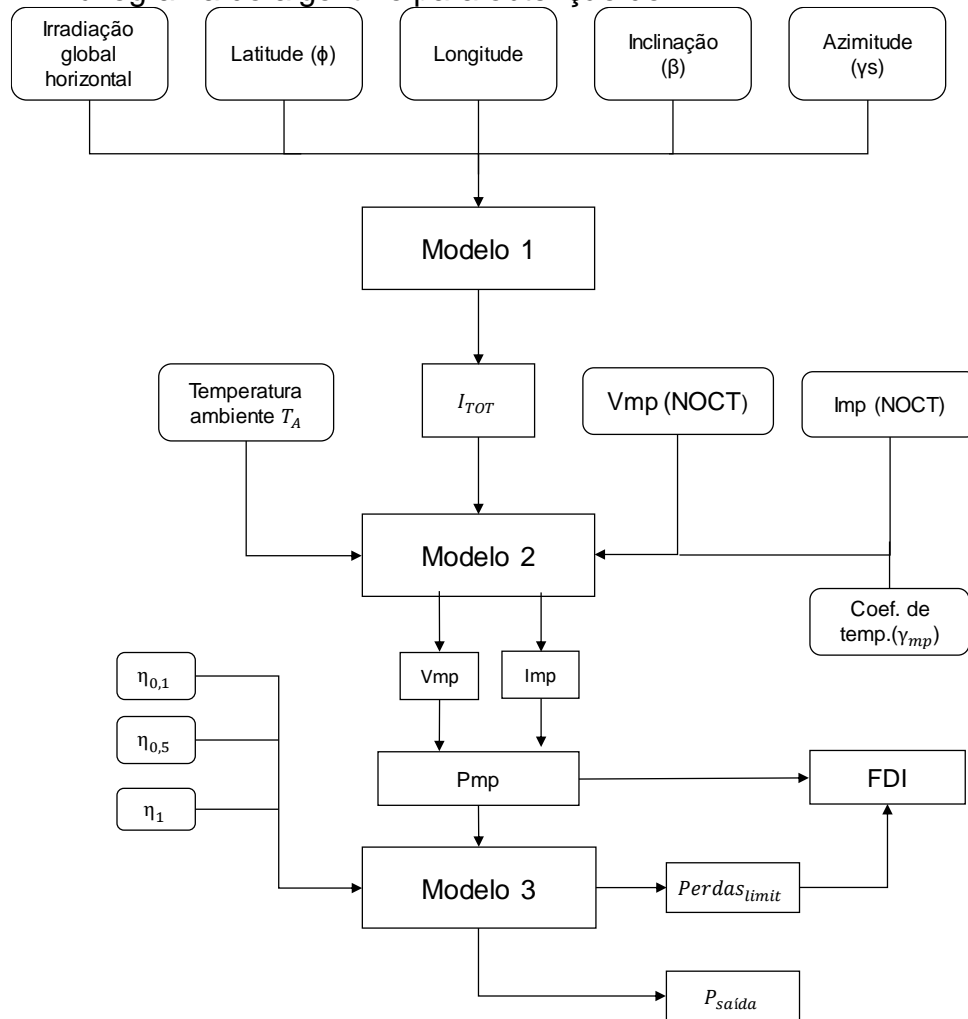
Fonte: Adaptado de Araújo, Rank e Bueno (2016, p.46)

2.1.4 Revisão das técnicas de dimensionamento

Em um sistema instalado em Goiânia (PAIVA et al., 2016) foram analisadas as medições de um sistema real com 12 anos de medições horárias locais de irradiação global horizontal. Neste trabalho a otimização foi obtida por modelagem matemática considerando variações de 0° a 90° de inclinação e -90° a $+90^\circ$ de ângulo azimutal. Foram considerados dados disponibilizados por fabricantes dos componentes do SFCR. O sistema tem uma potência de 34 kWp de painéis fotovoltaicos.

Um algoritmo foi utilizado para análise do SFCR, que usa uma modelagem matemática separada em três etapas, como pode ser visualizado na Figura 7 (PAIVA et al., 2016).

Figura 7 - Fluxograma do algoritmo para obtenção do FDI



Fonte: Adaptado de Paiva et al. (2016, p.2)

Outro estudo realizado a partir de uma análise teórica e experimental de sistemas fotovoltaicos com inversor foi realizado pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOL), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Foi utilizado um sistema fotovoltaico de 4,8 kWp e foram analisados 10 inversores de diferentes fabricantes (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

Os inversores utilizados atualmente quanto ao modo de comutação foram divididos em duas categorias, autocomutados que funcionam como fonte de tensão e fonte de corrente, e os inversores comutados pela rede (somente como fonte de corrente). Os comutados também só podem ser utilizados em aplicações conectados à rede (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013). A Figura 8 apresenta um fluxograma de classificação dos inversores a partir do princípio de operação.

Figura 8 - Classificação de inversores por princípio de operação



Fonte: Rampinelli, Krenzinger e Romero (2013, p.29)

A Tabela 1 mostra as características técnicas dos 10 inversores que foram usados nos ensaios, sendo cinco de tecnologia SMA, três Fronius e dois de tecnologia Mastervolt. Foi utilizado um analisador de potência Fluke 434 junto na bancada de testes (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

Tabela 1 - Características técnicas dos inversores

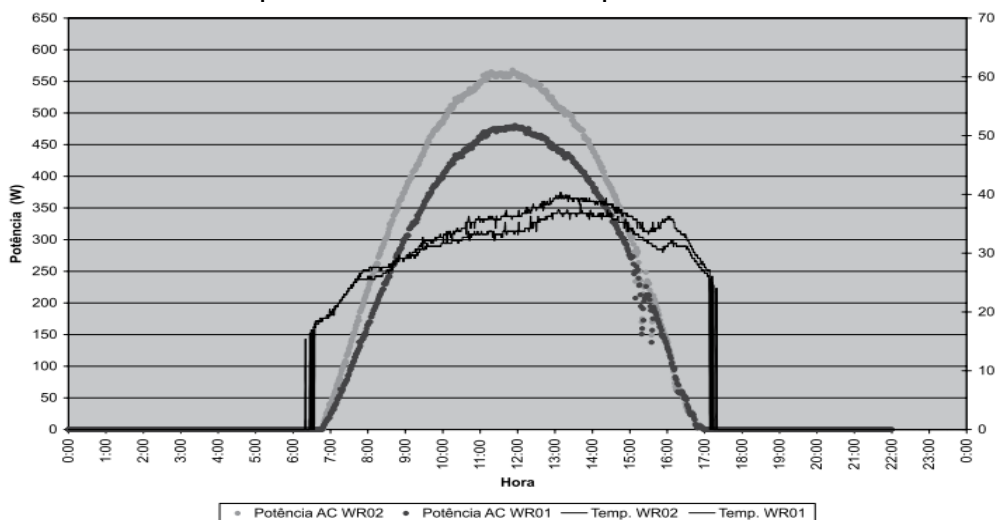
Fabricante	Modelo	P_{CC} (kW)	P_{CA} (kW)	V_{CC} Máx.	Topologia (Transformador)
SMA	SB 700U	0,780	0,700	250	Baixa frequência
SMA	SB 1100E	1,100	1,000	400	Baixa frequência
SMA	SB 2100	2,000	1,900	600	Baixa frequência
SMA	SB 2500	2,480	2,300	600	Baixa frequência
SMA	SB 3800U	4,040	3,800	500	Baixa frequência
Fronius	IG 15	1,400	1,300	500	Alta frequência
Fronius	IG 20	1,940	1,800	500	Alta frequência
Fronius	IG 30	2,690	2,500	500	Alta frequência
Mastervolt	QS 2000	1,700	1,600	450	Alta frequência
Mastervolt	QS 3200	2,750	2,600	450	Alta frequência

Fonte: Rampinelli, Krenzinger e Romero (2013, p.40)

Pode-se também citar um estudo de caso realizado em um SFCR instalado em Tubarão, Santa Catarina, na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com potência instalada de 1,4 kWp, com 11 painéis da UNI-SOLAR ligados em paralelo e dados registrados pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR) durante o ano de 2004. Como cada painel tem potência nominal de 128Wp, o arranjo ligado ao inversor WR01 teria capacidade nominal de 640Wp enquanto o arranjo do inversor WR02 teria capacidade nominal de 768 Wp, superando o limite máximo nominal do inversor. Dessa forma, a depender principalmente da radiação solar incidente, foi possível observar o fenômeno de limitação da potência máxima de saída (PEREIRA;

GONÇALVES, 2008). Utilizando os dados de um dia normal de operação, é possível analisar as curvas de potência de saída dos inversores e temperatura, ilustradas na Figura 9.

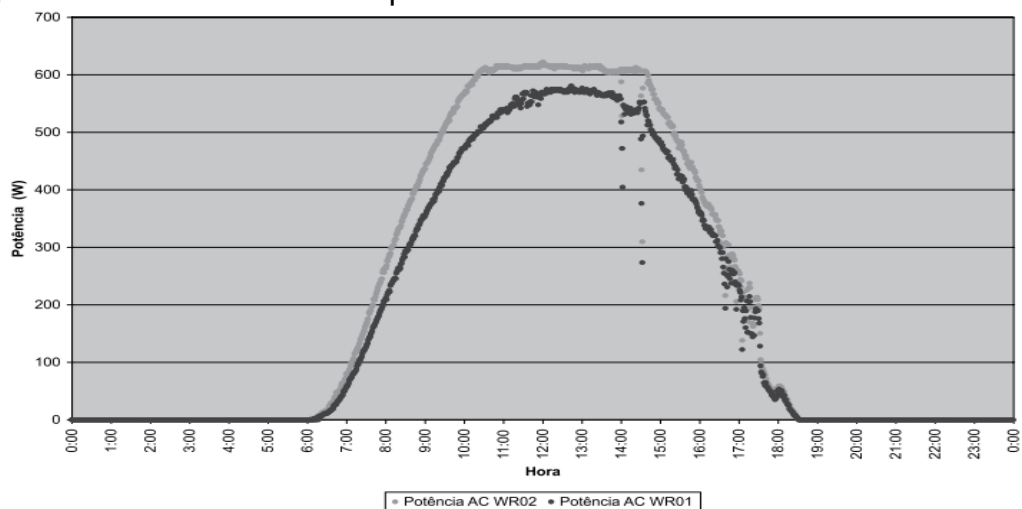
Figura 9 - Curvas de potência de saída e temperatura dos inversores



Fonte: Pereira e Gonçalves (2008, p.36).

