



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

STEFANY ALVES CARNEIRO

**PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE APLICADO A
UMA FÁBRICA DE RAÇÕES DO RAMO DE AVICULTURA**

FORTALEZA
2016

STEFANY ALVES CARNEIRO

PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE APLICADO A
UMA FÁBRICA DE RAÇÕES DO RAMO DE AVICULTURA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energias Renováveis do Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial
para obtenção do Título de Engenheiro de
Energias Renováveis

Orientador: Prof.^a Dr.^a Carla Freitas de
Andrade, Ph.D.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- C287e Carneiro, Stefany Alves.
Engenheiro de energias renováveis. / Stefany Alves Carneiro. – 2016.
103 f. : il. color.
- Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2016.
Orientação: Profa. Dra. Carla Freitas de Andrade
1. Energia solar - Ceará. 2. Energia – Fontes alternativas. 3. Energias Renováveis I. Título.

CDD 621.042

STEFANY ALVES CARNEIRO

PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE APLICADO A
UMA FÁBRICA DE RAÇÕES DO RAMO DE AVICULTURA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energias Renováveis do Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial
para obtenção do Título de Engenheiro de
Energias Renováveis

Aprovada em: 12 / 02 / 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Carla Freitas de Andrade, Ph.D. (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dr.^a Ana Fabiola Leite Almeida
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho aos meus pais
Amauri Carneiro e Luciane Alexandre
Alves Carneiro.

AGRADECIMENTOS

A DEUS que, diariamente, me abençoa com todo o apoio espiritual, a saúde, a inteligência e a determinação que necessito para a condução da minha vida profissional e pessoal.

Aos meus pais, Amauri Carneiro e Luciane Alexandre Alves Carneiro, pelo apoio e amor incondicional durante toda a minha vida, em especial, durante a minha graduação que foi fundamental para o meu crescimento e formação pessoal.

A professora Carla Freitas, pela dedicação e orientação durante a realização deste trabalho, que mesmo não tendo como área principal de atuação o tema escolhido, não mediu esforços para se fazer presente na construção e aperfeiçoamento desta obra.

Ao querido, Flávio Reis Garcia Filho, que me ajudou nas mais diversas maneiras, muitas vezes assumindo minhas funções em outros assuntos para que eu pudesse me dedicar com mais apreço a elaboração deste trabalho; com certeza sua colaboração foi essencial para o sucesso desta etapa.

A todos os meus professores da graduação que diretamente contribuíram para minha formação como engenheira de energias renováveis, em especial ao professor Nivaldo Freire, que também desempenhou papel fundamental na construção e orientação deste trabalho.

A todos os meus colegas e amigos que, de diversas formas, contribuíram com o sucesso e a felicidade da minha graduação no curso de Engenharia de Energias Renováveis.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”. (John F. Kennedy)

RESUMO

Em vista da grande ascensão dos projetos fotovoltaicos de pequeno porte, além de sua completa regulamentação e normalização, apresenta-se a fundamentação dos conceitos mais importantes deste tema e a correta metodologia para dimensionamento de sistemas diretamente conectados à rede, voltados à realidade brasileira. A crise nacional energética vem castigando pequenos e médios consumidores, cujos faturamentos de energia apresentaram aumento superior à inflação, durante o último ano, além disso, a escassez dos recursos hídricos preocupa a todos, visto que a matriz energética brasileira depende em mais de 60% desta fonte. Nesse contexto, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) apresentam-se como um meio capaz de equilibrar e ajudar este cenário. Assim, este trabalho tem como objetivo trazer a realidade e as informações para àqueles que buscam uma alternativa à sua distribuidora local. Mostra-se, passo a passo, quais análises e informações são relevantes para o correto dimensionamento de um SFCR, além de expor as perdas inerentes ao projeto e suas respectivas consequências energéticas e financeiras. Para um melhor entendimento da teoria proposta, apresenta-se o projeto de um SFCR para uma fábrica de rações do ramo da avicultura na cidade de Iguatu, Ceará. Neste exemplo, é possível perceber de que modo as normas interferem no dimensionamento, além de suas características técnicas e financeiras, como as perdas aplicáveis ao sistema e o tempo de retorno do investimento. O SFCR projetado demonstrou-se capaz de fornecer 88,9% do consumo médio demandado pela unidade consumidora, além disso, estimou-se que o tempo de retorno para o investimento necessário à sua instalação, dar-se-á entre o 8º e 9º ano de operação da planta.

Palavras-Chave: Dimensionamento fotovoltaico. Energia solar. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Posição do Sol no céu relativo aos ângulos solares.....	21
Figura 2	- Ilustração de um SFCR.....	30
Figura 3	- Fluxograma de atividades para dimensionamento preliminar de um SFCR.....	52
Figura 4	- Fluxograma de atividades para dimensionamento de um SFCR.....	62
Figura 5	- Visão externa da fábrica.....	64
Figura 6	- Provável área de instalação do SFCR.....	65
Figura 7	- Área de descarrego de rações finalizadas.....	65
Figura 8	- Motor de depósito de ação.....	66
Figura 9	- Prensa de óleo.....	66
Figura 10	- Peneira.....	67
Figura 11	- Quebrador acima do misturador.....	67
Figura 12	- Elevador de aneca.....	68
Figura 13	- Poste e transformador da fábrica.....	68
Figura 14	- Disjuntor geral da fábrica.....	68
Figura 15	- Medidor de energia.....	69
Figura 16	- Quadro geral de distribuição em baixa tensão.....	69
Figura 17	- Quadro de chaves magnéticas dos equipamentos.....	69
Figura 18	- Quadro de distribuição de energia das extrusoras.....	70
Figura 19	- Banco capacitor.....	70
Figura 20	- Quadro de banco capacitor (visão interna).....	70
Figura 21	- Faturamento de energia da fábrica de rações – Agosto 2015.....	72
Figura 22	- Média anual das temperaturas máximas de Iguatu-Ceará....	82
Figura 23	- Diagrama unifilar simplificado do SFCR da Fábrica de Rações – Inversor 01.....	88
Figura 24	- Diagrama unifilar simplificado do SFCR da Fábrica de Rações – Inversor 02.....	89

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	- Distribuição da capacidade de geração no Brasil dos empreendimentos em operação.....	16
Gráfico 2	- Curvas típicas I-V e P-V para um MF cristalino operando a 1000 W/m ² (STC).....	25
Gráfico 3	- Variação da corrente e tensão de um MF em função da irradiação solar.....	26
Gráfico 4	- Variação da corrente e tensão de um MF em função de sua temperatura de operação.....	26
Gráfico 5	- Irradiância e insolação expressas em HSP (ex. 6 HSP = 6kWh/m ² .dia).....	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	- Principais perdas aplicáveis aos SFCR.....	54
Quadro 2	- Demonstração de valor médio para ΔT no Brasil.....	56
Quadro 3	- Disponibilidade solar – Fábrica de Rações.....	71
Quadro 4	- Principais informações – Fábrica de Rações.....	73
Quadro 5	- Principais características do módulo Hareon.....	76
Quadro 6	- Principais características do inversor Fronius.....	77
Quadro 7	- Limites preliminares do SFCR.....	78
Quadro 8	- Configuração preliminar dos inversores.....	78
Quadro 9	- Disponibilidade solar fábrica de rações – Corrigida.....	80
Quadro 10	- Resultados de cálculos de compensação por fator temperatura.....	82
Quadro 11	- Perdas consideradas para o SFCR da Fábrica de Rações..	84
Quadro 12	- Limites reais do SFCR.....	85
Quadro 13	- Configuração dos inversores.....	86
Quadro 14	- Características de projeto final para Fábrica de Rações.....	87
Quadro 15	- Configuração final dos inversores.....	87
Quadro 16	- Levantamento de custos do SFCR da Fábrica de Rações...	92
Quadro 17	- Fluxo de Caixa – SFCR da Fábrica de Rações.....	93
Quadro 18	- Análise financeira – Metodologia 02.....	ii

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta tensão
BIG	Banco de Informações de Geração
BT	Baixa tensão
CA	corrente alternada
CC	Corrente contínua
COELCE	Companhia Energética do Ceará
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
DPS	Dispositivos de proteção contra surto
E_{comp}	Energia de compensação preliminar
FDI	Fator de dimensionamento dos inversores
HSP	Horas de sol pico
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia
(ISGPH	Irradiação solar global no plano horizontal
LABSOL	Laboratório de Energia Solar
MF	Módulo fotovoltaico
MPPT	<i>Maximum power point tracking</i>
O&M	Operação e manutenção
PAE	Produção anual de energia
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios
SFCR	Sistemas fotovoltaicos conectados à rede
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
SWERA	<i>Solar Wind Energy Resource Assessment</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	JUSTIFICATIVA.....	16
3	OBJETIVOS.....	18
3.1	Objetivos gerais.....	18
3.2	Objetivos específicos.....	18
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
4.1	Radiação solar.....	19
4.2	Células fotovoltaicas.....	22
4.3	Módulos fotovoltaicos.....	23
4.3.1	<i>Características elétricas</i>	24
4.3.2	<i>Curva de corrente vs. tensão (curva I-V)</i>	25
4.3.3	<i>Associação de módulos fotovoltaicos</i>	27
4.3.3.1	<i>Associação em série</i>	27
4.3.3.2	<i>Associação em paralelo</i>	28
4.3.3.3	<i>Associação mista</i>	28
4.4	Sistemas fotovoltaicos.....	29
4.5	Componentes de um SFCR.....	29
4.5.1	<i>Estruturas de Suporte</i>	30
4.5.2	<i>Caixa de junção dos MF</i>	31
4.5.3	<i>Caixa de isolamento CA e CC</i>	31
4.5.4	<i>Inversor interativo</i>	31
4.5.4.1	<i>Características elétricas de entrada – CC</i>	32
4.5.4.2	<i>Características elétricas de saída – CA</i>	33
4.5.4.3	<i>Outras características</i>	33
4.5.5	<i>Caixa de interruptor principal</i>	34
4.5.6	<i>Medidor bidirecional de energia</i>	34
4.5.7	<i>Sistemas de proteção</i>	35
4.5.8	<i>Cabos CC e CA</i>	35
4.6	Parâmetros para análise de faturamento de energia elétrica.....	36
4.7	Referências normativas.....	39
5	DIMENSIONAMENTO DE UM SFCR.....	41

5.1	Objetivo do SFCR e perfil de projeto.....	41
5.2	Disponibilidade solar do local.....	42
5.3	Análise de faturamento de energia elétrica.....	43
5.4	Cálculo da energia de compensação preliminar (E_{comp}).....	45
5.4.1	<i>Grupo B – Baixa tensão (BT)</i>	45
5.4.2	<i>Grupo A – Alta tensão (AT)</i>	47
5.5	Cálculo da Potência do SFCR.....	48
5.6	Definição dos componentes a serem utilizados no SFCR.....	48
5.7	Cálculo do número de módulos fotovoltaicos.....	48
5.8	Dimensionamento dos inversores e configuração de painéis.....	49
5.8.1	<i>Análise da potência de entrada do inversor</i>	49
5.8.2	<i>Análise da tensão de entrada do inversor</i>	50
5.8.2.1	<i>Número máximo de módulos por string do inversor</i>	50
5.8.2.2	<i>Número mínimo de módulos por string do inversor</i>	50
5.8.3	<i>Análise da corrente de entrada do inversor</i>	50
5.8.3.1	<i>Número máximo de strings por inversor</i>	51
6	ANÁLISE DE PERDAS E AJUSTES APLICÁVEIS AOS SFCR	53
6.1	Correção do valor de radiação solar para o plano dos módulos fotovoltaicos	54
6.2	Perdas por fator temperatura	55
6.2.1	<i>Estimativa da temperatura de operação do módulo fotovoltaico</i> ...	55
6.2.2	<i>Determinação da temperatura de cálculo</i>	56
6.2.3	<i>Compensação por fator temperatura</i>	57
6.2.3.1	<i>Potência pico</i>	57
6.2.3.2	<i>Tensão</i>	57
6.2.3.3	<i>Corrente</i>	57
6.3	Perdas de conversão CC/CA	58
7	REDIMENSIONAMENTO DE UM SFCR	59
7.1	Cálculo da Potência do SFCR – Corrigido	59
7.2	Cálculo do número de MF – Corrigido	59
7.3	Número máximo de módulos por inversor – Corrigido	60
7.4	Número máximo de módulos por string – Corrigido	60
7.5	Número mínimo de módulos por string – Corrigido	60

7.6	Número máximo de strings em paralelo – Corrigido.....	61
8	PROJETO DE SFCR PARA FÁBRICA DE RAÇÕES DO RAMO DA AVICULTURA.....	63
8.1	Descrição do site: objetivo e perfil do projeto.....	63
8.2	Análise da disponibilidade solar do local.....	71
8.3	Análise do faturamento de energia da unidade consumidora.....	72
8.4	Cálculo da energia de compensação.....	74
8.5	Cálculo da potência preliminar do SFCR.....	74
8.6	Definição dos modelos de componentes do SFCR.....	75
8.6.1	<i>Módulo fotovoltaico.....</i>	<i>75</i>
8.6.2	<i>Inversor Interativo.....</i>	<i>76</i>
8.7	Dimensionamento dos componentes.....	78
9	ANÁLISE DE PERDAS E AJUSTES PARA REDIMENSIONAMENTO DO SFCR DA FÁBRICA DE RAÇÕES.....	80
9.1	Correção do valor de radiação solar para o plano dos módulos fotovoltaicos.....	80
9.2	Compensação de perdas por fator temperatura.....	81
9.3	Compensação de perda por conversão CC/CA.....	83
9.4	Outras perdas.....	83
9.5	Redimensionamento do SFCR.....	84
9.5.1	<i>Cálculo da Potência do SFCR – Corrigido.....</i>	<i>84</i>
9.5.2	<i>Cálculo do número de MF – Corrigido.....</i>	<i>84</i>
9.5.3	<i>Número máximo de módulos por inversor – Corrigido.....</i>	<i>85</i>
9.5.4	<i>Número mínimo de módulos por string – Corrigido.....</i>	<i>85</i>
9.5.5	<i>Número máximo de strings em paralelo – Corrigido.....</i>	<i>85</i>
10	ANÁLISE FINANCEIRA SIMPLIFICADA DO SFCR.....	90
11	CONCLUSÕES.....	94
	REFERÊNCIAS.....	96
	APÊNDICE A – ANÁLISE FINANCEIRA – METODOLOGIA 02.....	i
	ANEXO A – MANUAL DO MÓDULO FOTOVOLTAICO HAREON 265Wp.....	iii
	ANEXO B – MANUAL DO INVERSOR INTERATIVO FRONIUS AGILO 75.0-3.....	v

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é indispensável à vida humana, pois desde o simples preparo de uma comida no micro-ondas até a comunicação via telefone celular, a eletricidade é necessária.