Usando dados de um dia que o gerador fotovoltaico gerou em situação de pico observou-se o fenômeno da limitação de potência máxima de saída do inversor WRO2, na qual percebe-se que a curva apresentou o topo ceifado conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Curva de saída de potência dos inversores

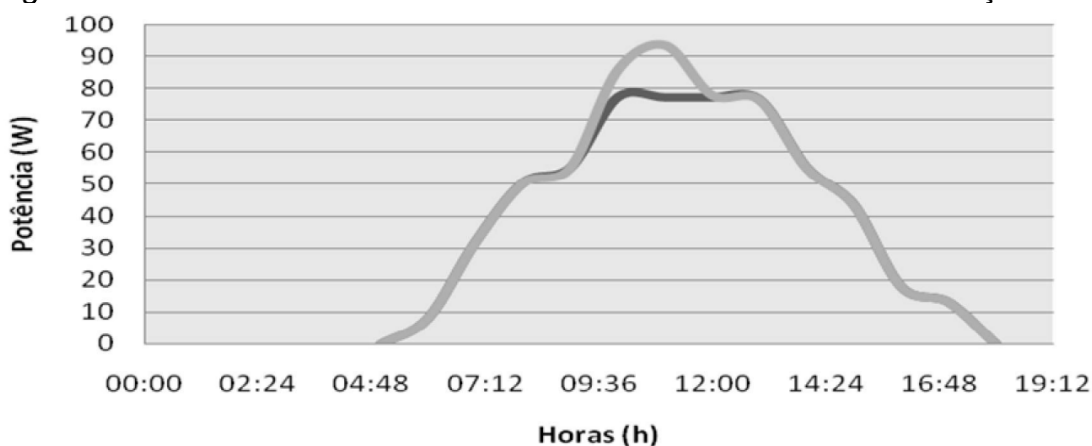


Fonte: Pereira e Gonçalves (2008, p.37)

O trabalho de (COSTA, 2010) efetuou uma avaliação do FDI para sistemas fotovoltaicos conectados à rede usando dados de um sistema localizado na cidade de Fortaleza, no primeiro caso usando a energia gerada e no segundo caso pela viabilidade econômica. Para calcular a disponibilidade de energia da localidade foi usado o software RADIASOL desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul que disponibiliza as curvas de irradiação (COSTA, 2010).

No primeiro caso usando os dados do software RADIASOL o painel solar produziu uma energia média de 0,444 kWh, com uma potência instalada de 90Wp. Da mesma forma foi possível encontrar os valores médios do menor e do maior mês de irradiação maio (60W), e setembro (77W), assim a potência nominal necessária para que o inversor processe toda potência recebida deve ficar entre $60W < P_{inv} < 77W$. Desta forma escolhendo a potência de 77W o inversor terá um FDI de 0,86 (COSTA, 2010). A Figura 11 mostra uma análise diária da curva de potência de saída do gerador.

Figura 11 – Potência de saída do inversor com e sem efeito de saturação

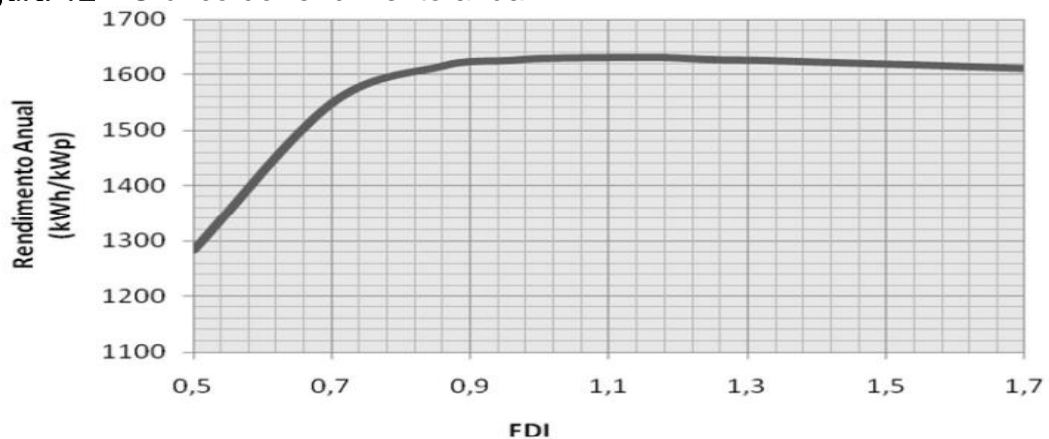


Fonte: Costa (2010, p.42)

Analisando a Figura 11 pode-se observar o efeito de corte de potência do inversor, isso ocorreu pelo fato do sistema de painéis fotovoltaicos ter gerado uma potência maior que 77W, ultrapassando o limite de potência do inversor. Fazendo uma análise anual verificou-se que o sistema deixou de gerar 1,25% de energia por ter utilizado o sistema com FDI de 0,86 (COSTA, 2010).

Com base nos dados de rendimento anual (COSTA, 2010), apresenta o gráfico em função do FDI, mostrado na Figura 12. Pode-se observar que o FDI de 0,9 gera um maior rendimento anual (COSTA, 2010).

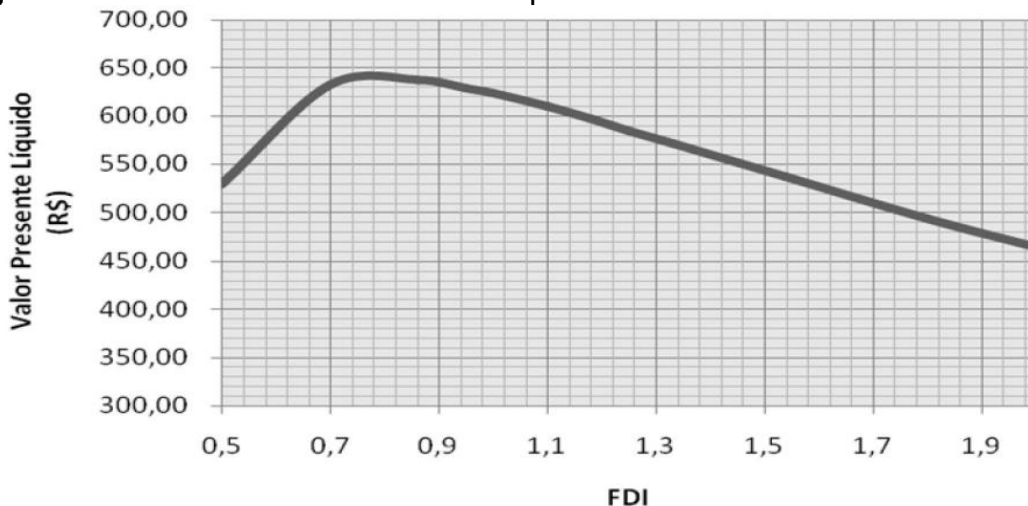
Figura 12– Gráfico do rendimento anual



Fonte: Costa (2010, p.45)

No segundo caso, observa-se que pelo lado econômico é possível obter a escolha do inversor com o objetivo de reduzir o custo inicial do sistema. Costa (2010) avaliou através do cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), o qual permite observar o melhor custo/benefício do projeto. Usando os parâmetros financeiros em função de FDI, Costa (2010) apresenta o resultado mostrado na Figura 13. Neste caso, o FDI que gera uma maior viabilidade econômica é de 0,86 (COSTA, 2010).

Figura 13–Gráfico do valor Presente Líquido



Fonte: Costa (2010, p.46)

Analisando a Figura 12 e a Figura 13, pode-se encontrar o FDI do inversor que terá um melhor rendimento anual e uma boa atratividade financeira. Observando a Figura 12 o FDI de 0,9 resultou em um rendimento anual máximo e praticamente

constante. No entanto, ao utilizar uma FDI maior que 0,9 o VPL começa a diminuir, a atratividade financeira (COSTA, 2010). Contudo, o FDI de 0,9 é o que fará o inversor operar com melhor rendimento e trará a melhor atratividade econômica.

Com base na revisão técnica de dimensionamento dos estudos apresentados, a Tabela 2 mostra um resumo dos métodos usados por cada sistema, com a análise de custo empregada, objetivo e melhor faixa de FDI encontrada.

Tabela 2 - Comparação dos métodos utilizados na literatura

Trabalho	Técnica	Análise de Custo Energia Gerada	Objetivo	Melhor Faixa do FDI
(PAIVA, Gabriel Mendonça,2015).	Variações de 0° a 90° de inclinação e -90° a +90° de ângulo do gerador fotovoltaico	Foi usado, obtendo um retorno entre 7,88% a 9,66% mais rápido o investimento	Otimizar o FDI para diminuir o tempo do retorno do investimento	0,54 a 0,77 Dependendo da inclinação e orientação usada
(RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).	Análise teórica e experimental usando 10 inversores de diferentes fabricantes	Não foi realizado nesse trabalho	Compreensão do processo de interação entre o arranjo fotovoltaico e o inversor	Não foi utilizado o FDI
(PEREIRA; GONÇALVES, 2008).	Subdimensionar o inversor usado no SFCR	A energia que deixou de ser gerada é aproximadamente 0.04% da energia total gerada	Observar as perdas de energia no sistema com inversor subdimensionando	Em torno de 0,85
(COSTA, 2010)	Software RADIASOL para geração das curvas de irradiação	Pelo cálculo do VPL foi observado o melhor custo/benefício	Encontrar o inversor que opere com um ótimo rendimento e tenha um bom estímulo financeiro	0,9

Fonte: Elaborado pelo autor

2.2 Conceitos de Fatores

2.2.1 Fator de dimensionamento do inversor

O FDI representa a razão entre a potência nominal do inversor e a potência nominal ou potência de pico do gerador fotovoltaico. Deve ser avaliado de acordo com o local de operação do sistema, uma vez que regiões mais quentes e com índices de radiação elevados tendem a exigir uma maior utilização do inversor. O FDI é utilizado para uma otimização do sistema, baseada no custo/benefício com o a intenção de compensar perdas de potência entre o arranjo dos módulos e inversor.

Os fabricantes recomendam uma faixa de FDI entre 0,75 e 0,85 nas Condições Padrões de Teste (do inglês, *Standart Test Conditions* (STC) do sistema fotovoltaico (COSTA, 2010). O FDI é dado pela potência nominal do inversor, pela potência instalada dos arranjos fotovoltaico, dado pela Equação 1 (PAIVA, 2016).

$$FDI = \frac{PN_{ca}}{P_{STD}} \quad \dots(1)$$

Onde:

PN_{ca} é a potência nominal em corrente alternada do inversor, em W.

P_{STD} é a potência do arranjo fotovoltaico na condição padrão, em Wp.

2.2.2 Índices de mérito

Os índices de mérito são cálculos que permitem analisar, de forma peculiar, as características de cada sistema fotovoltaico. O desempenho de um SFCR é verificado através de comparações entre seus valores de geração de energia, potência instalada e irradiação incidente, determinados através dos índices de mérito, em relação aos sistemas distintos de outras localidades (ARAÚJO; RANK; BUENO, 2016).

O Fator de Produtividade (YF) é a relação da energia gerada (kWh) também expressa pela integral da potência entregue ao sistema em um dado tempo medido por (kW) e a potência instalada (kWp) de cada módulo fotovoltaico do sistema (MACHADO; CORREA, 2015). Esse índice está vinculado a um intervalo de tempo e quando calculado para um ano, a Equação 2 define esta grandeza.

$$YF = \frac{\int_0^T P(t)dt}{PN} = \frac{\text{Energia}}{\text{potência instalada}} \quad \dots(2)$$

Onde:

$P(t)$ é a potência entregue pelo sistema no instante t , em kW.

PN é a potência nominal do sistema, em KWp.

T é o período de integração em número de dias equivalente ao tempo analisado.

O YF é a energia produzida no sistema no que diz respeito ao seu tamanho, conseqüentemente é uma maneira de comparar energia produzida pelos sistemas fotovoltaicos de tamanhos diferentes (MACHADO; CORREA, 2015) .

A Taxa de Desempenho (PR, *Performance Ratio*) é a relação entre a produtividade (kWh/kWp) e a quantidade de horas de sol a 1000W/m² incidentes no painel FV, normalmente vinculada a um ano de operação (MACHADO; CORREA, 2015). A PR de um sistema pela Equação 3.

$$PR = \frac{Y_F}{H(t) / G_{ref}} \quad \dots(3)$$

Onde:

$H(t)$ representa a irradiação no plano , dado em kWh/m².

G_{ref} representa a irradiância em condições normais, 1kW/m².

YF representa o fator de produtividade.

De outra forma pode-se também dizer que este valor representa o desempenho descontando as perdas existentes no sistema tais como: perdas nos inversores, nas conexões, e principalmente perdas devido à elevação da temperatura nos módulos em função da temperatura ambiente, entre outras perdas.

O Fator de Capacidade (FC), é o índice em percentagem que representa a capacidade de gerar energia sobre a energia nominal em um intervalo de tempo, normalmente o total de horas em um ano. Com o FC é possível realizar a comparação das diferentes fontes de energia e suas gerações. Nota-se que há uma relação entre o fator de capacidade e a produtividade, e esta relação é direta, dada pela Equação

4, ou seja, obtendo o valor da produtividade obtém-se o valor do FC (MACHADO; CORREA, 2015).

$$FC = \frac{\int_0^T P(t)dt}{P_n \times T} = \frac{Y_{F(h)}}{8.760h} = \frac{\text{Energia}}{\text{Potência} \times \text{Tempo}} (\%) \quad \dots(4)$$

O FC é afetado por fatores que ocasionam perdas no sistema, por exemplo, por acúmulo de sujeira nos painéis que diminuem a captação da radiação solar, sendo assim diretamente afetado pela irradiância. No Brasil, esse fator está comumente entre 13% e 18%, variando de acordo com tecnologias utilizadas e disponibilidade do recurso solar (MACHADO; CORREA, 2015).

2.3 Considerações finais do capítulo

Para um sistema fotovoltaico conectado à rede, a configuração com *strings* é a mais utilizada, por aumentarem a confiabilidade do sistema e da eficiência energética. Há várias técnicas para um melhor dimensionamento do inversor, e encontrar o FDI que trará a melhor condição de produção do sistema.

Os índices de mérito, são importantes para avaliar e comparar sistemas independentes da região, intervalo a tempo, tamanho do sistema e temperatura.

3 DIMENSIONAMENTO DE INVERSORES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Nesse capítulo estão abordadas as características do inversor, o seu dimensionamento e função em um SFCR, os métodos de análise e limites do inversor operando sem e com saturação.

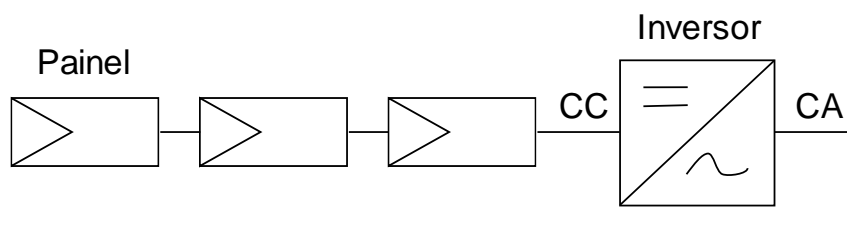
3.1 Inversor

No sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição, o inversor é o elo entre os módulos fotovoltaicos e a rede elétrica, o qual tem a função de transformar a CC em CA, já que os módulos fotovoltaicos geram uma tensão em CC, como apresenta a Figura 14. O inversor também é responsável por colocar o sistema em sincronismo com a rede elétrica. Além disso, o inversor possui uma função de desligamento automático na ausência de energia da rede elétrica evitando o fenômeno conhecido como “ilhamento” (MACHADO; CORREA, 2015).

Através do controle da corrente e tensão no lado CC, o inversor consegue realizar o Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT), onde esse sistema é capaz de fazer ajustes para manter os módulos FV operando perto do seu ponto de maior potência, que varia de acordo com a radiação solar incidente e com a temperatura.

Atualmente já existem inversores com eficiência de até 97% que se tornam economicamente viáveis para vários tipos de sistemas (MACHADO; CORREA, 2015).

Figura 14 - Diagrama elétrico do SFCR.



Fonte: Elaborado pelo autor

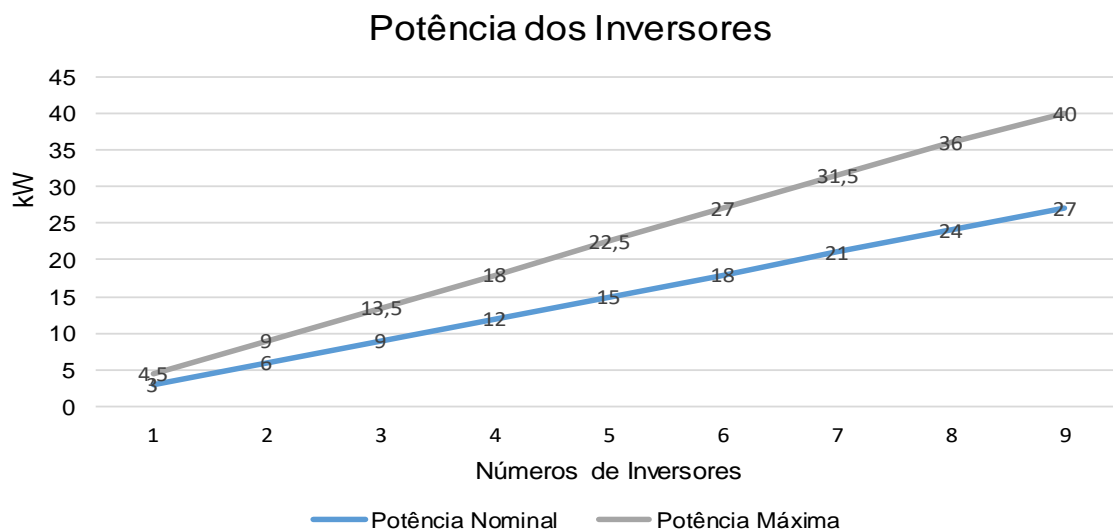
3.2 Limites de Operação do Inversor

Cada modelo de inversor tem sua potência nominal e sua potência máxima estabelecida pelo fabricante. Após o dimensionamento do sistema fotovoltaico, a

potência nominal do inversor usado deve ser compatível com a potência produzida pelos módulos fotovoltaicos, onde a potência nominal do inversor já vem indicada pelo fabricante. Normalmente, a eficiência do inversor atinge facilmente valores acima de 95%, dependendo da marca e modelo, e também da potência de operação do mesmo.

Na Figura 15 pode-se observar as potências máxima e nominal do inversor Fronius Primo 3.0-1 para diferentes quantidades de inversores.

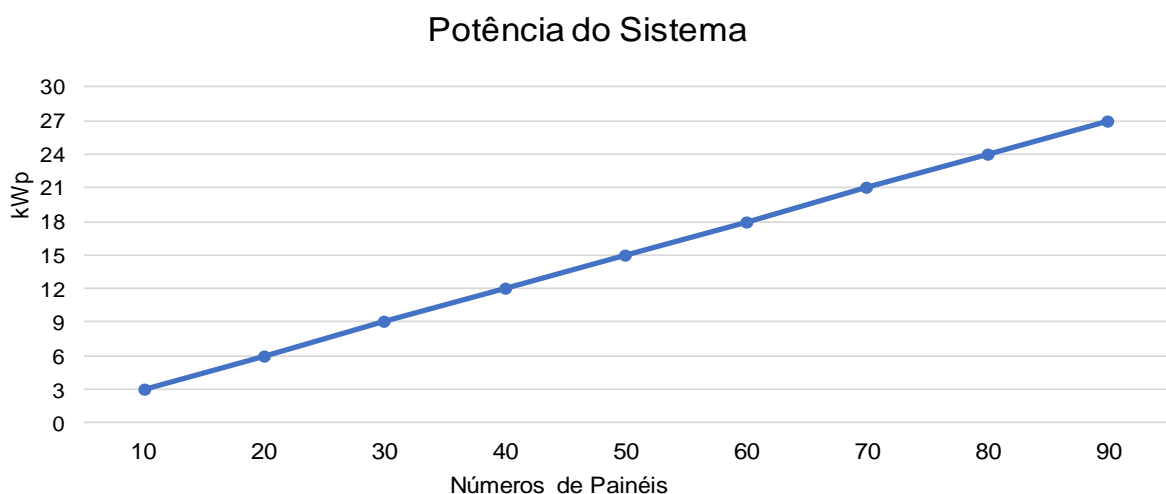
Figura 15 – Gráfico potência nominal e potência máxima para números de inversores



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 16 pode-se observar a potência dada em kWp de alguns arranjos fotovoltaicos, considerando cada módulo fotovoltaico com potência de 300 Wp.