As pessoas já não podem viver sem as facilidades trazidas pelas revoluções industriais, pelos avanços tecnológicos e pela globalização. Pode-se dizer, então, que a humanidade não mais se sustenta sem a utilização de energia elétrica.

Segundo Worldometers (2015), a população mundial já ultrapassa 7 bilhões de pessoas e o consumo de energia em 2014 foi de mais de 20 mil TWh (ENERDATA, 2015), o que significa um consumo médio por pessoa de, aproximadamente, 3 MWh por ano. Até 2050, espera-se que a população ultrapasse 9,55 bilhões de pessoas (WORLDMETERS, 2015), o que implica um consumo anual de mais de 28 mil TWh de energia. Percebe-se, assim, que o atendimento dessa futura demanda só poderá ser suprida com um aumento significativo do uso de fontes alternativas de energia, fato que reitera sua relevância no cenário atual.

Além disso, as preocupações ambientais que giram em torno da produção de energia oriunda de combustíveis fósseis e as especulações sobre o seu fim, torna a energia alternativa ou renovável a grande aposta do presente e do futuro.

É surpreendente pensar que frente à tantos avanços tecnológicos e a tamanha utilização de energia elétrica, ainda existem pessoas que não tem acesso a este bem. Ainda hoje, países menos desenvolvidos enfrentam grandes desafios para trazer a eletricidade a populações que vivem em locais remotos. No Brasil, foi através desse impasse que a energia solar fotovoltaica surgiu.

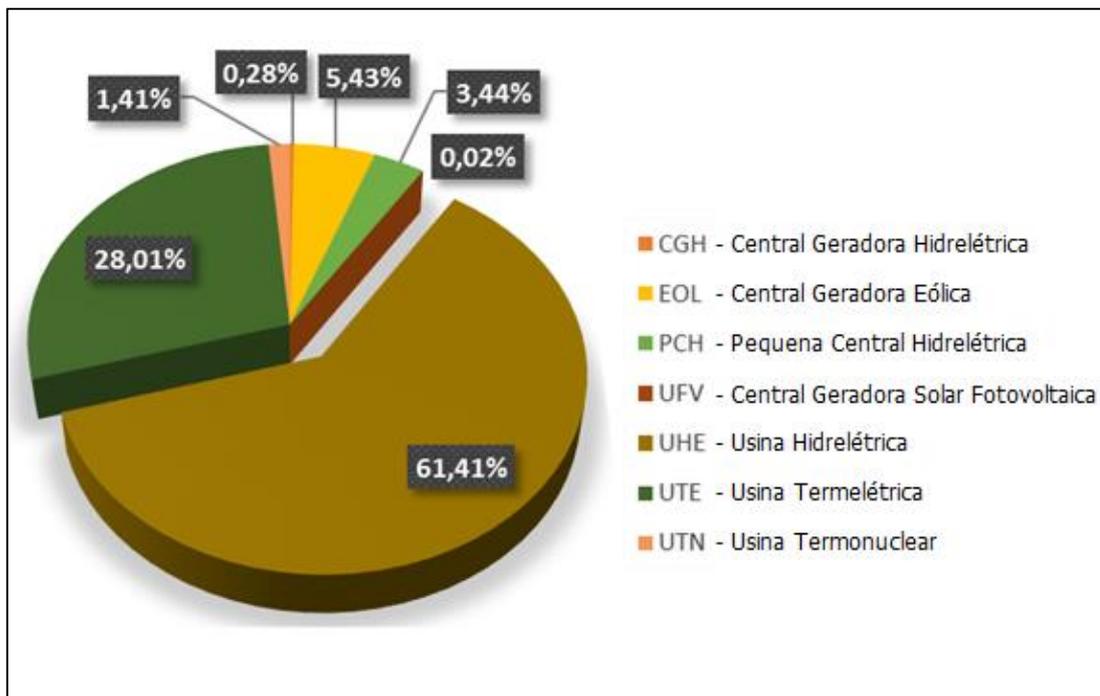
Os primeiros sistemas solares fotovoltaicos instalados no Brasil datam a partir do ano de 1994 quando o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM) foi criado. Mais tarde, o PRODEEM foi incorporado ao Programa Luz para Todos com o objetivo de atender localidades remotas nas quais os custos para a extensão da rede de distribuição eram proibitivos. (ABINEE, 2012).

A partir desse ponto, o uso da energia solar fotovoltaica prosperou no país e, atualmente, essa tecnologia se encontra no início de uma nova fase, onde não são necessários dispositivos para armazenar a energia produzida, pois o sistema é conectado diretamente à rede de distribuição. Este método é chamado de SFCR.

2 JUSTIFICATIVA

No cenário atual, sob a crise de energia elétrica brasileira, a energia solar fotovoltaica se apresenta como uma grande aposta que pode, junto a outras fontes renováveis, equilibrar a matriz energética, tornando-a menos dependente dos recursos hídricos, os quais, segundo o Banco de Informações de Geração (BIG, 2016) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), representam mais de 60% da capacidade de geração do Brasil, como mostra a gráfico 1.

Gráfico 1 – Distribuição da capacidade de geração no Brasil dos empreendimentos em operação.



Fonte: Elaborado pela autora através de BIG (2016).

Devido ao seu caráter intermitente e imprevisível, a grande dependência da fonte hídrica apresenta riscos e descontinuidades na produção, provocando crises energéticas e bandeira tarifária vermelha, a qual retrata condições mais custosas de geração.

Em 2003, a utilização de usinas termelétricas totalizava 4.193,72 MW de capacidade instalada (Atlas de Energia Elétrica, ANEEL, 2005, item 7.3), em 2016, a potência outorgada em operação já chega a 41.223,70 MW (BIG, 2016), isto representa um aumento de mais de 980% em apenas 13 anos.

O preço da tarifa de energia está altíssima e boa parte disso é devido ao uso constante dessas termelétricas que possuem um custo de energia muito superior ao de usinas hidrelétricas. Assim, pequenos empresários e consumidores residenciais são os mais afetados por esse aumento, o que os torna clientes em potencial para os SFCR.

Além disso, a ANEEL, através da Resolução Normativa Nº 482, estabeleceu as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição, além do sistema compensação de energia elétrica e outras medidas. Tal publicação regularizou, facilitou e motivou o ingresso desses consumidores nesse modelo de geração.

Frente a grande ascensão dos SFCR no Brasil, surge a necessidade do conhecimento técnico e especializado em seu projeto. É certo que a utilização da energia fotovoltaica não é novidade no mundo, porém, devido a sua recente regulamentação e incentivo neste país, a literatura sobre o processo de dimensionamento voltado para a realidade local ainda é escassa, principalmente considerando as normas brasileiras.

Assim, o desenvolvimento de um projeto fotovoltaico aplicado, proposto por este trabalho, pode trazer um maior conhecimento e esclarecimento sobre o processo de dimensionamento fotovoltaico para o Brasil.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivos gerais

- ✓ Analisar os parâmetros técnicos e financeiros necessários para realizar um projeto solar fotovoltaico interligado à rede de distribuição de forma equilibrada, segura e viável.
- ✓ Projetar um SFCR para uma fábrica de rações do ramo da avicultura, localizada na cidade de Iguatu – Ceará, objetivando a diminuição de custos com energia elétrica e o marketing sustentável da empresa.

3.2 Objetivos específicos

- ✓ Apresentar uma metodologia clara e objetiva para o dimensionamento de SFCR na realidade técnica e normativa brasileira;
- ✓ Projetar um SFCR para uma fábrica de rações do ramo da avicultura, desenvolvendo as seguintes atividades:
 - Analisar o faturamento de energia elétrica da unidade consumidora;
 - Analisar a disponibilidade solar do local de instalação do sistema;
 - Calcular a energia de compensação do SFCR;
 - Dimensionar o SFCR com base nos parâmetros estabelecidos e nas normas brasileiras;
 - Elaborar uma análise financeira simplificada do projeto e calcular seu tempo de *payback*;

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta conceitos importantes relacionados ao projeto de sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede, além de evidenciar tópicos pertinentes presentes em estudos já realizados. O conteúdo aqui apresentado desempenha um papel fundamental para que se compreenda os cálculos e considerações feitas para o dimensionamento do SFCR e sua análise financeira.

O conteúdo abordado por esse capítulo divide-se em: revisão básica sobre radiação solar, caracterização de SFCR e seus componentes, desempenho e perdas associadas aos SFCR, conceitos importantes sobre faturamento de energia e referências normativas aplicáveis aos SFCR.

4.1 Radiação solar

A Terra é um grande coletor de energia solar que é transmitida através de ondas eletromagnéticas ou fótons. Essa energia se manifesta de diversas formas, tais como: radiação direta utilizada na fotossíntese das plantas, massas de ar aquecidas, evaporação dos oceanos, entre outras.

Segundo Foster, Ghassemi e Cota (2009), a radiação solar que chega à Terra em uma hora ($4,3 \times 10^{20}$ J) é maior que toda a energia consumida no planeta em um ano ($4,1 \times 10^{20}$ J). Eles referem, ainda, que a Terra recebe cerca de 10 vezes mais energia da luz solar a cada ano do que aquela que está contida em todas as reservas conhecidas de carvão, petróleo, gás natural e urânio combinados.

Sabe-se que quantidade e a intensidade de energia solar que chega a superfície terrestre depende da relação geométrica entre a Terra e o Sol, a qual varia em função de fatores como: latitude e longitude do local, data e estação do ano, hora do dia e posição do sol.

Os movimentos de rotação e translação da Terra também são importantes, como sua trajetória elíptica em torno do Sol e a sua inclinação de $23,45^\circ$ entre o eixo de rotação e o plano perpendicular ao plano elíptico. Essas condições têm consequências diretas sobre os parâmetros aplicáveis a geração fotovoltaica, tais como a duração do dia e as estações do ano.

Nesse contexto, alguns ângulos são definidos, em graus, para determinar a posição do sol em relação a uma superfície horizontal na Terra a qualquer hora (FOSTER; GHASSEMI; COTA, 2009), são eles:

- ✓ Ângulo horário (ω): distância angular entre a posição do sol em um determinado momento e sua posição mais alta para esse dia ao atravessar o meridiano local ao meio dia solar. Como a Terra rotaciona a cada 24h, aproximadamente, o ângulo horário muda 15° a cada hora e se move através de 360° durante o curso do dia. Ele é definido zero ao meio dia solar e tem valores negativos antes de atravessar o meridiano local e positivo após atravessar.
- ✓ Altitude solar (α_s): medida entre a projeção do feixe de radiação do sol na horizontal e a posição do sol. Quando o sol está no horizonte, $\alpha_s=0^\circ$ e quando está diretamente em cima da superfície, $\alpha_s=90^\circ$. A altitude solar pode ser calculada por:

$$\sin \alpha_s = \sin \phi * \sin \delta + \cos \delta * \cos \phi * \cos \omega \quad (1)$$

Cujo:

ϕ representa a latitude do local e δ é a declinação solar, em graus.

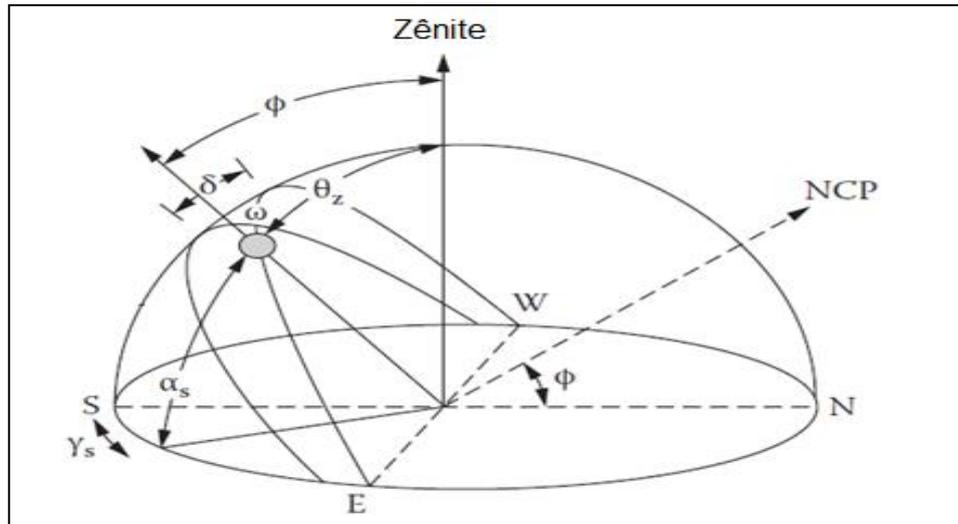
- ✓ Ângulo Zenital (θ_z): distância angular entre o zênite (linha perpendicular ao horizonte do local) e a posição do sol. Dessa forma, $\alpha_s + \theta_z = 90^\circ$. O ângulo zenital pode ser calculado por:

$$\cos \theta_z = \sin \phi * \sin \delta + \cos \delta * \cos \phi * \cos \omega \quad (2)$$

- ✓ Azimute solar (γ_s): ângulo medido no plano horizontal entre a projeção do feixe de radiação do sol e a linha que liga os hemisférios sul e norte.

A figura 1 ilustra algumas dessas relações geométricas.

Figura 1 – Posição do Sol no céu relativo aos ângulos solares.



Fonte: Adaptado de Foster; Ghassemi e Cota (2009, p. 13).

Ainda de acordo com Foster, Ghassemi e Cota (2009), quando se deseja calcular a radiação incidente em um coletor solar horizontal, três outros ângulos devem ser definidos, o ângulo de inclinação da superfície (β), o ângulo azimute de superfície (γ), que indica a distância angular entre o coletor solar e o eixo norte-sul (ou seja, a orientação do módulo) e o ângulo de incidência solar (θ), que é a medida angular entre o feixe de radiação incidente em uma superfície e uma linha imaginária normal a esta superfície. O maior ganho solar de qualquer intensidade ocorre quando o ângulo de incidência é zero, pois a seção transversal da luz não se propaga para fora, além de que as superfícies refletem mais luz quando os raios solares não são perpendiculares à superfície.

Segundo Souza (2014), o melhor ângulo, em graus, de inclinação da superfície para sistemas conectados à rede é aquele que permite maior captação de energia, podendo ser calculado pela equação (3):

$$\beta = 3,7 + 0,69 * \phi \quad (3)$$

No entanto, inclinações menores do que 10° não são recomendáveis, pois facilita o acúmulo de poeira e dificulta a limpeza dos módulos pela ação da água de chuvas. (SOUZA, 2014).

No que diz respeito a orientação da superfície, os coletores devem estar orientados para o ponto azimutal, de preferência com o ângulo azimutal de superfície igual a zero, ou seja, para o hemisfério sul, os módulos devem ser orientados para norte. (SOUZA, 2014).