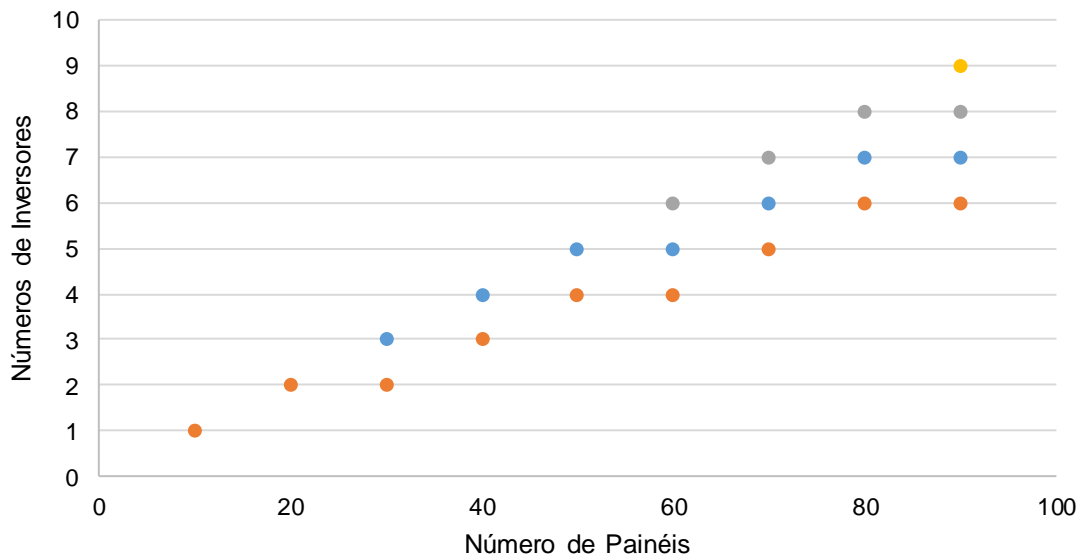
Figura 16 - Gráfico potência dos arranjos fotovoltaicos



Fonte: Elaborado pelo autor

Um sistema fotovoltaico deve respeitar o limite de operação do inversor especificado pelo fabricante. Subdimensionando o inversor e dependendo da potência do gerador fotovoltaico pode-se obter mais de uma opção para dimensionar um sistema fotovoltaico. Na Figura 17 são apresentados os números de inversores em função do número de painéis fotovoltaicos, considerando o inversor Fronius Primo 3.0-1 e painéis fotovoltaicos de 300 Wp. Nesta relação pode-se observar que um arranjo com 60 painéis tem-se três opções: (i) considerando o sistema subdimensionado pode-se operar com 4 ou 5; e (ii) sem subdimensionar o inversor pode-se operar com 6 inversores, onde a potência nominal do conjunto de inversores é igual à do arranjo de painéis fotovoltaicos

Figura 17 - Número de inversores por arranjo de painéis



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Métodos de Análise

De posse dos dados apresentados na Figura 16 e na Figura 17, é apresentado o exemplo de um sistema fotovoltaico com 30 painéis de 300 W cada. No primeiro caso, usando um inversor de potência nominal de 3 kW em condições normais de operação, a Equação 5 mostra o cálculo do número de inversores.

$$Ni_{m\acute{a}x} = \frac{PT}{Pi_{nom}} = \frac{9kWp}{3kW} = 3 \quad \dots(5)$$

Onde,

PT é a potência do arranjo dos painéis fotovoltaicos dado em kWp.

Pi_{nom} é a potência nominal do inversor dada em kW.

Dessa maneira, o sistema com potência geradora de 9 kW precisará de 3 inversores funcionando em condições normais, ou seja, sem que haja saturação do mesmo, com FDI neste caso resultando em 1.

No segundo caso, usando a mesma potência em painéis de 9 kW, mas com inversor no limite de potência de 4,5 kW, obtém-se o mínimo de inversores a serem utilizados conforme apresentado na Equação 6.

$$Ni_{min} = \frac{PT}{Pi_{máx}} = \frac{9kW}{4,5kW} = 2 \quad \dots(6)$$

Onde,

PT é a potência do arranjo dos painéis fotovoltaicos dado em kW e

$Pi_{máx}$ é a potência máxima do inversor dada em kW

Com o inversor sendo usado no limite máximo de potência pode-se observar que o número de inversores diminui para 2 neste modelo de sistema. Assim, uma condição do limite do número de inversores deve ser garantida para que o sistema opere dentro dos limites de potência do inversor, dada pela Equação 7:

$$Ni_{min} \leq Ni \leq Ni_{máx} \quad \dots(7)$$

Onde Ni representa o número de inversores, que deve ser maior ou igual ao número mínimo de inversores (Ni_{min}) e menor ou igual ao número máximo de inversores ($Ni_{máx}$).

3.4 Exemplo numérico da metodologia

Para analisar o caso de subdimensionamento do inversor, visando uma economia no projeto do SFCR, foi desenvolvida a análise de custo inicial de implantação do sistema através do software EXCEL. Considerado um número de 60 painéis fotovoltaicos de 300 W cada, pode-se dimensionar o número de inversores

que o sistema precisa para operar com sua potência nominal, ou com a potência máxima (sistema saturado). Usando os dados de uma curva de geração de um dia completo sem a ocorrência de sombreamentos, pode-se calcular a energia gerada pelo inversor com potência nominal e saturado.

Com a energia gerada pode-se obter a relação da Energia/Custo (kWh/R\$) dos painéis e inversores instalados no sistema. Desta forma, obtém-se o custo total do sistema com inversor funcionando com potência normal ou no limite de potência. Estes dois casos analisados utilizam os dados de custo e de potência apresentados na Tabela 3.

Para fazer a análise do sistema foi usado o inversor da marca Fronius, eleita a melhor fabricante de inversores do Brasil em 2017 pelo Congresso Brasileiro de Geração distribuída (CBGD).

Tabela 3 - Dados dos componentes do sistema

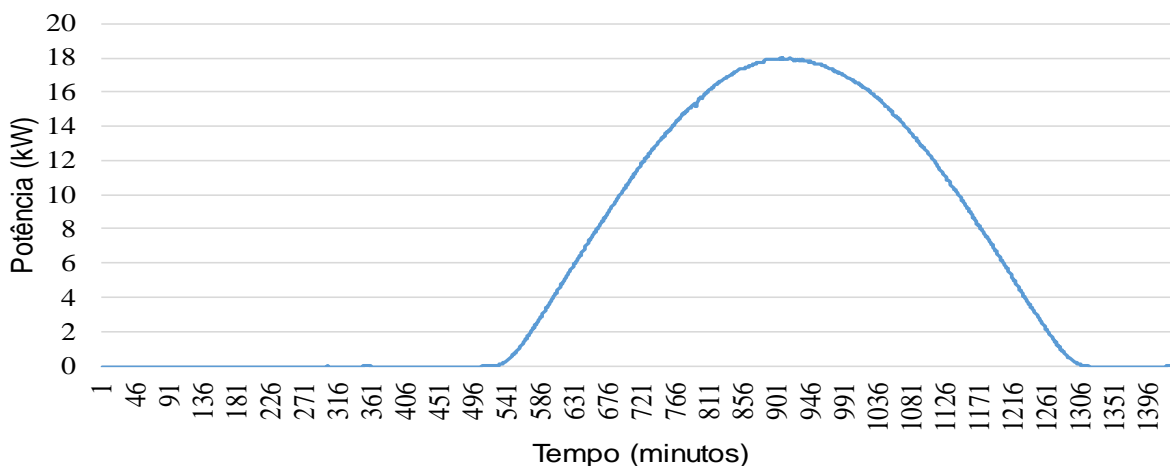
Modelo	Potência	Custo Unitário
Painel (Canadian)	300,00 W	R\$702,00
Inversor Fronius Primo 3.0-1	Nominal 3,00 kWp Máxima 4,5 kWp	R\$8.000,00

Fonte: Elaborado pelo autor

3.4.1 Análise do sistema sem saturação

Este sistema é composto por 6 inversores Fronius de 3 kWp de potência nominal, dimensionados para 60 módulos fotovoltaicos. Como cada painel tem potência nominal de 300 W, o arranjo total do sistema tem capacidade nominal de geração de 18 kWp. Usando dados da energia produzida na saída dos inversores de um dia completo foi possível obter a curva de geração do sistema, apresentados na Figura 18, observando o topo da curva como a potência máxima gerada no dia

Figura 18- Curva de saída de potência do inversor não saturado



Fonte: Elaborado pelo autor

A energia é calculada como sendo a soma de todos os valores de potência, assim, neste caso chega-se ao valor total da energia produzida de 139,16 kWh. Usando o valor total da energia produzida e dividindo pelo custo dos painéis e inversores obtém-se a relação energia/custo que resultou em 647,62 kWh/R\$, já o custo inicial dos componentes do projeto (módulos e inversores) é R\$90.120,00. Para uma análise mais completa dos custos do sistema os principais dados foram organizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados gerais do sistema não saturado

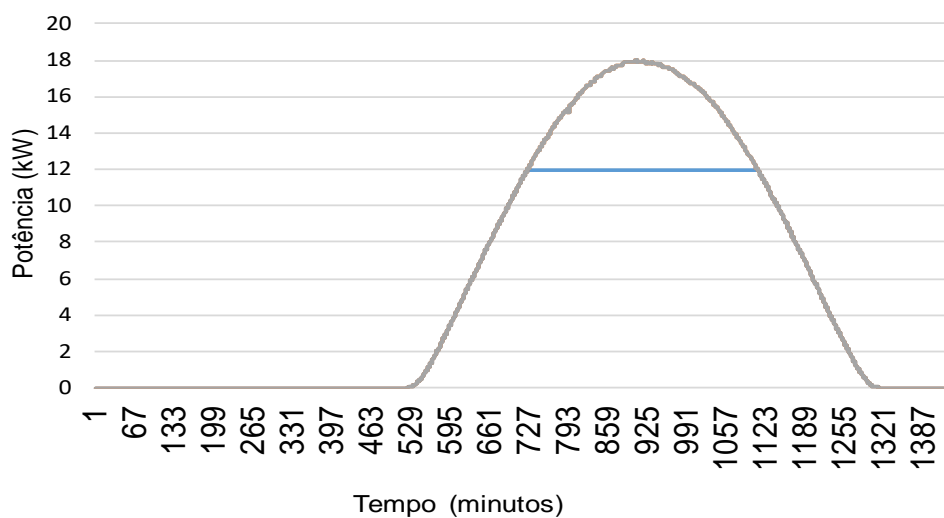
Número de Painéis	60
Potência Painéis	18,00 kWp
Números de Inversores	6
Potência Nominal Total dos Inversores	18,00 kW
Energia com 3 kW	139,16 kWh
FDI (kW/kWp)	1,00
Custo Total em Painéis	R\$42.120,00
Custo Total em Inversores	R\$48.000,00
Relação Custo/Energia (R\$/kWh) - Pannel	302,68 R\$/kWh
Relação Custo/Energia (R\$/kWh) - Inversores	344,94 R\$/kWh
Custo Total em Relação Custo/Energia	647,62 R\$/kWh
Custo Total dos Componentes	R\$90.120,00

Fonte: Elaborado pelo autor

3.4.2 Análise do sistema com saturação

Nesse segundo caso foram utilizados os mesmos 60 módulos fotovoltaicos com potência de 300 W cada, oferecendo uma capacidade de geração máxima de 18 kWp, mas com 4 inversores operando com potência máxima de 4,5 kW cada, com um total de 18 kW no limite máximo de saturação dos inversores. Com os mesmos dados de energia produzida no dia obtém-se a curva de potência saturada. A Figura 9 mostra o limite de operação do inversor com a saturação da curva.