Quanto à radiação solar, outros dois conceitos são importantes, sendo eles:

- ✓ Irradiância solar (G): É a potência (energia dividida pelo tempo) da radiação solar por unidade de área. É medida em watts por metro quadrado (W/m^2).
- ✓ Radiação solar (H): É a quantidade de energia captada do sol em determinada área e sob determinado período de tempo. É medida em joules por metro quadrado (J/m^2) ou, mais comumente, watt-hora por metro quadrado (Wh/m^2).

A quantidade de radiação solar absorvida por uma determinada área sob um determinado período de tempo pode ser definida pela equação (4):

$$H = G * S * t \quad (4)$$

Cujo:

S é a área da superfície coletora, medida em m^2 , e t o intervalo de tempo, medido em horas. A unidade de medida de H é, então, Watt-hora.

Dado o total de energia irradiada pelo sol e as relações geométricas entre o mesmo e a Terra, a quantidade de radiação interceptada pelos limites exteriores da atmosfera terrestre é praticamente constante e vale, aproximadamente, $1367 W/m^2$. Esse valor é chamado de constante solar. (FOSTER; GHASSEMI; COTA, 2009).

Segundo Souza (2014), a quantidade de radiação que chega ao chão, no plano horizontal, depende da localização geográfica, das condições atmosféricas e da estação do ano, pois a atmosfera terrestre age como um filtro que bloqueia parte da energia irradiada pelo sol. Devido a esses fatores, a máxima irradiância que chega à superfície terrestre é em torno de $1000 W/m^2$.

4.2 Células fotovoltaicas

Célula fotovoltaica é um dispositivo elétrico que, através do efeito fotovoltaico, converte a energia luminosa em eletricidade. Para que esta carga seja utilizável, várias células fotovoltaicas são conectadas entre si, formando a menor unidade de geração prática de energia solar, chamado módulo fotovoltaico (MF).

Existem três tipos principais de células fotovoltaicas: silício monocristalino, silício policristalino e filme fino ou silício amorfo. O aprimoramento das técnicas de produção, a fabricação em larga escala e a diminuição do preço do silício, tornaram as células de silício cristalizado campeãs de mercado, sendo assim, as mais utilizadas para sistemas fotovoltaicos. (BLUESOL, 2012; WIKIENERGIA, 2009)

A diferença básica entre as células mono e policristalinas se dá no seu processo de fabricação. Enquanto a monocristalina é formada por apenas uma semente de monocristal de silício, a policristalina, como o próprio nome já diz, tem, em sua formação, vários cristais. Os vários cristais aumentam as perdas por recombinação, o que torna as células de silício monocristalino mais eficientes. (BLUESOL, 2012). De acordo com Energia Tecsolar (2015), as células monocristalinas são tipicamente 10% a 15% mais eficientes do que suas homólogas policristalinas, porém, seu processo de fabricação custa cerca de 20% a mais.

Existe, ainda, outro fator a ser levado em consideração antes da escolha da célula fotovoltaica, o coeficiente térmico da célula. Essa propriedade mede a perda da capacidade de geração de energia elétrica para cada grau de temperatura acima da temperatura padrão de operação da célula. Isto quer dizer que o desempenho da célula diminui à medida que a temperatura celular sobe. (ENERGY MARKET AUTHORITY, 2009). De acordo com Moreno (2013), as células monocristalinas apresentam um rendimento mais afetado pelo incremento de temperatura, quando comparado às policristalinas. Esta diferença, segundo o autor, é um pouco óbvia, pois como as células monocristalinas são mais escuras que as policristalinas, essa absorve mais calor e, dessa forma, sua temperatura de operação torna-se maior, o que afeta seu rendimento frente as células de policristais.

Dessa maneira, a escolha do tipo de célula para um sistema fotovoltaico depende das considerações específicas de cada projeto solar, tais como: localização e design do empreendimento, disponibilidade de capital para o investimento e limitação de área disponível para instalação. De um modo geral, pode-se dizer que, para o Brasil, as células de silício policristalino apresentam melhor custo benefício, visto seu menor preço e menor perda por efeito térmico, já que o país fica localizado próximo à linha do equador e tem clima tipicamente quente.

4.3 Módulos fotovoltaicos

Um conjunto de células conectadas em série, agrupadas, laminadas e embaladas entre folhas de plástico e vidro forma o chamado MF. Cada conjunto desse possui uma estrutura de suporte que lhe confere rigidez e facilidade para manuseamento e instalação. O módulo dispõe, ainda, de uma caixa de junção, localizada em seu posterior, onde ficam guardadas suas conexões condutoras

responsáveis por transferir a energia gerada ou interliga-lo a outro equipamento. (FOSTER; GHASSEMI; COTA, 2009).

4.3.1 Características elétricas

As características elétricas dos módulos fotovoltaicos compreendem as seguintes definições, adaptadas de Foster; Ghassemi e Cota (2009) e Souza (2014):

- ✓ Potência Nominal (P_N): é o valor máximo de potência, medido em watts, que o dispositivo pode transferir a uma carga. Está localizada no “joelho” da curva de potência versus tensão, do gráfico 2, onde a derivada da função é igual a zero.

$$P_N = I_{MP} * V_{MP} \quad (5)$$

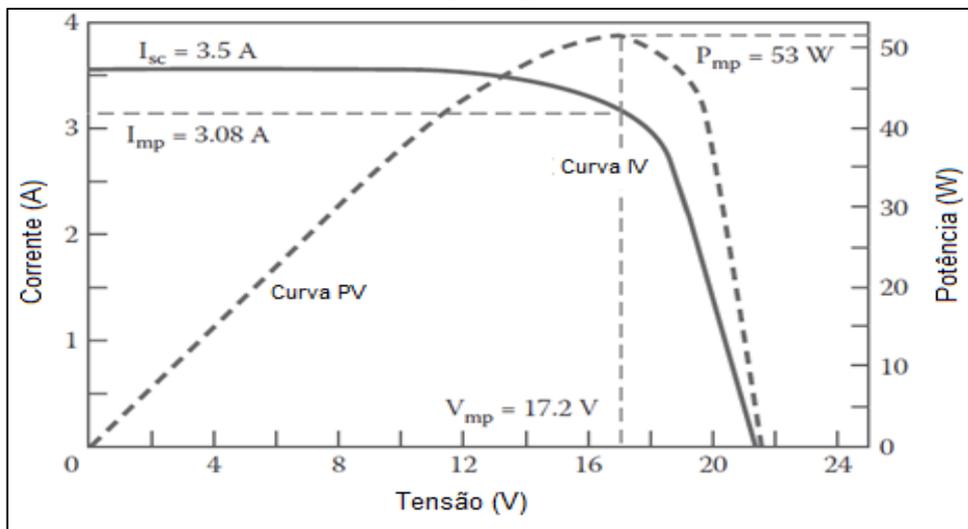
- ✓ Corrente em curto-circuito (I_{SC}): é o valor máximo de corrente, medido em ampères, que um dispositivo pode fornecer quando um circuito externo sem resistência é conectado aos seus terminais (condição de curto circuito). Está localizado no ponto onde a curva corrente versus tensão toca o eixo y, ou seja, onde o valor da tensão é zero.
- ✓ Corrente em máxima potência (I_{MP}): é o valor de corrente, medido em ampères, quando o dispositivo apresenta a máxima transferência de potência. É a ordenada correspondente ao ponto P_{MP} .
- ✓ Tensão em circuito aberto (V_{OC}): é o valor máximo de tensão, medido em volts, entre os terminais do dispositivo, sem a presença de carga. Está localizado no ponto onde a curva corrente versus tensão toca o eixo x, ou seja, onde o valor da corrente é zero.
- ✓ Tensão em máxima potência (V_{MP}): é o valor de tensão, medido em volts, quando o dispositivo apresenta máxima transferência de potência. É a abscissa correspondente ao ponto P_{MP} .
- ✓ Eficiência (η_m): é o quociente entre a potência gerada e a irradiância incidente sobre o módulo, esta medida é adimensional.

É importante ressaltar que a energia gerada pelo efeito fotovoltaico nos módulos possui característica constante, ou seja, a corrente gerada é contínua (CC) e não alternada (CA).

4.3.2 Curva de corrente vs. tensão (curva I-V)

A curva de corrente versus tensão é a representação mais utilizada para caracterizar a saída de um dispositivo fotovoltaico (célula, módulo, sistema). Nela, encontram-se presentes a maioria das características elétricas descritas acima, chamados pontos operacionais. O gráfico 2 mostra um exemplo de curvas típicas de tensão versus corrente e potência versus tensão onde são destacados os pontos P_{MP} , I_{SC} , I_{MP} e V_{MP} .

Gráfico 2 – Curvas típicas I-V e P-V para um MF cristalino operando a 1000 W/m^2 (STC*).

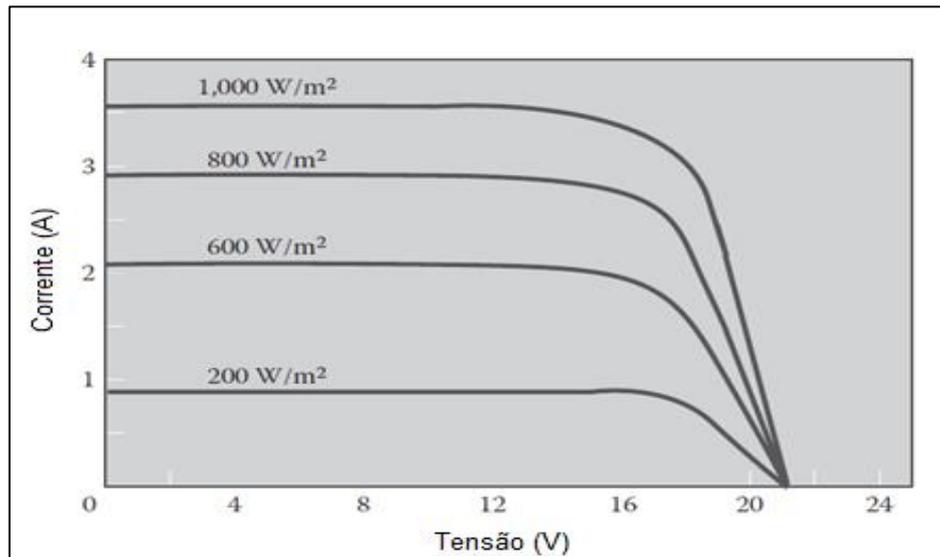


Fonte: Adaptado de Foster; Ghasseml e Cota (2009, p. 138).

Sabe-se que a geração de corrente elétrica por um dispositivo fotovoltaico está diretamente associada a dois fatores principais: a intensidade luminosa que este recebe e sua temperatura de operação. Os gráficos 3 e 4 mostram as curvas da variação de tensão e corrente em função da irradiância e da temperatura de operação de um dispositivo fotovoltaico, respectivamente.

*STC: Standard Test Conditions: são as condições padrão de teste para módulos fotovoltaicos. (Irradiância (G) = 1000 W/m^2 ; Massa de Ar (AM) = 1,5; Temperatura da célula = 25°C ; Temperatura do Ar = 0°C).

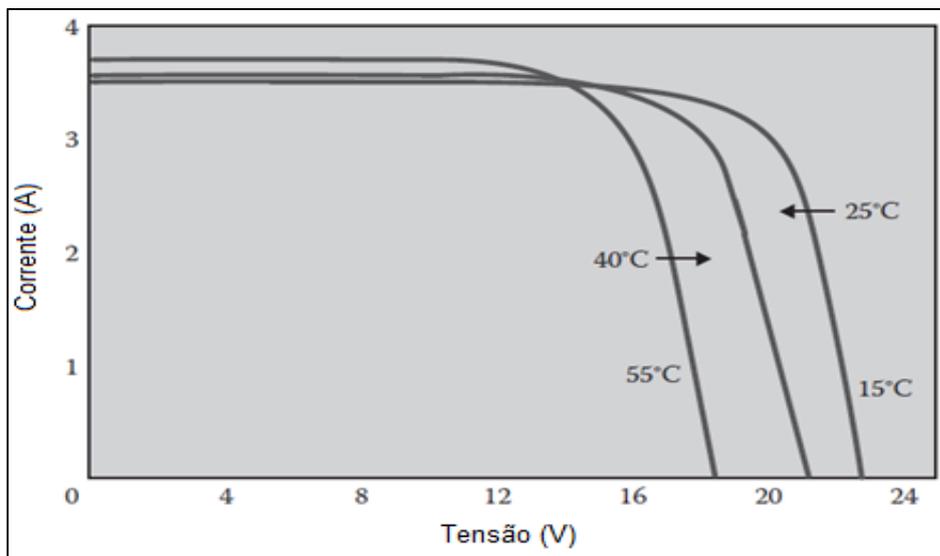
Gráfico 3 – Variação da corrente e tensão de um MF em função da irradiação solar.



Fonte: Adaptado de Foster; Ghassemi e Cota (2009, p. 140).

Nota-se que quanto menor a irradiação solar, menor é a corrente de saída do módulo e, portanto, menor será o ponto de máxima potência. A tensão, no entanto, permanece praticamente constante. Dessa forma, pode-se afirmar que a quantidade de corrente produzida é diretamente proporcional ao aumento da intensidade de radiação solar e que a tensão de circuito aberto permanece inalterada em função desta mudança.

Gráfico 4 – Variação da corrente e tensão de um MF em função de sua temperatura de operação.



Fonte: Adaptado de Foster; Ghassemi e Cota (2009, p. 141).

Observa-se que para maiores temperaturas de operação do dispositivo fotovoltaico, a tensão entre os terminais diminui, enquanto a corrente permanece essencialmente estável. Segundo Foster; Ghassemi e Cota (2009), a tensão de operação de um módulo fotovoltaico é reduzida, em média, para dispositivos cristalizados, em torno de 0,5% para cada grau Célsius acima do STC.

Segundo Souza (2014), a diferença entre a temperatura de operação do dispositivo fotovoltaico e a temperatura ambiente, dada em °C, pode ser estimada pela equação (6):

$$\Delta t = 0,034 * G - 4 \quad (6)$$

Cujo:

G é a irradiância em W/m².

4.3.3 Associação de módulos fotovoltaicos

A associação de módulos fotovoltaicos constitui o chamado painel fotovoltaico que, quando articulado a outros componentes, torna -se um sistema fotovoltaico.

Existem três tipos de conexão entre módulos, série, paralelo e associação mista (em série e em paralelo). As características elétricas do painel são análogas ao dos módulos individuais com potência, corrente e tensão modificados de acordo com o número de módulos conectados em série e/ou paralelo. A seguir, encontra-se uma breve explanação entre esses três tipos de associação, adaptadas de Souza (2014).

4.3.3.1 Associação em série

Módulos associados em série são chamados de *string* (ou fileira), nessa junção a tensão equivalente do circuito é a soma das tensões de cada dispositivo fotovoltaico. Já a corrente equivalente do painel é igual a corrente do módulo de menor potência. Isso acontece porque aquele que possui menor corrente absorve a corrente gerada pelos de maior corrente, dissipando-a em forma de calor e provocando perdas.

Por esse motivo, não se deve associar, em série, módulos de diferentes capacidades.

Dessa forma, considerando módulos do mesmo modelo, os parâmetros elétricos equivalentes, em uma associação em série, são:

- ✓ Tensão equivalente em série: $T_{eq_s} = n * T_{MF}$
- ✓ Corrente equivalente em série: $I_{eq_s} = I_{MF}$
- ✓ Potência equivalente em série: $P_{eq_s} = n * P_{MF}$

Cujo n é o número de módulos em série, e T_{MF} , I_{MF} e P_{MF} são a tensão, a corrente e a potência de um MF, respectivamente.

4.3.3.2 Associação em paralelo

Na associação em paralelo, a tensão equivalente do circuito é a média das tensões de cada MF, enquanto a corrente equivalente é soma das correntes individuais geradas.

Quando módulos de diferentes tensões são associados em paralelo, aquele que possui menor tensão receberá a corrente gerada pelos módulos de maior tensão, o que o torna uma carga resistiva que consome corrente elétrica e dissipa-a em forma de calor, provocando perdas de potência.

Dessa forma, considerando MF do mesmo modelo, os parâmetros elétricos equivalentes são em uma associação em paralelo são:

- ✓ Tensão equivalente em paralelo: $T_{eq_p} = T_{MF}$
- ✓ Corrente equivalente em paralelo: $I_{eq_p} = m * I_{MF}$
- ✓ Potência equivalente em paralelo: $P_{eq_p} = m * P_{MF}$

Cujo m é o número de módulos em paralelo.

4.3.3.3 Associação mista

Na maior parte das aplicações, a associação acontece de forma mista, ou seja, em paralelo e em série, para que se possa alcançar a potência-pico calculada no projeto e a tensão nominal requerida pelo sistema, respectivamente.

Neste tipo de junção, apenas módulos com características elétricas idênticas devem ser associados em *strings* que, por sua vez, só devem ser associadas, em paralelo, se possuírem o mesmo nível de tensão.

Dessa forma, considerando módulos do mesmo modelo, a corrente e a tensão equivalentes são calculadas como mostrado anteriormente, enquanto a potência equivalente se torna:

- ✓ Potência equivalente em associação mista: $P_{eq} = n * m * P_{MF}$

4.4 Sistemas fotovoltaicos

Um conjunto de módulos fotovoltaicos associados (em série e/ou paralelo) que fornece corrente elétrica para um dispositivo de condicionamento de potência (inversor ou controlador) é chamado de painel fotovoltaico.

Um arranjo fotovoltaico, por sua vez, é um conjunto de painéis ligados em paralelo, e este, quando combinado a outros componentes, chama-se sistema fotovoltaico.

Os sistemas solares fotovoltaicos podem ser classificados de três maneiras, de acordo com sua aplicação final: *on-grid*, ou conectado à rede (SFCR), *off-grid* ou desligado a rede (também conhecido como isolado ou autônomo) e híbrido, o qual apresenta mais de uma fonte de geração de energia.

Como o escopo deste trabalho é projetar um sistema solar fotovoltaico conectado à rede de distribuição de energia elétrica, dar-se-á ênfase a este tipo de arranjo.

Os SFCR fornecem energia para as redes de distribuição. Todo o potencial gerado é rapidamente escoado para a rede, que age como uma carga, absorvendo essa energia (SOUZA, 2014).

Esses dispositivos não possuem subsistemas de armazenamento de energia e, por isso, costumam ser mais eficientes e baratos que os sistemas autônomos. A rede de distribuição age como uma “bateria” que armazena o que é gerado, fazendo com que essa energia armazenada possa ser utilizada em momentos com pouca ou nenhuma insolação.

Por funcionar em paralelo com a rede elétrica, o SFCR é totalmente dependente da mesma, o que o torna incapaz de funcionar como backup de energia.

4.5 Componentes de um SFCR

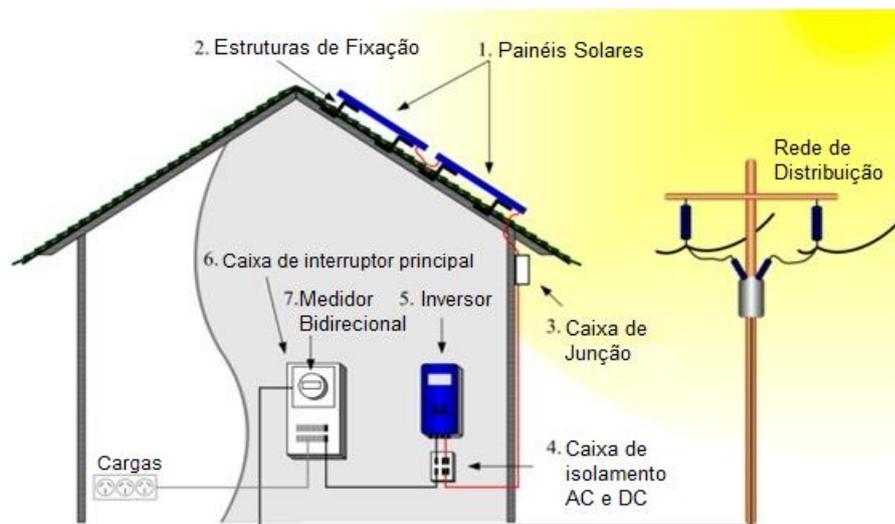
Em geral, um SFCR possui os seguintes componentes:

- ✓ Módulos fotovoltaicos associados em série e/ou paralelo;
- ✓ Estruturas de suporte;
- ✓ Caixa de junção dos módulos fotovoltaicos;

- ✓ Caixa de isolamento CA e CC;
- ✓ Inversor interativo (ou *Grid-Tie*);
- ✓ Caixa de interruptor principal;
- ✓ Medidor bidirecional de energia;
- ✓ Sistemas de proteção;
- ✓ Cabos CC e CA.

A figura 2 ilustra alguns desses elementos.

Figura 2 – Ilustração de um SFCR.



Fonte: Adaptado de From Sun to Power (2012).

Visando uma melhor compreensão desses componentes e suas características, apresenta-se breve explanação sobre os mesmos. Como os MF já foram abordados em detalhes anteriormente, o detalhamento inicia-se pelas estruturas de suporte.

4.5.1 Estruturas de Suporte

As estruturas de suporte, como o próprio nome já diz, são armações responsáveis por sustentar, de forma segura, os módulos fotovoltaicos em seu local de instalação, seja ele em telhados, lajes, fachadas de edificações ou no próprio chão.

Os requisitos mais comuns são não provocar sombras em outros módulos e permitir que estes sejam arranjados de modo a possibilitar um fácil acesso para manutenções ou reparos.

Segundo Xing, Zhou e Feng (2014), a performance de um MF depende, principalmente, da irradiação solar e da temperatura da célula, os quais são bastante influenciados pelos parâmetros geométricos das estruturas de fixação. Os autores explicam que, a eficiência geral de um sistema fotovoltaico poderia chegar a 26,7% com avanços em seu processo de transferência de calor. Os parâmetros de montagem, tais como ângulo de inclinação e a distância entre o módulo e o telhado, ou seja, tamanho da folga, determinam a irradiância solar, o mecanismo de transferência de calor e a temperatura da célula.

Dessa forma, dependendo do tipo de estrutura de fixação utilizado, ter-se-á uma maior temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos, reduzindo, assim, sua geração final de energia elétrica.

4.5.2 Caixa de junção dos MF

É a parte responsável por conectar todas as *strings* de um sistema fotovoltaico e abrigar alguns dispositivos de proteção, tais como: diodos de *by-pass*, diodos de bloqueio, fusíveis, dispositivos de proteção contra surto (DPS) e interruptor geral CC.

4.5.3 Caixa de isolamento CA e CC

Este componente nada mais é do que um isolamento que protege a entrada e a saída do inversor, possibilitando sua desconexão segura, caso necessário.

4.5.4 Inversor interativo

De forma simples, o inversor interativo é responsável por converter a corrente contínua gerada pelos MF em corrente alternada, para que a mesma possa ser entregue à rede pública de distribuição.

Este equipamento é bastante sofisticado e apresenta funcionamento complexo, operando em sincronismo com a rede, ou seja, fornecendo valores de corrente, frequência e tensão alternada o mais próximo possível dos da rede, obedecendo aos limites estabelecidos nas normas brasileiras. Além de fornecer energia para a rede, o inversor também atende as necessidades da unidade consumidora, injetando apenas o excedente na linha de distribuição.

As especificações técnicas mais importantes dos inversores são seus limites operacionais, seus requisitos para instalação, seus requisitos de segurança e seus requisitos de manutenção.

Além de converter e entregar a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos, alguns inversores interativos possuem um sistema de seguidor de máxima potência ou MPPT (sigla do inglês – *maximum power point tracking*). Esta técnica, segundo Foster; Ghassemi e Cota (2009), permite extrair o máximo de potência do arranjo fotovoltaico mesmo com as variações de temperatura e intensidade solar.

A seguir, apresentam-se as características mais importantes de um inversor interativo; algumas definições foram adaptadas de Green Pro (2004).

4.5.4.1 Características elétricas de entrada – CC

- ✓ Potência máxima ($P_{CC-m\grave{a}x}$): potência fotovoltaica máxima admissível pelo inversor, medida em *watts*.
- ✓ Potência de partida (P_{CC-ON}): potência fotovoltaica para qual o inversor começa a operar, medida em *watts*.
- ✓ Potência de desligamento (P_{CC-OFF}): potência fotovoltaica para qual o inversor se desliga, medida em *watts*.
- ✓ Tensão nominal (V_{CC-N}): tensão fotovoltaica para qual o inversor é dimensionado, medida em *volts*.
- ✓ Tensão máxima ($V_{CC-m\grave{a}x}$): tensão fotovoltaica máxima admissível pelo inversor, medida em *volts*.
- ✓ Tensão mínima ($V_{CC-m\grave{i}n}$): tensão fotovoltaica mínima para que o inversor opere, medida em *volts*.
- ✓ Tensão de desligamento (V_{CC-OFF}): tensão fotovoltaica para qual o inversor ainda opera, medida em *volts*.
- ✓ Tensão de partida (V_{CC-ON}): tensão fotovoltaica para qual o inversor começa a operar, medida em *volts*.
- ✓ Intervalo de tensão MPPT (V_{MPPT}): intervalo de tensão do funcionamento do MPPT, medido em *volts*
- ✓ Corrente nominal (I_{CC-N}): corrente fotovoltaica para qual o inversor é dimensionado, medida em *ampères*.

- ✓ Corrente máxima ($I_{CC-m\acute{a}x}$): corrente fotovoltaica máxima admissível pelo inversor, medida em *ampères*.
- ✓ Corrente máxima de curto-circuito do arranjo ($I_{SC-A-m\acute{a}x}$): corrente de curto circuito máxima do arranjo fotovoltaico admissível pelo inversor, medida em *ampères*.

4.5.4.2 Características elétricas de saída – CA

- ✓ Potência nominal (P_{CA-N}): potência em CA que o inversor é capaz de fornecer em condições de pico, medida em *watts*.
- ✓ Potência máxima ($P_{CA-m\acute{a}x}$): potência máxima em CA que o inversor é capaz de fornecer, medida em *volt-ampère*.
- ✓ Tensão nominal (V_{CA-N}): tensão em CA que o inversor é capaz de fornecer em condições de pico, medida em *volts*.
- ✓ Corrente máxima ($I_{CA-m\acute{a}x}$): corrente alternada máxima que o inversor é capaz de fornecer, medida em *ampères*.
- ✓ Taxa de distorção harmônica (k): fator de qualidade da corrente ou da tensão fornecida, adimensional; deve ser inferior a 5%.
- ✓ Eficiência máxima (η_{inv}): máxima eficiência de conversão CC para CA que o inversor pode apresentar.

4.5.4.3 Outras características

- ✓ Nível de ruído: dependendo do tipo e da classe de desempenho, o ruído do inversor, medido em decibéis, em operação pode atingir diversos níveis; isto deve ser levado em conta ao escolher a localização do inversor.
- ✓ Intervalo de temperatura: dependendo do tipo e da classe de desempenho, existem vários intervalos de temperatura, medidos em graus celsius; isto deve ser levado em conta ao escolher a localização do inversor.
- ✓ Categoria de proteção IP: determina qual o tipo de proteção presente no inversor; isto deve ser levado em conta ao escolher a localização do inversor.

Categoria:

- IP 5_: proteção contra depósito de poeiras;
- IP 6_: proteção contra a penetração de corpos sólidos estranhos e poeiras;

- IP _1 proteção contra a queda vertical de gotas de água;
- IP _3: proteção contra a queda de água de gotas de água até 60° da vertical;
- IP _4: proteção contra projeções de água;
- IP _5: proteção contra jatos de água de baixa pressão;
- IP _7: proteção contra a imersão em água.

Um inversor situado exterior deve ter, pelo menos, proteção IP 54.

A definição da quantidade de inversores a serem utilizados em um SFCR é um processo de análise de informações técnicas e comerciais. No que diz respeito ao lado técnico, a seleção do inversor depende do tipo de sistema e das condições de instalação dos módulos. De maneira geral, *strings* maiores possuem a vantagem da redução da secção transversal dos cabos, devido ao menor valor de corrente equivalente. No entanto, podem causar maiores perdas energéticas no caso de sombreamento de algum equipamento. (GREEN PRO, 2004).

Como inversores interativos compõem boa parte do investimento de um SFCR, muitas vezes sua escolha se dá por fatores comerciais, tais como, menor custo, menores impostos ou presença de software para acompanhamento de geração.

Em relação ao seu local de instalação, Green Pro (2004) esclarece que, sempre que possível, os inversores devem ser instalados junto a caixa de junção dos módulos ou em sua proximidade, para que as perdas de energia que ocorrem através do cabo principal CC possam ser reduzidas, assim como os custos de instalação. Existe, ainda, o fator condições ambientais que devem atender aos requisitos exigidos pelo fabricante, especialmente em termos de umidade e temperatura.

4.5.5 Caixa de interruptor principal

Este é mais um componente de isolamento e segurança do sistema para caso de falhas elétricas. Ele está localizado após o inversor e antes do medidor bidirecional de energia.