Figura 19- Curva de saída de potência do inversor saturado



Fonte: Elaborado pelo autor

Com o subdimensionamento do sistema o valor da energia produzida pelo custo ficou em 650,37 R\$/kWh, e o custo inicial entre módulos fotovoltaicos e inversores é R\$74.120,00. A Tabela 5 traz a análise completa dos dados do sistema saturado.

Tabela 5 - Dados gerais do sistema saturado

Número de Painéis	60
Potência Painéis	18,00 kWp
Número de Inversores	4
Potência Nominal Total dos Inversores	12,00 kW
Energia com 4,5 kW Saturada	113,97 kWh
FDI (kW/kWp)	0,67
Custo dos Painéis	R\$42.120,00
Custo dos Inversores	R\$32.000,00
Relação Custo/Energia (R\$/kWh) - Painel	369,58 R\$/kWh
Relação Custo/Energia (R\$/kWh) - Inversores	280,79 R\$/kWh
Custo Total em Relação Custo/Energia	650,37 R\$/kWh
Custo Total dos Componentes	R\$74.120,00

Fonte: Elaborado pelo autor

3.4.3 Comparação entre os sistemas

Com base nos dados expostos nos tópicos anteriores é possível comparar o sistema operando com potência nominal e potência máxima. A relação do custo pela energia produzida teve um aumento muito pequeno do que o sistema que opera com potência nominal para o sistema operando saturado, sendo o saturado R\$74.120,00 e o não saturado R\$90.120,00. Já o custo dos componentes do sistema teve um aumento considerável de R\$16.000,00.

3.5 Considerações finais do capítulo

Os resultados do exemplo numérico demonstram que o sistema saturado apresentou um custo inicial menor que o sistema não saturado, com relação ao custo de painéis e inversores. Analisando a relação custo/energia total, o sistema não saturado se mostrou mais vantajoso, tendo um valor um pouco menor que o sistema saturado

4 RESULTADO

Nesse capítulo são apresentados os resultados de um estudo sobre subdimensionamento feito no sistema composto por 4 inversores FRONIUS ECO 27.0-3-S e com uma capacidade instalada de 126,4 kWp de potência. Nestes resultados são analisados o FDI, os índices de mérito, tais como fator de produtividade, fator de capacidade, através dos dados de produção extraídos das saídas dos inversores do sistema citado, e uma análise da geração diária e mensal.

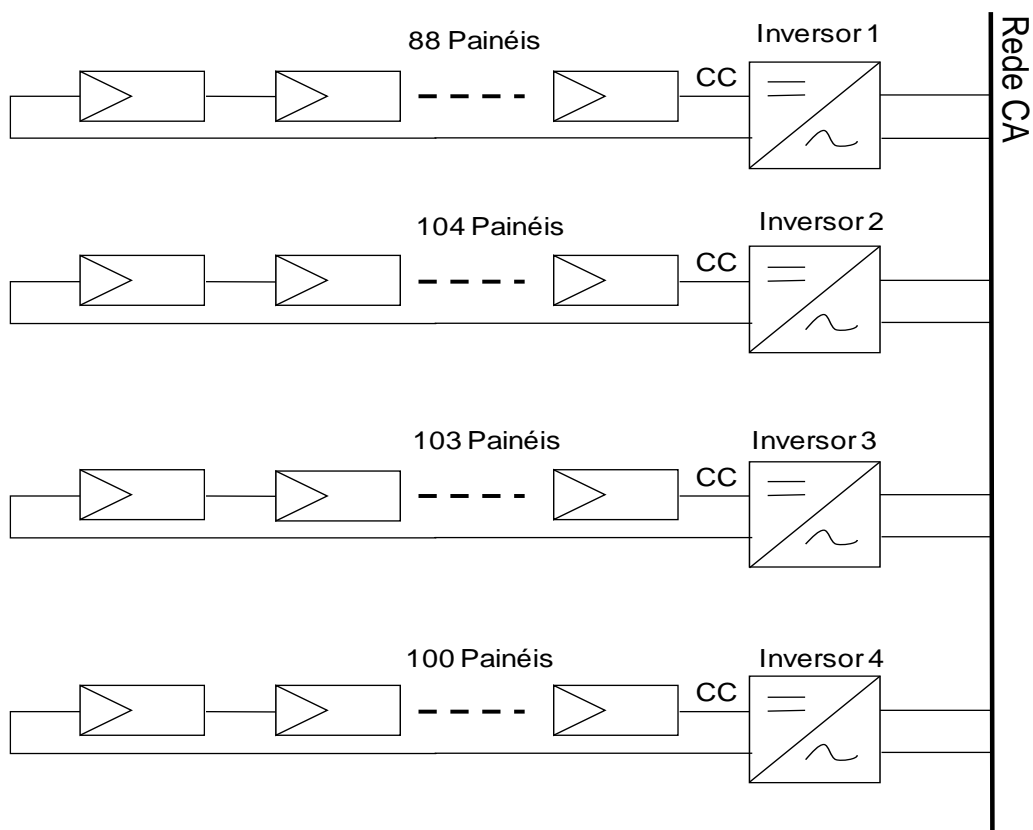
4.1 Descrição do Sistema

O sistema é composto por 4 inversores FRONIUS ECO 27.0-3-S com potência nominal cada um de 27 kW. No total são 395 módulos fotovoltaicos de Silício Policristalino de 320 W cada. O sistema tem uma potência total instalada de 126,4 kWp e pode ser visto na Figura 20. No inversor 1 há uma potência instalada de 28,16 kWp em módulos fotovoltaicos com total de 88 painéis, no inversor 2 foram instalados 104 painéis com potência total instalada de 33,28 kWp, o inversor 3 tem 103 painéis instalados gerando uma potência de 32,96 kWp e no inversor 4 são 100 painéis com 32 kWp instalados. A Figura 21 apresenta o diagrama do SFCR.

Figura 20 - SFCR instalado no telhado com 126,4 kWp de potência total



Figura 21 - Diagrama elétrico do SFCR



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Resultados do Sistema

Nesta seção são apresentados os seguintes resultados:

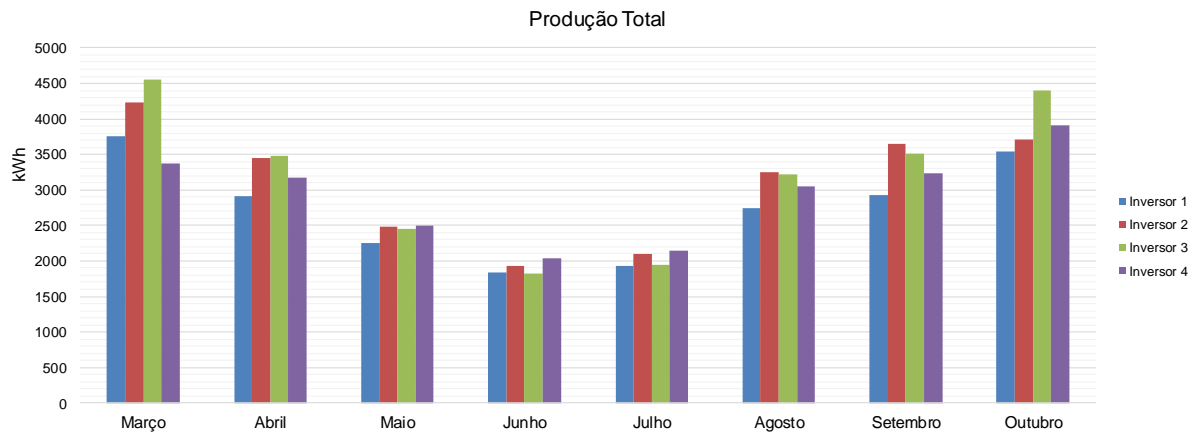
- FDI
- Índices de mérito
- Geração/kWh

Para análise dos resultados de geração do sistema foi realizada a coleta dos dados de energia produzida na saída dos 4 inversores FRONIUS ECO 27.0-3-S do SFCR retirados do site SolarWeb.

4.2.1 Geração mensal do sistema

O sistema entrou em operação em março de 2018, a Figura 22 mostra, a energia em kWh, em cada mês gerada até outubro de 2018.

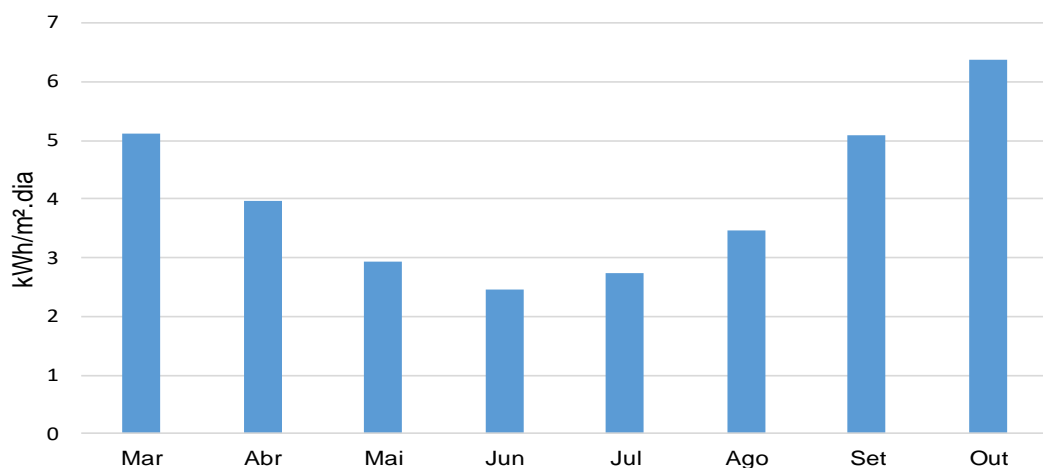
Figura 22 - Gráfico de energia produzida por cada inversor



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar a Figura 22 pode-se verificar que os meses de maior irradiação março e outubro os inversores produziram mais energia. Os dados de irradiação mostrados na Figura 23, foram retirados do site do Centro de Referências para a Energia Solar e Eólicas (CRESESB), através do programa Sundata usando a latitude e a longitude do local onde está instalado o sistema.