4.5.6 Medidor bidirecional de energia

Este é o equipamento responsável por medir toda a energia que entra na unidade consumidora, através da distribuidora e que sai da mesma, através do SFCR. Em geral, os medidores convencionais utilizados pelas concessionárias de energia não possuem essa capacidade de dupla medição, o que acarreta na necessidade da troca dos mesmos para a adequação aos SFCR.

4.5.7 Sistemas de proteção

Existem vários sistemas de proteção que podem ser utilizados em SFCR, sendo alguns obrigatórios e outros opcionais. Os componentes de proteção mais comuns são os disjuntores, aparelhos que isolam o sistema automaticamente caso ocorra alguma sobrecarga ou curto-circuito.

Módulos fotovoltaicos inteiros podem ser danificados permanentemente devido à presença de sombra em alguma célula, o que provoca um superaquecimento do local, ou *hot-spot*. (SOUZA, 2014).

Souza (2014) explica que caso uma folha caia sobre um módulo, de forma a cobrir uma célula, esta passa a ser inversamente polarizada, funcionando como uma carga que converte eletricidade em calor. Caso a corrente que atravessa a célula seja alta suficiente, acontece a formação do *hot-spot*.

Uma forma de contornar esse problema, de acordo com Souza (2014), é através da utilização dos diodos de *by-pass* que *desviam* a corrente da célula ou módulo sombreado. Esse dispositivo é, normalmente, montado na caixa de conexão quando utilizado para contornar um módulo inteiro, já no caso das células, os fabricantes só costumam utiliza-los para módulos com potência superior a 40Wp.

Existem, ainda, os diodos de bloqueio e os DPS. O primeiro é utilizado nas fileiras de módulos em série, para evitar que um módulo sombreado transforme a fileira inteira em uma carga. Já o DPS é um sistema que protege o painel fotovoltaico em caso de surtos de tensão, devido a descargas atmosféricas. Ele é formado por três varistores ligados em Y. (SOUZA, 2014).

4.5.8 Cabos CC e CA

Os cabos são os responsáveis pela interconexão de todos os demais componentes, para cada parte do sistema, existe um cabo específico.

4.6 Parâmetros para análise de faturamento de energia elétrica

Para o completo entendimento do projeto proposto neste trabalho, é necessário definir alguns termos presentes em um faturamento de energia elétrica para clientes de média tensão. Esses fatores são de suma importância para o dimensionamento do sistema e análise de viabilidade econômica. As definições a seguir foram retiradas e/ou adaptadas da Resolução Normativa N° 414/2010:

- ✓ Ciclo de faturamento: período correspondente ao faturamento de determinada unidade consumidora. O intervalo de tempo gira em torno de 30 dias;
- ✓ Demanda: média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo de 15 minutos, expressa em quilowatts (kw) e quilovolt-ampère-reativo (kvar), respectivamente;
- ✓ Demanda contratada: demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela distribuidora, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados em contrato, e que deve ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW);
- ✓ Demanda faturável: valor da demanda de potência ativa, considerada para fins de faturamento, com aplicação da respectiva tarifa, expressa em quilowatts (kW);
- ✓ Demanda medida: maior demanda de potência ativa, verificada por medição, integralizada em intervalos de 15 (quinze) minutos durante o período de faturamento;
- ✓ Encargo de uso do sistema de distribuição: valor em Reais (R\$) devido pelo uso das instalações de distribuição, calculado pelo produto da tarifa de uso pelos respectivos montantes de uso do sistema de distribuição e de energia contratados ou verificados;
- ✓ Energia elétrica ativa: aquela que pode ser convertida em outra forma de energia, expressa em quilowatts-hora (kWh);
- ✓ Energia elétrica reativa: aquela que circula entre os diversos campos elétricos e magnéticos de um sistema de corrente alternada, sem produzir trabalho, expressa em quilovolt-ampère-reativo-hora (kvarh);

- ✓ Fator de carga: razão entre a demanda média e a demanda máxima da unidade consumidora, ocorridas no mesmo intervalo de tempo especificado;
- ✓ Fator de demanda: razão entre a demanda máxima num intervalo de tempo especificado e a carga instalada na unidade consumidora;
- ✓ Fator de potência: razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas num mesmo período especificado;
- ✓ Fatura: documento comercial que apresenta a quantia monetária total que deve ser paga pelo consumidor à distribuidora, em função do fornecimento de energia elétrica, da conexão e uso do sistema ou da prestação de serviços, devendo especificar claramente os serviços fornecidos, a respectiva quantidade, tarifa e período de faturamento;
- ✓ Tarifa: valor monetário estabelecido pela ANEEL, fixado em R\$ (Reais) por unidade de energia elétrica ativa ou da demanda de potência ativa, sendo:
 - Tarifa de energia – TE: valor monetário unitário determinado pela ANEEL, em R\$/MWh, utilizado para efetuar o faturamento mensal referente ao consumo de energia;
 - Tarifa de uso do sistema de distribuição – TUSD: valor monetário unitário determinado pela ANEEL, em R\$/MWh ou em R\$/kW, utilizado para efetuar o faturamento mensal de usuários do sistema de distribuição de energia elétrica pelo uso do sistema;
- ✓ Tarifa binômia de fornecimento: aquela que é constituída por valores monetários aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa e à demanda faturável;
- ✓ Tarifa monômia de fornecimento: aquela que é constituída por valor monetário aplicável unicamente ao consumo de energia elétrica ativa, obtida pela junção da componente de demanda de potência e de consumo de energia elétrica que compõem a tarifa binômia;
- ✓ Grupo A: grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômia e subdividido nos seguintes subgrupos:
 - Subgrupo A1 - tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
 - Subgrupo A2 - tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;

- Subgrupo A3 - tensão de fornecimento de 69 kV;
 - Subgrupo A3a - tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
 - Subgrupo A4 - tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV;
 - Subgrupo AS - tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição;
- ✓ Grupo B: agrupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, caracterizado pela tarifa monômnia e subdividido nos seguintes subgrupos:
- Subgrupo B1 – residencial;
 - Subgrupo B2 – rural;
 - Subgrupo B3 - demais classes;
 - Subgrupo B4 - Iluminação Pública;
- ✓ Modalidade tarifária: conjunto de tarifas aplicáveis às componentes de consumo de energia elétrica e demanda de potência ativa, considerando as seguintes modalidades:
- Modalidade tarifária convencional monômnia: aplicada às unidades consumidoras do grupo B, caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica, independentemente das horas de utilização do dia;
 - Modalidade tarifária horária branca: aplicada às unidades consumidoras do grupo B, exceto para o subgrupo B4 e para as subclasses Baixa Renda do subgrupo B1, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia;
 - Modalidade tarifária convencional binômnia: aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica e demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia;
 - Modalidade tarifária horária verde: aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia, assim como de uma única tarifa de demanda de potência;
 - Modalidade tarifária horária azul: aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia;

- ✓ Período seco: período de 7 (sete) ciclos de faturamento consecutivos, referente aos meses de maio a novembro;
- ✓ Período úmido: período de 5 (cinco) ciclos de faturamento consecutivos, referente aos meses de dezembro de um ano a abril do ano seguinte;
- ✓ Posto tarifário: período de tempo em horas para aplicação das tarifas de forma diferenciada ao longo do dia, considerando a seguinte divisão:
 - Posto tarifário ponta: período composto por 3 (três) horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora considerando a curva de carga de seu sistema elétrico, aprovado pela ANEEL para toda a área de concessão ou permissão, com exceção feita aos sábados, domingos e feriados predeterminados. No caso da Companhia Energética do Ceará (COELCE), distribuidora referente deste trabalho, o horário ponta está compreendido de 17:30 às 20:30 horas, conforme informação disponibilizada no Portal Coelce, na seção “Orientações básicas para clientes de Alta Tensão”;
 - Posto tarifário intermediário: período de horas conjugado ao posto tarifário ponta, sendo uma hora imediatamente anterior e outra imediatamente posterior, aplicado para o Grupo B, admitida sua flexibilização conforme Módulo 7 dos Procedimentos de Regulação Tarifária;
 - Posto tarifário fora de ponta: período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas nos postos ponta e, para o Grupo B, intermediário.

4.7 Referências normativas

Faz-se necessário, ainda, citar a regulamentação vigente para um SFCR. As normas aplicáveis para esse tipo de geração distribuída abrangem a Resolução Normativa Nº 414/2010, a Resolução Normativa Nº 482 e Resolução Normativa Nº 687, que altera partes da Resolução Normativa Nº 482.

Dentre outros parâmetros, essas normas estabelecem “as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica” (Resolução Normativa Nº 482, 2012, p. 1).

Em âmbito local, também foram observadas as normas da COELCE, presentes na Norma Técnica NT-Br 010/2015.

Como o projeto aqui apresentado tem, como objetivo final, participar do sistema de compensação de energia elétrica brasileiro, o mesmo foi elaborado de forma a respeitar essas normas.

5 DIMENSIONAMENTO DE UM SFCR

Com base no conhecimento teórico sobre os componentes de um SFCR, seu funcionamento, e suas normas regulamentárias, apresenta-se, então, os fundamentos para o seu correto dimensionamento.

A metodologia aqui apresentada é baseada nos estudos de Foster; Ghassemi e Cota (2009), Souza (2014) e Green pro (2004), bem como nas normas mencionadas e outras pesquisas citadas subsequentemente. Porém, buscou-se um aperfeiçoamento do processo, tornando-o mais claro e objetivo, visando uma aplicação direta de SFCR para o Brasil.

5.1 Objetivo do SFCR e perfil de projeto

Como em todo desenvolvimento de projeto, o primeiro passo é conhecer o objetivo do sistema que se deseja dimensionar, quais são suas limitações, suas características, que demanda ele deve atender, entre outros. Essa etapa é, geralmente, atendida através de uma conversa com o cliente e uma visita técnica ao local.

Não adianta dimensionar um sistema para todo o consumo do cliente se o local não está apto a recebê-lo ou não possui disponibilidade de espaço. Assim, deve-se conhecer a finalidade do projeto, cujas opções são bastante variadas: atendimento completo ao consumo, atendimento parcial por limitação de área ou outro fator, solução energética para marketing sustentável, acionamento de bombas ou máquinas específicas, entre outros.

Durante a visita técnica ao local, o projetista pode identificar uma série de informações que contribuem para uma boa avaliação de perfil do SFCR, tais como:

- ✓ A disponibilidade e/ou limitações da área para instalação;
- ✓ A orientação e a inclinação das infraestruturas disponíveis à colocação do sistema;
- ✓ O tipo de estrutura de fixação a ser utilizada;
- ✓ As características civis e elétricas do local de instalação, bem como a localização do quadro geral e do medidor de energia
- ✓ A ocorrência de sombreamento;

- ✓ O espaço adequado para a instalação dos inversores, das caixas de junção, dos interruptores, entre outros;

Estas atividades permitem o correto planejamento do projeto que se deseja desenvolver.

5.2 Disponibilidade solar do local

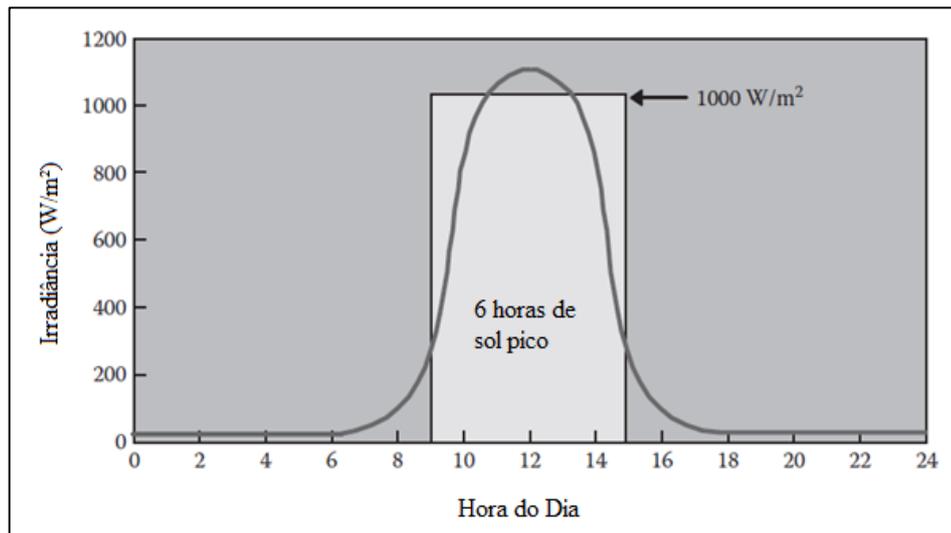
O segundo passo para o projeto é conhecer a disponibilidade solar do local de instalação do SFCR. Esta etapa é de suma importância para a maioria das demais, pois grande parte dos cálculos serão baseados neste levantamento.

O conhecimento da disponibilidade solar pode ser adquirido através de medições solarimétricas do local, as quais podem ser de domínio público ou privado, no caso de estações particulares. No entanto, para projetos de pequenas dimensões (limite de até 5MW para minigeração fotovoltaica, de acordo com a Resolução Normativa Nº 687), normalmente não se utilizam estações solarimétricas particulares, pois além do elevado investimento, a legislação não faz essa exigência; apenas usinas solares possuem este requerimento.

Dessa maneira, para desenvolvimento de projetos de micro e minigeração distribuída, são utilizados dados solarimétricos de fontes públicas, tais como: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Solar Wind Energy Resource Assessment (SWERA). Estes são apenas alguns exemplos de bancos de dados de domínio público que podem ser utilizados para esta pesquisa, não sendo únicos ou limitantes.

Como já descrito, o valor típico de irradiação solar na superfície da Terra é de 1000 W/m², no entanto, devido a movimentação do Sol, a distribuição da radiação varia ao longo do dia, como ilustra o gráfico 5:

Dentro desses bancos de dados, deve-se buscar valores de irradiação solar global no plano horizontal (ISGPH), normalmente medidos em kWh/m².dia e denominados horas de sol pico (HSP). As HSP determinam um valor de energia acumulado dentro de um dia, ou seja, são as horas hipotéticas do dia com irradiância de 1000 W/m².

Gráfico 5 – Irradiância e insolação expressas em HSP (ex. 6 HSP = 6kWh/m².dia)

Fonte: Adaptado de FOSTER; GHASSEMI; COTA (2009, p. 154).

Cada região do globo possui uma distribuição própria de radiação solar, logo, o conhecimento deste valor é de suma importância para o correto dimensionamento do SFCR do local. Vale ressaltar que os bancos de dados citados fornecem valores de HSP médio mensal, devido à mudança das estações do ano.