Figura 23 -Gráfico da irradiação solar diária média mensal



Fonte: Elaborada pelo autor

Comparando as Figuras 22 e 23 nota-se que a geração dos inversores acompanha o crescimento da irradiação de cada mês. Apesar disso, verifica-se na Figura 22 uma diferença entre a geração de energia de cada inversor, que se deve às características de potência instalada de cada inversor.

A Tabela 6 apresenta os valores produzidos por cada inversor nos meses de março até outubro.

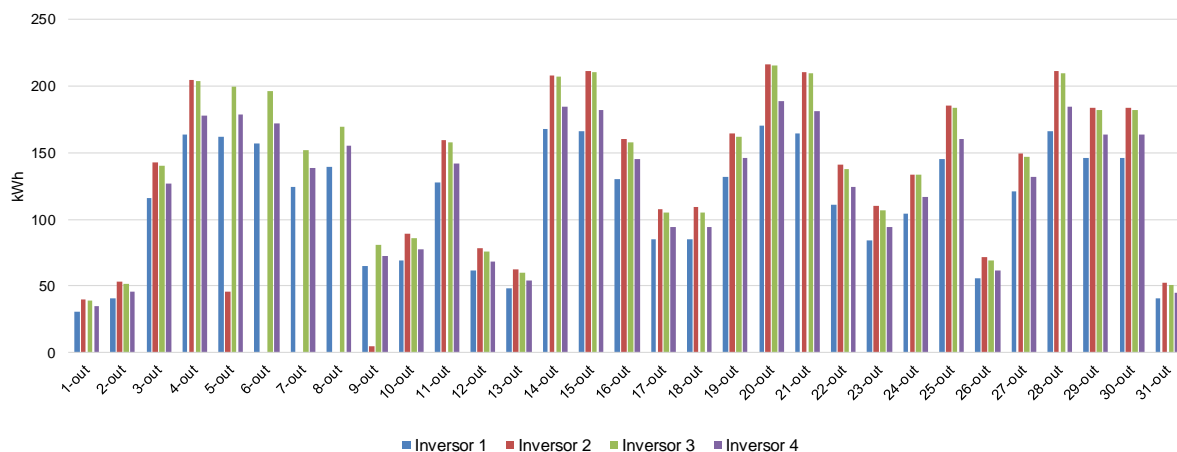
Tabela 6 – Valores de produção de cada inversor

	Produção (kWh)				Total (MWh)
	Inversor 1	Inversor 2	Inversor 3	Inversor 4	
Março	3757,52	4239,11	4552,8	3368,32	15,91775
Abril	2907,18	3454,88	3487,13	3174,94	13,02413
Mai	2254,23	2478,18	2457,47	2498,61	9,68849
Junho	1831,73	1926,85	1824,08	2039,69	7,62235
Julho	1932,82	2105,24	1943,13	2147,69	8,12888
Agosto	2738,04129	3255,97635	3221,12995	3044,80586	12,25995345
Setembro	2921,25087	3643,73381	3506,36326	3227,17982	13,29852776
Outubro	3537,18286	3705,329	4398,58464	3915,13856	15,55623506

Fonte: Elaborada pelo autor

Para uma análise de produção diária de cada inversor foi escolhido mês de outubro por ser um mês de ótima geração, a Figura 24 traz os valores de energia diário do sistema do mês de outubro.

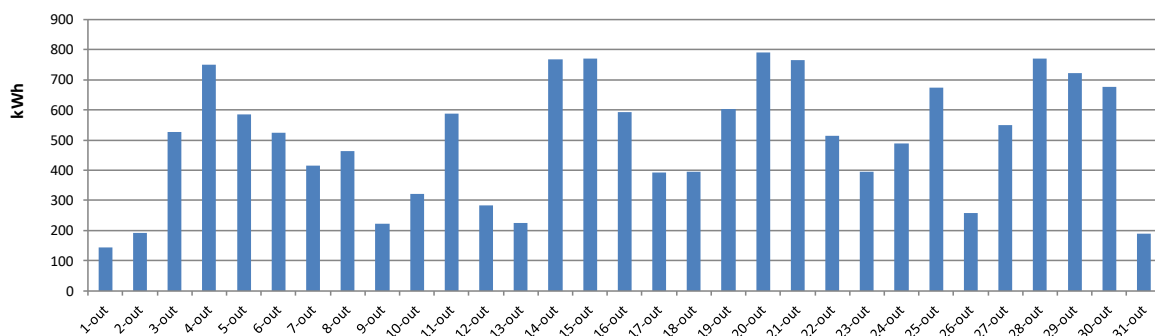
Figura 24 - Gráfico de geração mês de outubro de cada inversor



Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se analisar na Figura 24, que no dia 5 o inversor 2 parou de funcionar, voltando a produzir energia dia 9. Além disso pode-se observar que o inversor 2 e o inversor 3 produzem mais energia por ter uma potência instalada maior que o inversor 1 e o inversor 4. Na Figura 25 mostra a geração diária total no mês de outubro.

Figura 25 - Gráfico mensal de geração total do sistema no mês de outubro

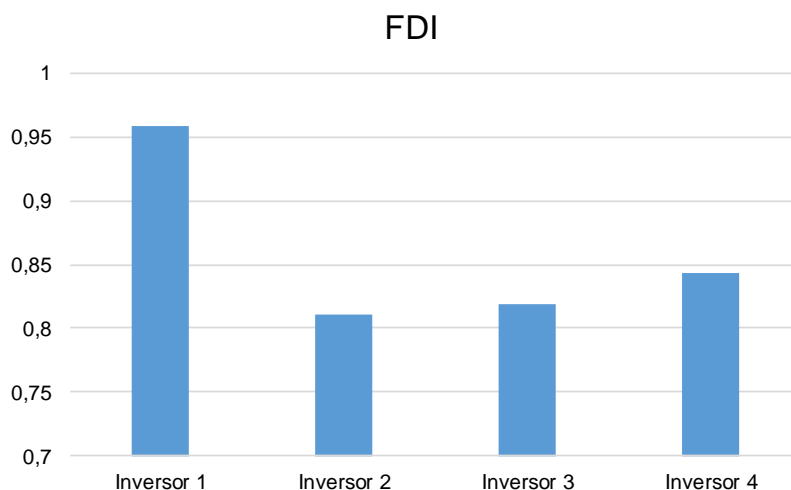


Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2 FDI e índices de mérito

A Figura 26 mostra o FDI de cada inversor, obtido a partir da Equação 1, que é a relação da potência nominal do inversor e potência instalada em módulos. Neste caso o inversor 1 tem um FDI de 0,96, com uma potência instalada de 28,16 kWp, enquanto o inversor 4 possui um FDI de 0,84, com potência instalada de 32 kWp, isso significa que como os inversores tem a mesma potência nominal, 27 kW, quanto maior a potência instalada, menor vai ser o FDI.

Figura 26 – Gráfico do fator de dimensionamento do inversor

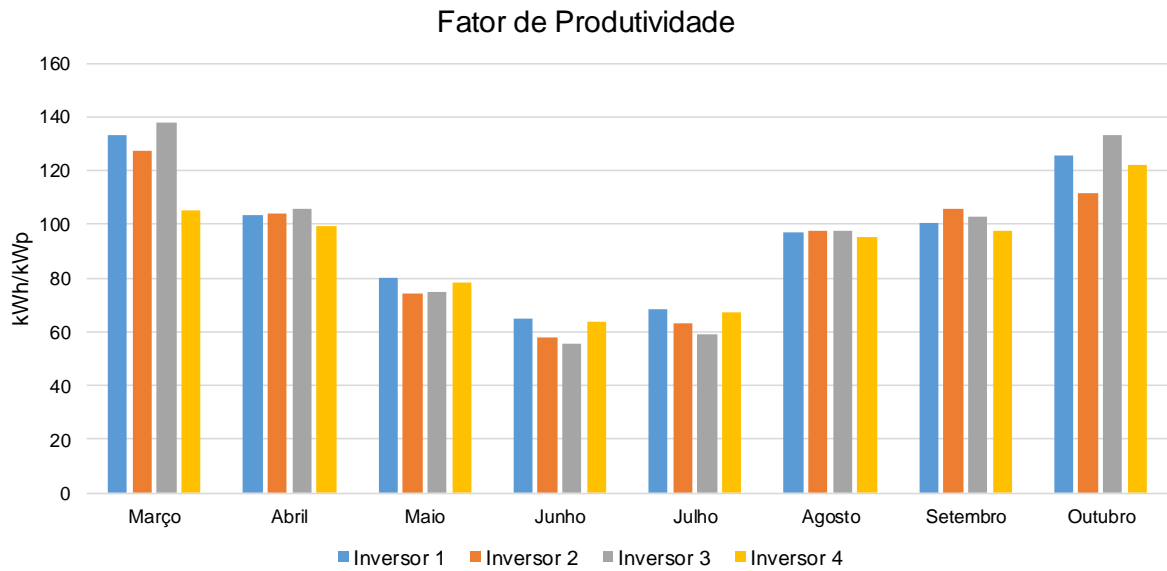


Fonte: Elaborada pelo autor

A partir dos dados da energia de saída de cada inversor e utilizando a Equação 2, foi possível obter os valores de produtividade de cada inversor do mês de março até outubro, como pode ser observado na Figura 27.

Neste resultado, observa-se que o fator de produtividade do inversor 3 é maior que os inversores 1, 2 e 4 no mês de março e menor nos meses de junho e julho, o que caracteriza, que nos meses de baixa geração, os inversores com FDI maior os possibilitam a gerar mais, e assim tenham um fator de produtividade maior.