5.3 Análise de faturamento de energia elétrica

Dependendo do perfil do sistema, esta análise pode ou não ser necessária, pois caso o local possua uma grande limitação de área, pode ser visível que sua potência instalável não compensará todo o consumo de energia do local. Green Pro (2004) estabelece uma regra empírica de que 1kWp de potência do sistema equivale a, aproximadamente, 10 m² de área instalada, logo, percebe-se que a razão área por geração de um sistema fotovoltaico é pequeno.

Assim, caso seja constatado que a área de instalação é, claramente, insuficiente para atender ao consumo de energia elétrica, fica a critério do projetista a verificação da conta de energia.

No entanto, para que se possa elaborar uma análise financeira condizente com a realidade do cliente, sugere-se a completa verificação da conta. Ademais, acredita-se que a indicação do percentual de geração sobre o consumo qualifica positivamente o projeto técnico, além de tornar a dimensão do mesmo mais perceptível para o

cliente. Assim sendo, propõe-se, para este trabalho, que a análise do faturamento de energia elétrica seja um dos passos para projeto de SFCR.

Uma simples conta de energia abrange uma grande densidade de informações, tomando como exemplo um faturamento da COELCE de um cliente em alta tensão (AT) e baseando-se nas descrições disponíveis da seção “Entenda sua conta” no Portal Coelce, indica-se os dados mais relevantes a título da análise:

- ✓ Modalidade tarifária: local onde são encontrados os detalhes da tarifa de faturamento do cliente, indicação de período úmido ou seco e classe e subclasse do cliente. Aqui é possível perceber claramente o grande peso da fonte hídrica no preço da energia elétrica brasileira. Além disso, verifica-se se o cliente possui diferença tarifária dependente das horas de utilização do dia. No entanto, para clientes em baixa tensão, a informação mais importante deste campo é o tipo de ligação da unidade consumidora (monofásico, bifásico ou trifásico).
- ✓ Quadro de grandezas medidas: local onde são encontrados os valores de consumos, demandas e energia reativa, ponta e fora de ponta, medidos, contratados e ultrapassados. Com esses dados, é possível que se tenha uma ideia do funcionamento da unidade consumidora no mês referido, quanto de energia foi consumido, quanto de sua demanda contratada foi utilizado ou ultrapassado, em seus respectivos postos tarifários.
- ✓ Valores de faturamento: quadro indicativo de consumo e demanda medidos no mês, outros encargos, valor das tarifas e total a pagar. Aqui situa-se uma das informações mais importantes, o valor da energia paga, dado que será utilizado na análise financeira do sistema. Além disso, é possível visualizar alguns dos montantes que continuarão a ser pagos, mesmo após a geração própria, tais como a taxa de iluminação pública e os impostos.
- ✓ Histórico de consumo: tabela indicativa do consumo e da demanda, ponta e fora de ponta nos últimos 12 meses. Estes valores também são muito importantes, pois fornecem o consumo médio mensal da unidade consumidora, dado utilizado no cálculo da energia de compensação.
- ✓ Quadro de valores de consumo e demanda: indicador dos valores de consumo e demanda, ponta e fora de ponta, registrados, contratados e ultrapassados no mês. A informação importante neste campo é o valor de demanda contratada que também é utilizado no cálculo da energia de compensação.

5.4 Cálculo da energia de compensação preliminar (E_{comp})

Conhecidos os objetivos e perfil do SFCR, e a disponibilidade solar do local de instalação, pode-se, então, calcular a energia que deverá ser gerada pelos painéis fotovoltaicos, também chamada de energia de compensação.

As normas limitam a potência instalada do SFCR à potência disponibilizada para a unidade consumidora onde a central geradora será conectada. Esta potência disponibilizada é o valor que o sistema elétrico da distribuidora deve dispor para atender às necessidades da unidade consumidora. Para clientes do grupo A, ela equivale à demanda contratada, expressa em kW e, para clientes do grupo B, ela resulta da multiplicação da capacidade nominal de condução da corrente elétrica do dispositivo geral da unidade consumidora pela tensão nominal, observando o fator específico referente ao número de fases, expressa em kVA.

No entanto, caso o consumidor deseje instalar um SFCR com potência superior a estes limites, o mesmo pode fazer a solicitação do aumento da potência disponibilizada, sendo dispensado o aumento da carga instalada.

É importante ressaltar que a norma não deixa claro qual é a capacidade do SFCR que deve atender ao limite da potência disponibilizada. Assim, tem-se duas prováveis opções: a potência nominal instalada dos MF e a potência de saída dos inversores. Para este trabalho, a potência nominal dos MF foi priorizada, o que permitiu uma maior análise dessa limitação.

Além disso, de acordo com as normas, cada grupo de consumidor possui um custo mínimo de energia a ser pago, independente da geração distribuída, o qual pode ou não afetar o cálculo da energia de compensação.

Dessa maneira, propõe-se dois cálculos para a energia de compensação, um para cada grupo de consumidor. Além disso, em ambos os métodos, sugere-se a análise tanto da energia necessária para suprir todo o consumo, quanto dos respectivos limites de projeto.

5.4.1 Grupo B – Baixa tensão (BT)

Assim, para clientes do grupo B, a energia de compensação preliminar (E_{comp}), em base mensal e medida em Wh, é calculada por:

$$E_{comp} = E_{cons} - E_{Cmín} \quad (7)$$

Cuja:

E_{cons} é a energia consumida em base mensal, medida em Wh e calculada pela média aritmética dos valores históricos de consumo dos últimos 12 meses da unidade consumidora.

$E_{Cmín}$ é a energia de custo mínimo a ser cobrado, medida em Wh, como previsto pelas normas. Ou seja, mesmo que o SFCR gere todo o montante de energia consumido no mês, o cliente ainda pagará uma quantia referente ao encargo de responsabilidade da distribuidora, que funciona como uma taxa a ser cobrada pela utilização do sistema de distribuição.

Para o grupo B, a energia de custo mínimo é igual ao custo de disponibilidade (CD) do sistema elétrico e, segundo a Resolução Normativa N°414/2010, este valor, em moeda corrente, equivale a:

- ✓ 30 kWh, para ligação tipo monofásica ou bifásica a dois condutores;
- ✓ 50 kWh, para ligação tipo bifásica a três condutores;
- ✓ 100 kWh, para ligação tipo trifásica.

Ou seja, para o grupo B, a energia de custo mínimo e seu respectivo valor em reais são dados, respectivamente, por:

$$E_{Cmín} = C_D \quad (8)$$

$$VE_{Cmín} = C_D * TE \quad (9)$$

Cujo:

$VE_{Cmín}$ é o valor da energia de custo mínimo, em reais, e TE é a tarifa de energia admitida para a unidade consumidora, dada em R\$/Wh. Antes de realizar os cálculos, é importante observar a coerência dos prefixos métricos dos dados, pois alguns dos valores dimensionais aqui apresentados estão em unidade básica de medida.

Assim, a energia de compensação preliminar para clientes em BT é dada por:

$$E_{comp} = E_{cons} - C_D \quad (10)$$

A redução do custo de disponibilidade na energia que o SFCR deve gerar é bastante importante para o cliente em BT, pois independente da carga injetada na rede, a unidade consumidora paga por este “consumo” mínimo. Assim, o não abatimento deste valor pode acarretar em maiores custos para o usuário, já que seu sistema foi dimensionado com uma potência maior do que a necessária.

Existe uma ressalva para este cálculo, visto que a energia excedente é transformada em créditos que podem ser utilizados em outras unidades consumidoras de mesma titularidade onde ocorreu a geração, além da possibilidade de compensação posterior, visto que estes recursos possuem validade de 60 meses. Assim sendo, fica a cargo do projetista e do cliente decidir qual o melhor ajuste de cálculo para a energia de compensação.

A energia de compensação, proposta pela equação (10), dificilmente ocasionará em uma potência superior ao limite máximo permitido para a potência do SFCR, isto porque o limite máximo é calculado em cima da potência máxima suportada pelo sistema elétrico da unidade consumidora. Logo, a análise desse valor máximo somente se faz necessária caso a energia de compensação do sistema ultrapasse o valor da energia consumida do local.

5.4.2 Grupo A – Alta tensão (AT)

Para o grupo A, também existe um valor mínimo a ser pago pelo cliente, independente de todo o seu consumo ter sido atendido pela energia gerada no SFCR. No entanto, este montante não está relacionado ao custo de disponibilidade e sim a demanda contratada da unidade consumidora, que funciona como uma taxa a ser paga pela contínua disponibilidade do sistema da distribuidora para atender àquela potência demandada.

A demanda contratada é um valor de potência a qual possui tarifa pré-determinada pela distribuidora. Seu montante depende, unicamente, da máxima potência que foi exigida da rede durante o mês de referência, logo, não tem relação com a quantidade de energia consumida.

Assim sendo, a energia de custo mínimo não é aplicável para clientes em AT, pois sua despesa mínima é calculada em cima da potência e não da energia. Logo, o SFCR deve, preferencialmente, atender todo seu consumo.

A energia de compensação preliminar para clientes em AT é, então, dada por:

$$E_{comp} = E_{cons} \quad (11)$$

Desta forma, tem-se o valor ideal, preliminar, de energia que um SFCR deve gerar para que o consumo da unidade consumidora seja totalmente atendido. O problema é que, para clientes em AT, geralmente este valor ocasiona uma potência

que ultrapassa o limite máximo permitido para a potência do SFCR. Assim sendo, é necessário avaliar o custo benefício de ultrapassar esta margem.

Conhecido o valor de energia de compensação do SFCR, o próximo passo é saber o que este valor representa em termos de potência do arranjo, ou seja, calcular a potência do SFCR.

5.5 Cálculo da potência do SFCR

A potência do SFCR (Pot_{SFCR}) é calculada, em Watts, por:

$$Pot_{SFCR} = \frac{E_{compD}}{HSP_{méd}} \quad (12)$$

Cuja:

E_{compD} é a energia de compensação em base diária e $HSP_{méd}$ é o valor médio das HSP pré-determinadas.

5.6 Definição dos componentes a serem utilizados no SFCR

Para dar continuidade ao projeto, é necessário que se defina quais equipamentos serão utilizados no SFCR, pois o conhecimento de suas características técnicas é necessário para prosseguir com o dimensionamento. No caso de posterior mudança desses componentes, ter-se-á que refazer todo o processo a partir deste item.

5.7 Cálculo do número de módulos fotovoltaicos

Em mãos da potência do SFCR, dimensiona-se a quantidade de módulos fotovoltaicos preliminar, sua associação e o(s) inversor(es) a serem utilizados. A quantidade de módulos fotovoltaicos (N_{mod}) é:

$$N_{mod} = \frac{Pot_{SFCR}}{P_{N\ mod}} \quad (13)$$

Cuja:

$P_{N \text{ mód}}$ é a potência nominal, em watts, do MF escolhido para projeto. Após a determinação do número de módulos, é necessário fazer uma análise para escolher o melhor inversor e a melhor configuração dos painéis.

5.8 Dimensionamento dos inversores e configuração de painéis

Como já apresentado, os inversores possuem características elétricas de entrada e saída, os quais devem ser analisados para o design da associação e para a conexão com a rede, respectivamente. Assim, cada parâmetro de entrada e saída estabelece limites de operação que devem ser atendidos para que o inversor funcione satisfatoriamente. A configuração do sistema e da instalação elétrica determinam o número, o nível de tensão e a classe de potência dos inversores.

Propõe-se que o primeiro passo para a escolha do inversor seja a análise de seus parâmetros de saída, pois os mesmos devem ser compatíveis com a rede a qual se pretende conecta-lo. Para isso, é preciso verificar a frequência, corrente e tensão de operação do equipamento. Após certificado que o inversor atende aos requisitos de distribuição local, tem-se a análise de seus parâmetros de entrada.

O *Clean Energy Council* (2013) propõe que, para facilitar o design eficiente de um SFCR, a potência em CA de saída do inversor não deve ser menor do que 75% da potência nominal do arranjo fotovoltaico, o qual não deve ser superior ao limite máximo permitido pelo fabricante do inversor para a potência em CC de entrada. É importante lembrar que a potência do painel é de escolha do projetista, o qual pode fazer diferentes associações para adaptar os módulos ao inversor.

5.8.1 Análise da potência de entrada do inversor

O inversor possui uma potência em CC máxima admissível que não deve ser ultrapassada. Este valor determina o número máximo de MF ($N_{\text{mód,máx}}$) que podem ser conectados ao equipamento, calculado por:

$$N_{\text{mód,máx}} = \frac{P_{\text{CC-máx}}}{P_{N \text{ mód}}} \quad (14)$$

Cujo:

$P_{\text{CC-máx}}$ é o valor de potência máxima admissível pelo inversor.

5.8.2 Análise da tensão de entrada do inversor

Sabendo que módulos ligados em série resultam no somatório de suas tensões, a tensão de entrada do inversor deve admitir a tensão equivalente da string. Assim, a tensão de operação do arranjo fotovoltaico deve ser analisada para as duas situações extremas de funcionamento, para garantir que estes limites estejam dentro das margens estabelecidas pelo fabricante do inversor.

5.8.2.1 Número máximo de módulos por string do inversor

O painel fotovoltaico deverá fornecer, ao inversor, um valor de tensão sempre abaixo do valor de máxima tensão de entrada permitida, assim, o número máximo de módulos em série por string ($N_{\text{máx módulo}}^S$) pode ser calculado por:

$$N_{\text{máx módulo}}^S = \frac{V_{CC-\text{máx}}}{V_{OC \text{ módulo}}} \quad (15)$$

Cujo:

$V_{CC-\text{máx}}$ é o valor de tensão máxima admissível pelo inversor e $V_{OC \text{ módulo}}$ é o valor de tensão em circuito aberto do MF.

5.8.2.2 Número mínimo de módulos por string do inversor

Da mesma maneira, é necessário analisar se tensão do arranjo fotovoltaico fornece o valor mínimo de tensão requerido para o funcionamento do inversor. Assim, o número mínimo de módulos por string ($N_{\text{mín módulo}}^S$) é dado por:

$$N_{\text{mín módulo}}^S = \frac{V_{CC-\text{mín}}}{V_{MP \text{ módulo}}} \quad (16)$$

Cuja:

$V_{CC-\text{mín}}$ é a mínima tensão de funcionamento do inversor e $V_{MP \text{ módulo}}$ é a tensão em máxima potência do módulo fotovoltaico.

5.8.3 Análise da corrente de entrada do inversor

De forma similar, a corrente de operação do arranjo fotovoltaico deve ser analisada para as duas situações extremas de funcionamento, para garantir que estes limites estejam dentro das margens estabelecidas pelo fabricante do inversor.