Figura 27 – Gráfico do fator de produtividade

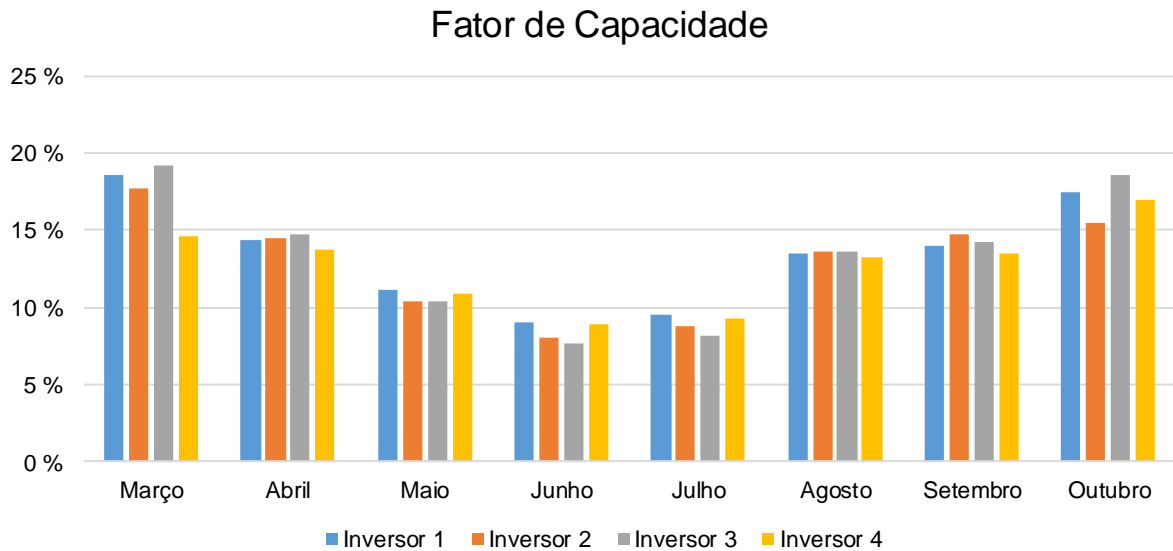


Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da Equação 4 pode-se calcular o fator de capacidade mensal de cada inversor, apresentado na Figura 28.

O mesmo vale para os resultados do fator de capacidade, nos meses de menor geração do sistema, o inversor 3, com menor FDI tem um valor de fator de capacidade menor que os inversores 1 e 4 que possuem um FDI maior.

Figura 28 – Gráfico do fator de capacidade



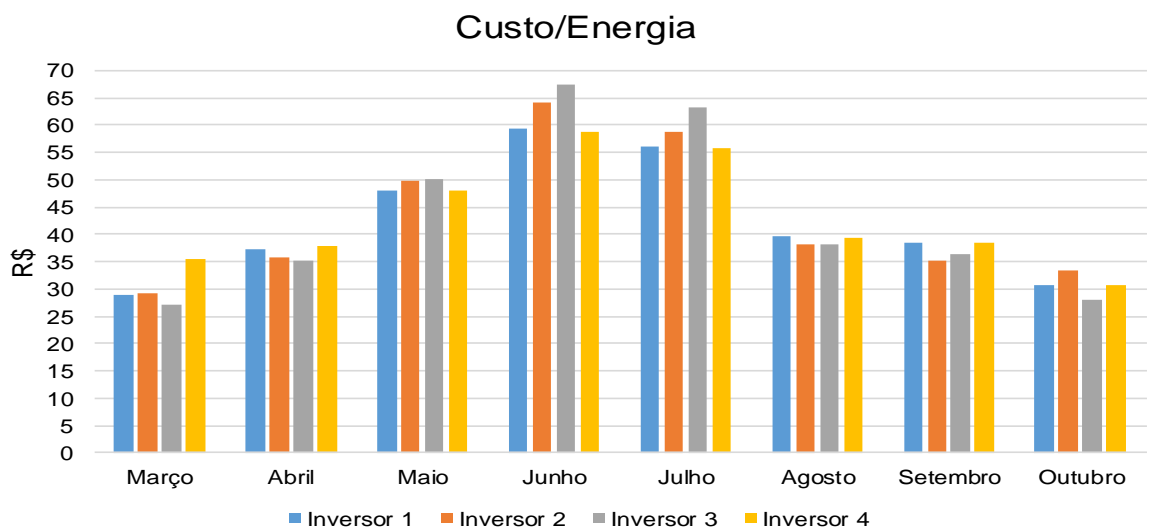
Fonte: Elabora pelo autor

4.2.3 Custo/Energia

Com os valores da energia produzida, e o custo dos painéis e inversores, pode-se obter uma relação de custo/energia, como pode ser observado na Figura 29.

Nesse resultado, observa-se que nos meses junho e julho, respectivamente os meses de menor produção do sistema, o custo/energia quase dobrou em relação aos meses de março e outubro, meses de maior produção.

Figura 29 – Gráfico da relação custo/energia

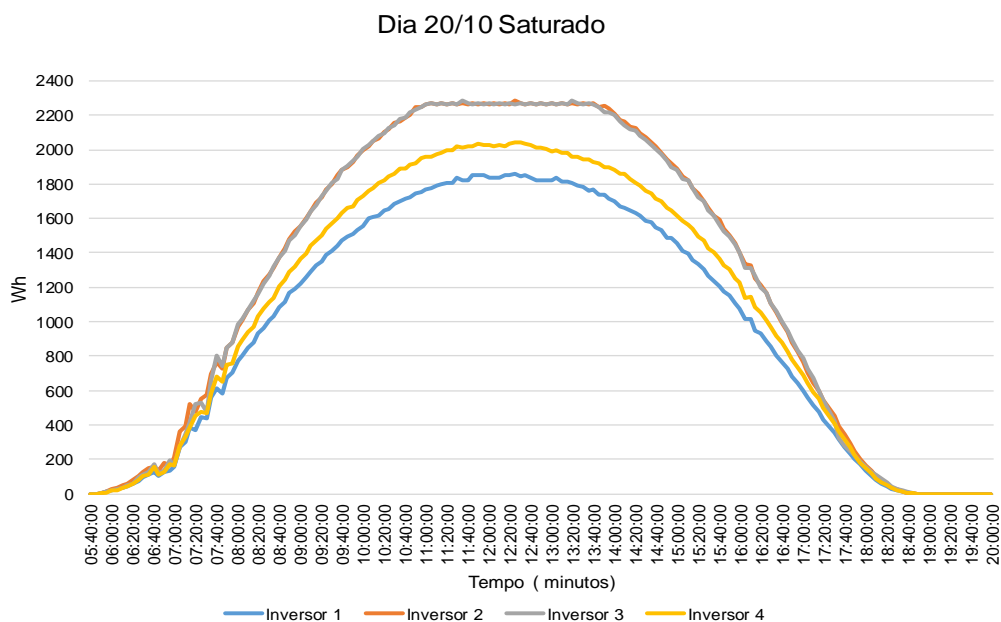


Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.3 Curvas diárias das condições saturada, não saturada e com dia nublado

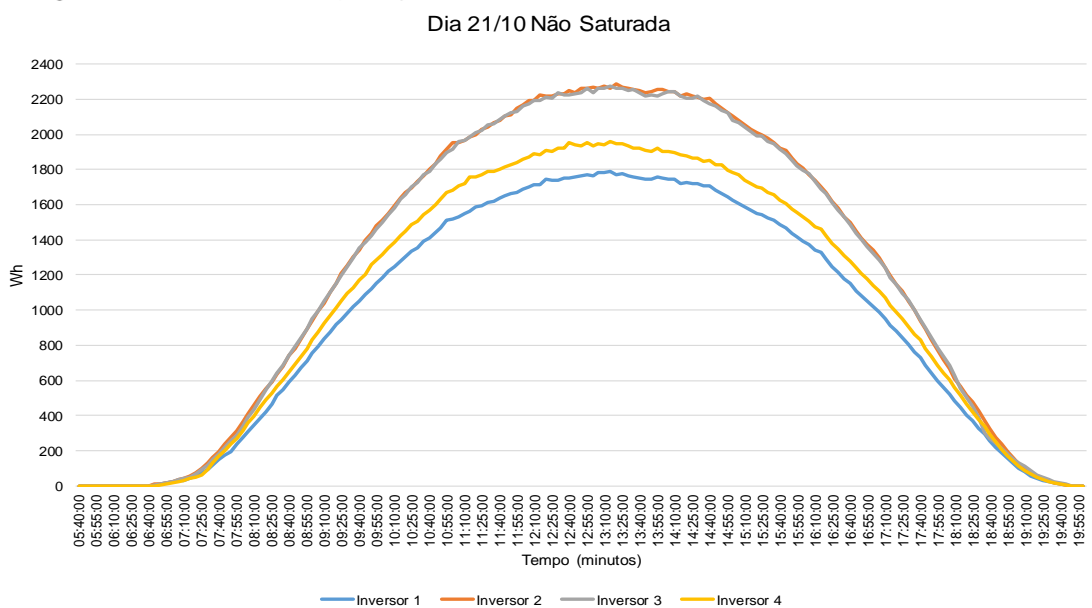
No mês de outubro pode-se observar as 3 condições no sistema, saturada (Figura 30), não saturada (Figura 31) e dia nublado (Figura 32). No dia que ocorreu o efeito de corte o inversor alcançou o valor máximo de geração de 2287,96 Wh.

Figura 30 – Curva de geração dia saturado



Fonte: Elaborado pelo autor

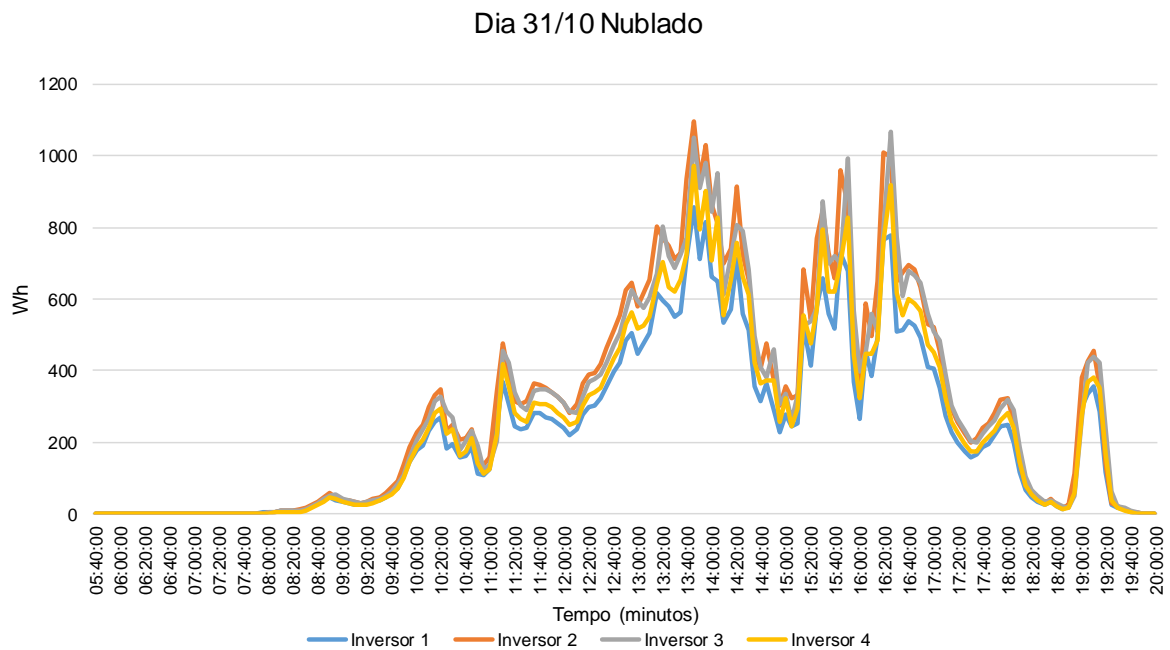
Figura 31 – Curva de geração dia não saturada



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 31 pode-se observar a curva de um dia 'perfeito' de geração, já a Figura 32 mostra a curva de geração cheia de variações.

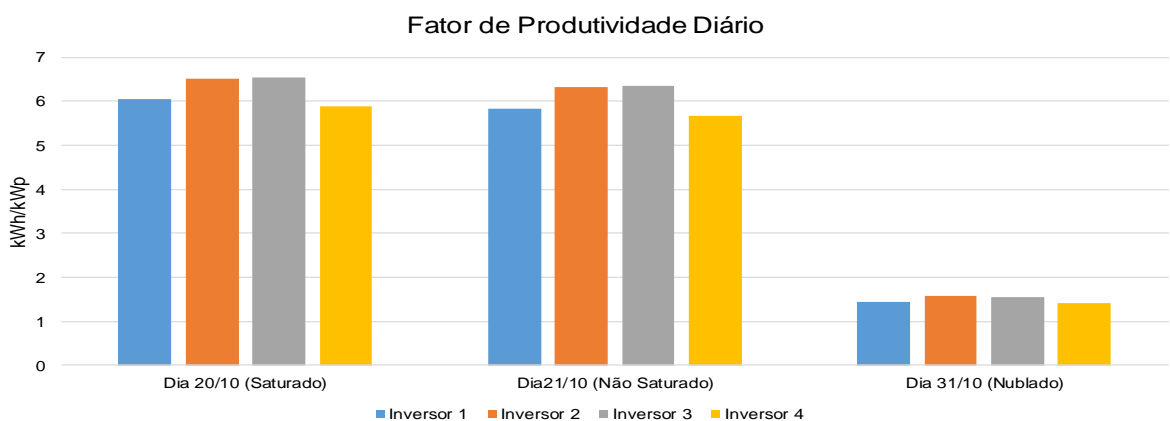
Figura 32 – Curva de geração dia nublado



Fonte: Elaborada pelo autor

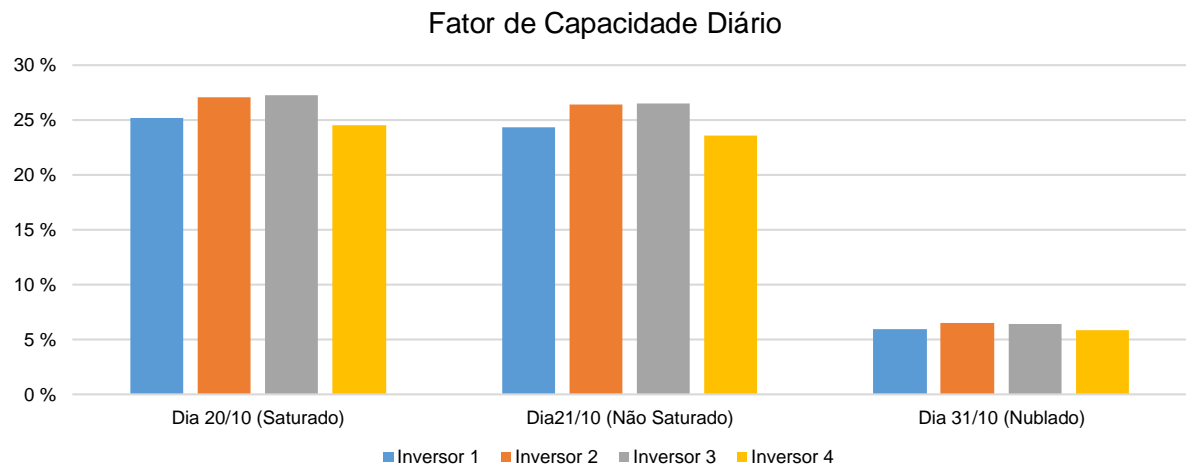
A partir das 3 condições foram gerados para cada inversor os gráficos do fator de produtividade, na Figura 33, e o do fator de capacidade, na Figura 34.

Figura 33 – Gráfico do fator de produtividade das 3 condições



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34 – Gráfico do fator de capacidade das 3 condições



Fonte: Elaborado pelo autor

Nos resultados da Figura 33 e 34, observa-se que os fatores de produtividade e capacidade nas condições “dia saturado” e “dia não saturado”, tem valores muito maiores que a condição dia nublado. Ainda vale ressaltar que a condição saturada tem valores pouco maiores que a situação não saturada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de conclusão de curso apresentou uma análise comparativa do fator de dimensionamento de inversores, e índices de mérito com objetivo de auxiliar no subdimensionamento do SFCR.

Após a análise de alguns casos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede da literatura, e a partir de uma abordagem teórica foi possível verificar que o FDI é muito importante para um SFCR, e que depende muito da localidade devido ao clima (radiação e temperatura). O subdimensionamento do inversor pode ser uma técnica usada para a diminuição do investimento inicial do projeto, visando um maior custo/benefício. Através do estudo dos casos foi possível visualizar que subdimensionando o sistema, o investimento inicial será menor por ter um número reduzido de inversores.

A metodologia apresentada nesse trabalho, estabeleceu uma análise a partir do recolhimento dos dados de produção da saída dos inversores do mês de março até outubro de 2018. Com os dados de irradiação média foi possível observar que nos meses de maior irradiação, março e outubro, o sistema gerou mais energia. Os inversores 2 e 3 são os que mais produziram energia, o inversor 2 tem uma potência instalada de 33,28 kWp, e o inversor 3 uma potência de 32,96 kWp, o inversor 3 tem um FDI de 0,82 sendo o inversor que apresenta a maior geração, o inversor com a menor geração foi o inversor 1 com FDI de 0,95, analisando o FDI dos inversores podemos relacionar que quanto menor o FDI, maior vai ser a geração do sistema.

A análise feita dos índices de mérito do sistema, mostraram que nos meses de maior geração, março e outubro, os inversores com FDI menor, tem um fator de produtividade excelente, mas nos meses de geração baixa, junho e julho os inversores com FDI maior tem um fator de produtividade melhor. No fator de capacidade observou-se que nos meses de junho e julho, meses de menor produção de energia, os inversores 1 e 4, com FDI maiores tiveram uma melhor porcentagem sobre os inversores 2 e 3, mas já nos meses de maior geração os inversores 2 e 3 tiveram um melhor fator de capacidade.

Assim o subdimensionamento do sistema tem sido utilizado para aumentar a potência extraída, reduzindo as perdas de potência. Neste caso, a instalação de uma potência de módulos fotovoltaicos superior à potência do inversor possibilita que o

inversor forneça uma maior potência que a nominal, que é limitada pela potência máxima ou potência de pico do inversor, a qual também é fornecida pelo fabricante.

5.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros a serem desenvolvidos sobre este tema, tem-se:

- Análise dos índices de mérito e do FDI para diferentes localidades do Rio Grande do Sul;
- Análise do FDI considerando o rendimento do sistema;
- Análise do FDI para diferentes potências de inversores;
- Análise do retorno econômico de diferentes valores de FDI.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Ana Júlia Nunes de; RANK, Narah luata; BUENO, Talita Bezerra de Araújo. **Análise dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba.** 2016. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Cap. 5.

COSTA, Higor José Serafim da. **Avaliação do fator de dimensionamento do inversor em sistemas fotovoltaicos conectados à rede.** 2010. 74 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010. Cap. 4.

CSR Energia <<http://www.csrenergiasolar.com.br/blog/sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-sfcr-on-grid>> Acesso em 10 de outubro de 2018

DESCONZI, Matheus Iensen. **Sistema Fotovoltaico autônomo utilizando configuração multi-string e inversor multinível.** 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011. Cap. 2.

MACÊDO, Wilson Negrão. **Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistema fotovoltaico conectados à rede.** 2006. 183 f. Tese (Doutorado) - Curso de Energia, Universidade de São Paulo Usp, São Paulo, 2006. Cap. 5.

MACHADO, Karla Suzane Van-dall; CORREA, Nicoli. **Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba.** 2015. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Cap. 4.

PEREIRA, Osvaldo L. S.; GONÇALVES, Felipe F.; Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: estudo de caso do sistema de Tubarão – SC. **Revista Brasileira de Energia**, [s.i.], v. 14, n. 1, p.25-45, jan. 2008.

RAMPINELLI, Giuliano Arns; KRENZINGER, Arno; ROMERO, Faustino Chenlo. Description and Analysis of Inverters Used in Photovoltaic Systems. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, [s.l.], v. 15, n. 1, p.26-50, jan. 2013. GN1 Genesis

PAIVA, Gabriel Mendonça de. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede a partir das características de inclinação e orientação dos painéis solares**. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Goiás Escola de Engenharia Elétrica Mecânica e de Computação, Goiânia, 2016.

PAIVA, Gabriel Mendonça de et al. ANÁLISE DO FATOR DE DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE COM USO DE MEDIÇÕES CLIMÁTICAS LOCAIS EM GOIÁS. **Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Belo Horizonte, v. 4, n. 1, p.1-9, abr. 2016.

PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CRESESB. 2014.