5.8.3.1 Número máximo de strings por inversor

A corrente máxima de entrada do inversor determina o número máximo de strings que podem ser paralelizadas no painel ligado à sua entrada de corrente contínua. Assim, o número máximo de strings em paralelo ($N_{m\acute{a}x\ string}^P$) é dado por:

$$N_{m\acute{a}x\ string}^P = \frac{I_{CC-m\acute{a}x}}{I_{SC\ m\acute{o}d}} \quad (17)$$

Cuja:

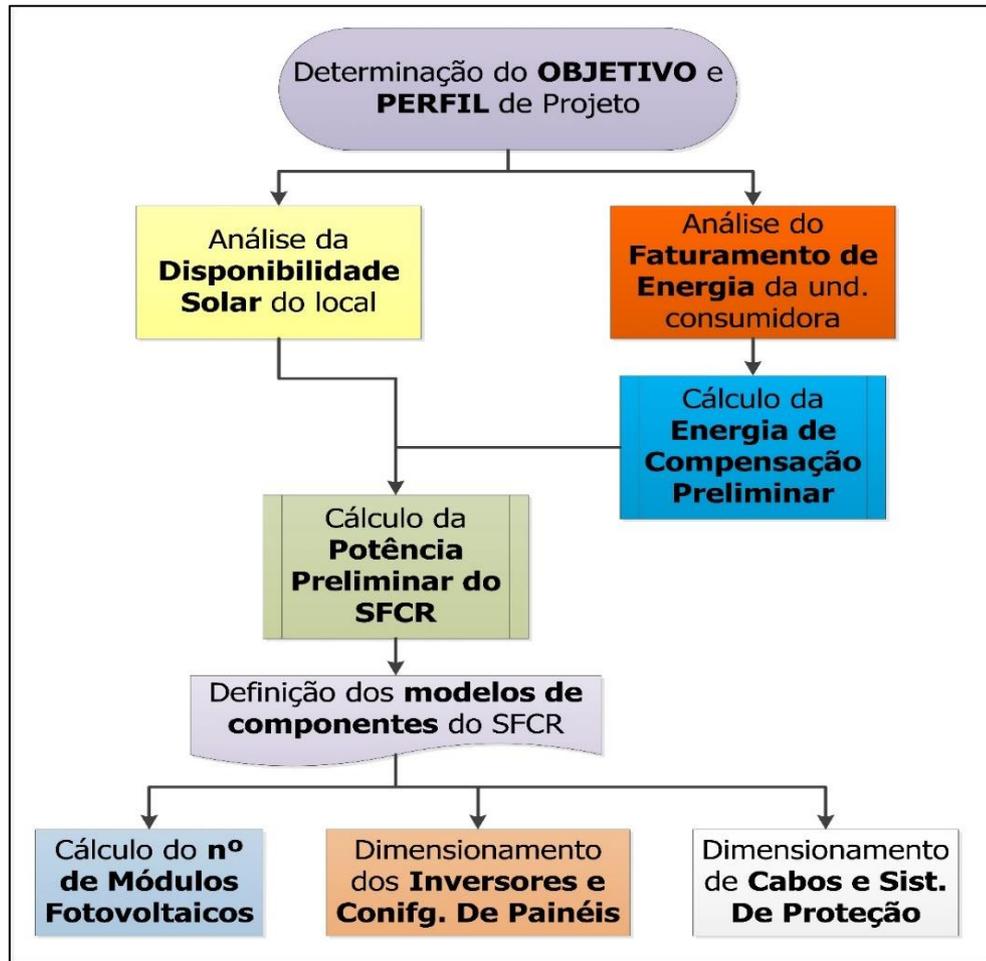
$I_{CC-m\acute{a}x}$ é a corrente máxima admissível para uma entrada do inversor e $I_{SC\ m\acute{o}d}$ é a corrente em curto-circuito do MF.

Após estas análises, é possível determinar a forma de associação dos módulos fotovoltaicos e inversores. Algumas vezes, pode-se encontrar diferentes tipos de combinação para as mesmas características, deve-se, então, procurar aquela que permita ao inversor trabalhar com maior eficiência, através, por exemplo, da observação das curvas de eficiência do equipamento selecionado.

Muitas vezes, a escolha dos equipamentos se dá por motivos comerciais, tornando o processo de dimensionamento mais direto, já que as características elétricas já serão pré-determinadas. É importante destacar que os componentes selecionados para SFCR devem ser registrados no Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

Em resumo, o dimensionamento preliminar de um SFCR envolve as atividades apresentadas no fluxograma da figura 3:

Figura 3 – Fluxograma de atividades para dimensionamento preliminar de um SFCR.



Fonte: Elaborado pela autora.

O dimensionamento de cabos e sistemas de proteção não serão abordados no escopo deste trabalho, no entanto, sua metodologia pode ser encontrada na literatura e nas normas brasileiras e internacionais, tais como: ABNT NBR-5410:2008, IEC 60364-7-712, NFPA 70, IEC TS 62548:2013, IEC 62446:2009, ABNT NBR-5419:2005.

6 ANÁLISE DE PERDAS E AJUSTES APLICÁVEIS AOS SFCR

A metodologia até aqui apresentada compõe o projeto simplificado de um SFCR, isto porque os cálculos apresentados não levaram em consideração as perdas de capacidade sofridas pelos mais variados componentes do sistema e fatores externos, além dos ajustes relevantes de projeto, o que ocasiona uma produção final de energia menor do que a projetada. Caso o projetista deseje ter maior acurácia em seu trabalho, faz-se necessário uma análise das perdas e ajustes para recálculo do dimensionamento do SFCR.

Segundo o *Green Rhino Energy (2013)*, é mais intuitivo analisar as perdas de energia que acontecem a cada estágio de conversão do que avaliar as eficiências dos componentes. Assim, o autor separa as perdas em quatro categorias: antes, durante e depois da geração nos módulos fotovoltaicos e sua operação e manutenção (O&M).

O quadro 1 resume as principais perdas aplicáveis aos SFCR.

Quadro 1- Principais perdas aplicáveis aos SFCR

Categoria	Fator	Símbolo	Descrição	Valores Típicos
Antes dos Módulos	Correção do valor de Radiação	K_{RAD}	O valor de radiação deve ser corrigido para o plano e a orientação da instalação dos módulos.	Estimar para cada sistema (Radiasol)
	Sombreamento	K_{SOMB}	Podem ser causadas por árvores, edifícios, etc. Dependendo da célula, um sombreamento parcial pode ter efeito significativo.	1% - 10%
	Sujeira	K_{SUJ}	Acúmulo de partículas de poeira, fuligem, fezes de pássaros, etc.	2%-10%
Nos Módulos	Tolerância de Potência Pico	K_{TOL}	Alguns módulos possuem um valor de tolerância sobre sua potência pico declarada.	Até 5%. (Consultar manual do equipamento)
	Mismatching	K_{MIS}	Provocado pelas incompatibilidades elétrica entre os módulos fotovoltaicos.	1% - 2%
	Fator Temperatura	K_{TEMP}	O aumento da temperatura de operação dos módulos reduz a potência pico de saída dos mesmos.	5% - 20% (Estimar com base nos coef. do fabricante)
Depois dos Módulos	Cabeamento CC	K_{CC}	Perdas por efeito Joule no circuito CC.	0,5% - 1%
	MPPT	K_{MPPT}	Perdas durante ou entre os períodos de rastreamento do ponto de máxima potência do painel fotovoltaico.	1% - 2%
	Conversão CC/CA	K_{INV}	Perdas devido a eficiência do inversor ser menor do que 100%.	2% - 10% (Consultar manual do equipamento)
	Cabeamento CA	K_{CA}	Perdas por efeito Joule no circuito CA.	0,5% - 1%
O&M	Tempo de Parada	K_{OEM}	Tempo em que o sistema fica desligado para manutenção.	Normalmente este valor é muito pequeno para SFCR

Fonte: Elaborado pela autora baseado em Green Rhino Energy (2013).

Apresenta-se, então, uma breve avaliação de algumas dessas perdas e ajustes.

6.1 Correção do valor de radiação solar para o plano dos módulos fotovoltaicos

O conhecimento da orientação e do ângulo de incidência da radiação solar no plano dos módulos fotovoltaicos é importante, pois eles afetam diretamente a intensidade da radiação que chega a superfície, deve-se, assim, corrigir o valor das HSP com base nestes dados.

O Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) desenvolveu um software chamado RADIASOL que utiliza modelos matemáticos disponíveis na literatura e de desenvolvimento próprio para o cálculo da intensidade de radiação solar em superfícies inclinadas. Assim, este programa pode ser utilizado para a correta avaliação das HSP no plano dos módulos fotovoltaicos.

6.2 Perdas por fator temperatura

Como já mencionado, a temperatura de operação dos módulos possui grande interferência sobre os valores de potência, tensão e corrente gerados pelo efeito fotovoltaico. Todos os fabricantes desse componente fornecem, em seu manual, os coeficientes de perda por temperatura, dados em %/°C, o que permite que este efeito seja avaliado para cada um desses parâmetros, como descrito a seguir.

6.2.1 Estimativa da temperatura de operação do módulo fotovoltaico

A temperatura real de operação, em °C, de um módulo fotovoltaico é dada por:

$$T_{real} = T_{amb} + \Delta T \quad (18)$$

Cuja:

T_{amb} é a média anual das temperaturas ambiente máximas do local de instalação, seu valor é dado em °C e pode ser avaliado através dos dados de normais climatológicas do INMET. O valor ΔT é a diferença de temperatura entre as células e a temperatura ambiente dado pela equação (6). Sabendo que o Brasil apresenta altos níveis de irradiação solar, propõe-se o uso de um valor médio para ΔT , como mostrado no quadro 2.

Quadro 2 – Demonstração de valor médio para ΔT no Brasil.

ΔT [°C]	G [W/m ²]
19,8	700
21,5	750
23,2	800
24,9	850
26,6	900
28,3	950
30	1000
MÉDIA	24,9

Fonte: Elaborado pela autora

Assim, para efeito de cálculo, considera-se 25°C como a média de diferença de temperatura entre as células e a temperatura ambiente.

É importante ressaltar que o tipo de estrutura de fixação utilizado no sistema, o local de instalação e a velocidade do vento também possuem influência sobre a temperatura de operação da célula, pois dependendo de alguns fatores, como espaço para ventilação, a transferência de calor é maior ou menor, alterando a temperatura dos módulos. Este trabalho, no entanto, não levará em consideração esta análise.

6.2.2 Determinação da temperatura de cálculo

A temperatura de cálculo é o valor, em °C, utilizado nos cálculos de correções por fator temperatura, dado pela diferença entre a temperatura real de operação dos módulos fotovoltaicos e a temperatura de referência STC, para qual as características elétricas do equipamento foram estimadas.

$$T_{calc} = T_{real} - T_{STC} \quad (19)$$

Sabendo que:

T_{STC} é 25°C e substituindo o valor de T_{real} , tem-se:

$$T_{calc} = T_{amb} + 25^{\circ}C - 25^{\circ}C = T_{amb} \quad (20)$$

Assim, a temperatura de cálculo é igual a média anual das temperaturas ambiente máximas do local de instalação.

6.2.3 Compensação por fator temperatura

6.2.3.1 Potência pico

A perda por temperatura na potência pico dos MF é calculada por:

$$L_{Pot} = K_{Pot} * T_{calc} \quad (21)$$

Cujo:

K_{Pot} é o coeficiente de perda por temperatura para a potência pico, dado em %/°C e encontrado no manual dos MF.

A potência pico compensada é, então, calculada, em Watts, por:

$$P_{N\ mód,c} = P_{N\ mód} * (100 - L_{Pot}) \quad (22)$$

6.2.3.2 Tensão

A perda por temperatura na tensão dos módulos fotovoltaicos é calculada por:

$$L_V = K_V * T_{calc} \quad (23)$$

Cujo:

K_V é o coeficiente de perda por temperatura para a tensão, dado em %/°C e encontrado no manual dos módulos fotovoltaicos.

A Tensão compensada é, então, calculada, em Volts, por:

$$V_c = V_X * (100 - L_V) \quad (24)$$

Cujo:

V_X é um indicativo de que este cálculo pode servir para calcular tanto a tensão em máxima potência compensada quanto a tensão em circuito aberto compensada.

6.2.3.3 Corrente

O ganho por temperatura na corrente dos módulos fotovoltaicos é calculado por:

$$L_I = K_I * T_{calc} \quad (25)$$

Cujo:

K_I é o coeficiente de ganho por temperatura para a corrente, dado em $\%/^{\circ}\text{C}$ e encontrado no manual dos módulos fotovoltaicos.

A corrente compensada é, então, calculada, em Ampères, por:

$$I_c = I_x * (100 - L_I) \quad (26)$$

Cujo:

I_x é um indicativo de que este cálculo pode servir para calcular tanto a corrente em máxima potência compensada quanto a corrente de curto-circuito compensada.

6.3 Perdas de conversão CC/CA

Como toda máquina elétrica, o inversor possui uma eficiência de funcionamento a qual limita sua capacidade de conversão. Assim, é importante considerar esta perda para um projeto mais criterioso.

7 REDIMENSIONAMENTO DE UM SFCR

Fica a critério do projetista quais perdas considerar para um melhor dimensionamento do sistema. Esses coeficientes devem, então, ser unificados em um só valor, chamado fator de perda global (K_G), dado pelo produto de todos os coeficientes de perda considerados, como mostrado na equação (27):

$$K_G = \prod K_i \quad (27)$$

Cujo:

K_i representa todos os coeficientes de perda considerados para cálculo.

7.1 Cálculo da Potência do SFCR – Corrigido

Após a avaliação da perda global da capacidade de geração, deve-se recalcular a potência do SFCR para que o mesmo possa fornecer, efetivamente, toda a energia demandada pela unidade consumidora, como mostrado na equação (28):

$$Pot_{SFCR,c} = \frac{Pot_{SFCR}}{K_G} \quad (28)$$

Cuja:

$Pot_{SFCR,c}$ é a nova potência corrigida do sistema, a qual deve ser capaz de fornecer, ao final de todo o processo de geração, a energia demandada pela unidade consumidora.

Como a potência do SFCR mudou, deve-se reavaliar o dimensionamento dos módulos, inversores e cabos. O processo é muito semelhante ao já apresentado, porém, é importante reconsiderar os limites de funcionamento dos painéis devido as mudanças por fator temperatura para, então, garantir que os mesmos obedeçam aos requisitos de funcionamento do inversor, como mostram os itens a seguir.

7.2 Cálculo do número de MF – Corrigido

A nova quantidade de módulos fotovoltaicos ($N_{mod,c}$) é:

$$N_{mod,c} = \frac{Pot_{SFCR,c}}{P_{N\ mod,c}} \quad (29)$$

7.3 Número máximo de módulos por inversor – Corrigido

O número máximo, corrigido, de módulos fotovoltaicos que podem ser conectados ao inversor, é calculado por:

$$N_{mód,máx,c} = \frac{P_{CC-máx}}{P_{N\ mód,c}} \quad (30)$$

Cuja:

$P_{N\ mód,c}$ é a potência nominal do MF compensada para a máxima temperatura de operação no local de instalação.

7.4 Número máximo de módulos por string – Corrigido

Como já mencionado, a tensão dos módulos fotovoltaicos aumenta com a diminuição da temperatura, logo, deve-se analisar seu valor de circuito aberto, no arranjo, para a menor temperatura de operação do equipamento, garantindo, assim, que o painel fornecerá um valor de tensão sempre abaixo do máximo permitido pelo inversor. Assim, o número máximo, corrigido, de módulos em série por string é dado por:

$$N_{máx\ mód,c}^S = \frac{V_{CC-máx}}{V_{OC\ mód,c}} \quad (31)$$

Cuja:

$V_{OC\ mód,c}$ é a tensão em circuito aberto compensada para a menor temperatura de operação do MF. Esta condição é especificada no manual do equipamento e possui valor típico de -40°C , ou seja, esta correção pode ser desconsiderada para SFCR no Brasil.

7.5 Número mínimo de módulos por string – Corrigido

Da mesma maneira, é necessário analisar a tensão do arranjo fotovoltaico para sua maior temperatura de funcionamento e garantir que este valor fornece o mínimo de tensão requerido para a operação do inversor. Assim, o número mínimo, corrigido, de módulos por string é dado por:

$$N_{\text{mín mód},c}^S = \frac{V_{CC-\text{mín}}}{V_{MP \text{ mód},c}} \quad (32)$$

Cuja:

$V_{MP,c}$ é a tensão em máxima potência compensada para a maior temperatura de operação do módulo fotovoltaico. Esta condição também é especificada no manual do equipamento e possui valor típico de 85°C.

7.6 Número máximo de strings em paralelo – Corrigido

Sabe-se, também, que a corrente dos módulos fotovoltaicos aumenta com a temperatura, logo, deve-se analisar seu valor de curto-circuito, no arranjo, para a maior temperatura de operação do equipamento, garantindo, assim, que o painel fornecerá um valor de corrente sempre abaixo do máximo permitido pelo inversor. Assim, o número máximo, corrigido, de strings em paralelo é dado por:

$$N_{\text{máx string},c}^P = \frac{I_{CC-\text{máx}}}{I_{SC \text{ mód},c}} \quad (33)$$

Cuja:

$I_{SC \text{ mód},c}$ é a corrente em curto-circuito compensada para a maior temperatura de operação do módulo fotovoltaico.

Assim, o fluxograma de atividades para o dimensionamento completo de um SFCR pode ser observado na figura 4 abaixo.

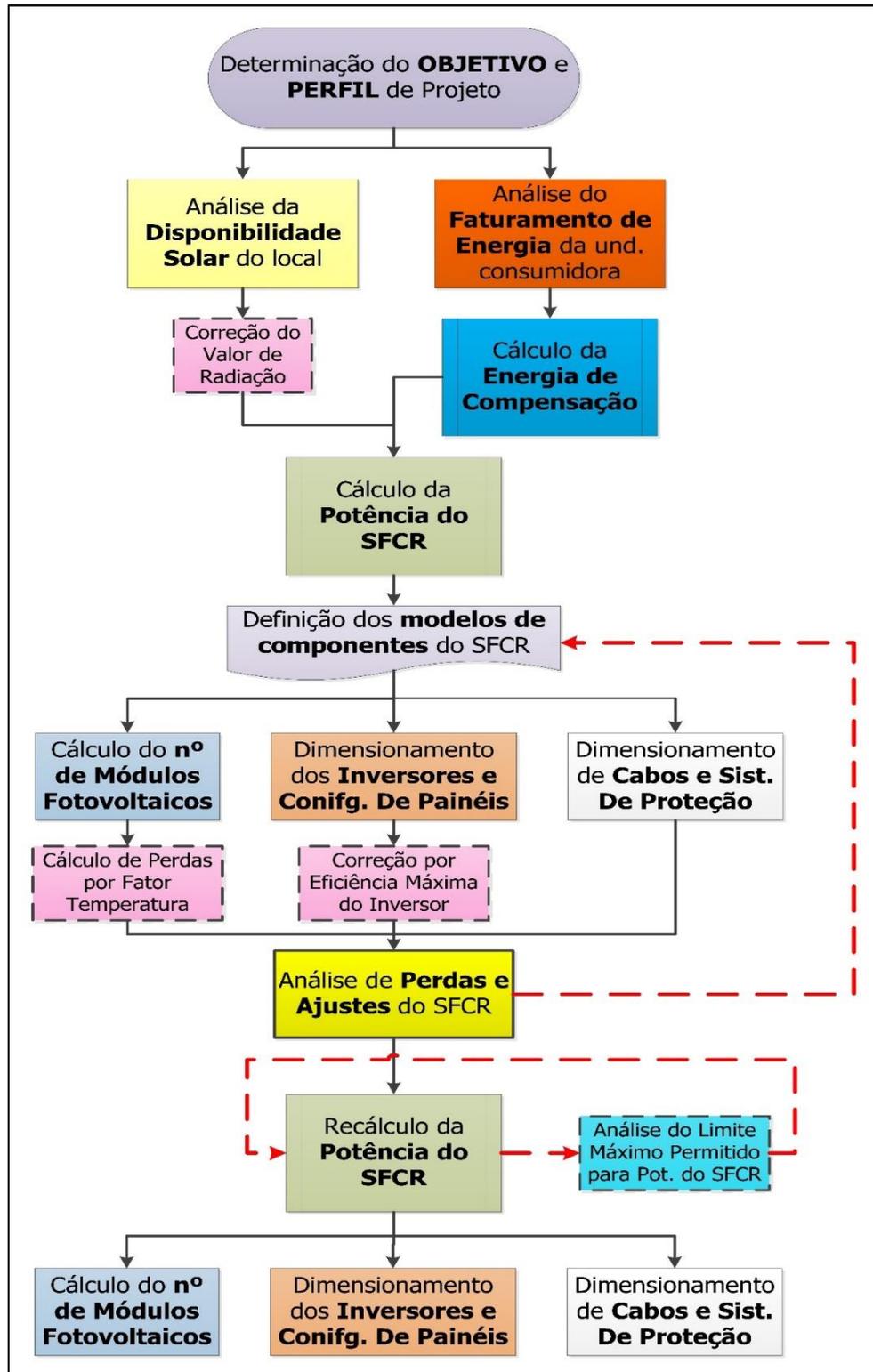
Pode-se observar que os ajustes com maior relevância estão indicados por linha pontilhada e cor rosa, correspondentes a correção do valor de radiação, ao cálculo de perdas por fator temperatura e a correção por eficiência máxima do inversor. Propõe-se que estes itens sejam levados em consideração impreterivelmente; ademais, fica a cargo do projetista quais perdas ou ajustes adicionais avaliar, resultando, assim, em uma análise de perdas e ajustes do SFCR.

Após esta análise, pode-se optar pela troca de algum componente do sistema. Esta situação eventual está indicada por seta pontilhada vermelha. No caso de sucessão desta mudança, deve-se realizar, novamente, todo um conjunto de atividades como estabelecido no fluxograma.

Em seguida, recalcula-se a potência do sistema e o dimensionamento final de seus componentes. Aqui, outra situação eventual é indicada, a de análise do limite

máximo para a potência do SFCR que, caso necessária, pode ou não resultar em uma mudança da potência do sistema, ocasionando nova avaliação dos equipamentos.

Figura 4 – Fluxograma de atividades para dimensionamento de um SFCR



Fonte: elaborado pela autora.

8 PROJETO DE SFCR PARA FÁBRICA DE RAÇÕES DO RAMO DA AVICULTURA

O presente trabalho tem como objetivo aplicar a metodologia abordada para o projeto de um SFCR para uma fábrica de rações do ramo da avicultura localizada na cidade de Iguatu - Ceará, Brasil.

Apresenta-se, assim, as etapas para o dimensionamento do sistema bem como suas considerações e análise financeira simplificada.

8.1 Descrição do site: Objetivo e perfil do projeto

A referida fábrica produz cinco tipos de rações para alimentar frangos de uma granja durante todo o seu ciclo de vida, que tem, em média, duração de 45 dias.

De acordo com o avicultor responsável, a fábrica possui uma capacidade de produção diária de 80 mil kg de ração. Seu funcionamento se dá em horário comercial e o número de empregados gira em torno de 5 pessoas, dependendo da quantidade de aves na granja no período.

O objetivo do avicultor, como cliente, é produzir todo seu consumo de energia através de energia solar fotovoltaica diminuindo, assim, seu faturamento de energia, além de proporcionar uma conotação sustentável para sua empresa.

Durante a visita técnica ao local, observou-se que há grande espaço disponível dentro do terreno da fábrica, assim, optou-se por dimensionar o sistema para instalação no chão. Verificou-se, também, a necessidade de reforço e/ou reformas em algumas instalações elétricas do local, principalmente em alguns quadros de distribuição. As figuras 5 a 20 ilustram algumas das características da fábrica, tais como sua área externa e interna, suas principais cargas, seu quadro de distribuição, seu medidor de energia, entre outros.

Assim, ficam definidos o objetivo e o perfil do projeto:

Objetivo: gerar toda a energia média consumida pela unidade consumidora.

Perfil: há grande disponibilidade de espaço para instalação do SFCR no chão; o local é plano sem inclinação aparente; as estruturas utilizadas serão para fixação no solo; há necessidade de reforços e reformas na instalação elétrica do local; sugere-se limpeza e nivelamento do local de instalação dos módulos, além de construção de

local adequado para abrigo dos inversores; e não foram detectados agentes de sombreamento.

As principais cargas instaladas na fábrica e suas respectivas potências são:

- ✓ 1 Quebrador – 60 CV;
- ✓ 2 Extrusoras – 60 e 100 CV;
- ✓ 1 Misturador – 15 CV;
- ✓ 1 Prensa – 15 CV;
- ✓ Peneira – 3CV;
- ✓ 1 Misturador para micro ingredientes – 5CV;
- ✓ 5 Roscas – 5CV cada;
- ✓ 4 Elevadores – 5CV cada;

Figura 5 – Visão externa da fábrica.



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 6 – Provável área de instalação do SFCR.



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 7 - Área de descarrego de rações finalizadas.



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 8 – Motor de depósito de ração.



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 9 – Prensa de óleo.



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 10 – Peneira.



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 11 – Quebrador acima do misturador.



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 12 – Elevador de caneca.



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 13 – Poste e transformador da fábrica.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 14 – Disjuntor geral da fábrica.



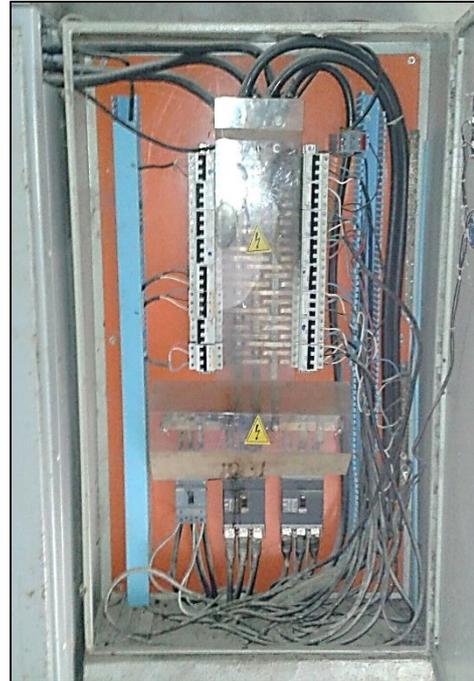
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 15 – Medidor de energia



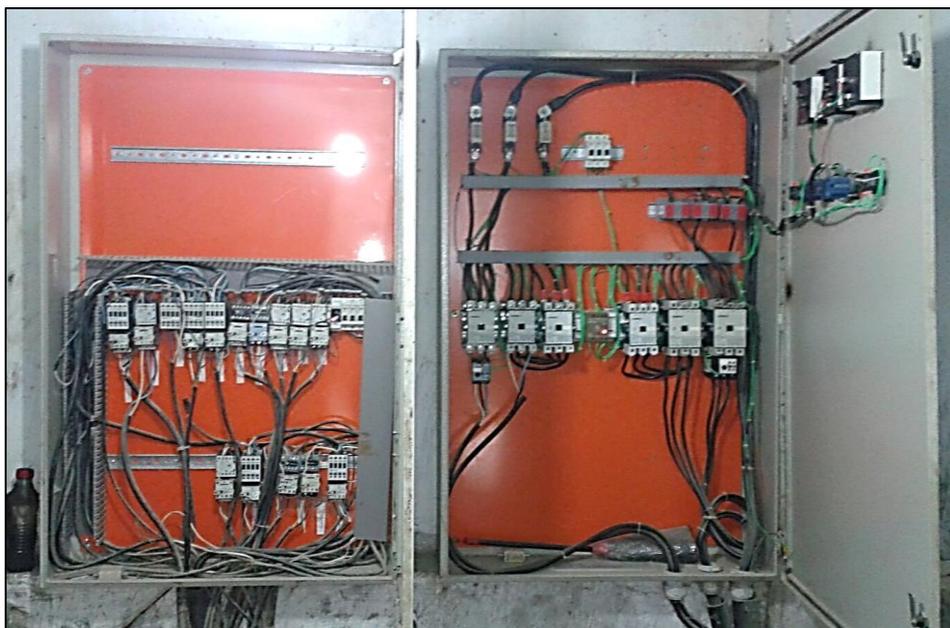
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 16 – Quadro geral de distribuição em baixa tensão.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 17 – Quadro de chaves magnéticas dos equipamentos.



Fonte: arquivo pessoal.

Figura 18 - Quadro de distribuição de energia das extrusoras.



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 19 – Banco capacitor.



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 20 – Quadro de banco capacitor (visão interna).



Fonte: Arquivo pessoal.

8.2 Análise da disponibilidade solar do local

O banco de dados utilizado para a análise da disponibilidade solar do local foi o CRESESB e, dentro deste, selecionou-se a estação de Iguatu - Ceará, os valores compilados foram os de ISGPH. As informações coletadas podem ser observadas no quadro 3.

Quadro 3 - Disponibilidade solar – Fábrica de Rações.

DISPONIBILIDADE SOLAR FÁBRICA DE RAÇÕES	
INFORMAÇÕES GERAIS	
Banco de Dados	CRESESB
Estação	Iguatu, CE
Medição Utilizada	ISGPH
DADOS [kWh/m².dia]	
Jan	5,33
Fev	5,39
Mar	5,31
Abr	5,03
Mai	5,36
Jun	4,92
Jul	5,50
Ago	6,08
Set	5,81
Out	6,53
Nov	6,25
Dez	6,00
MÉDIA	5,63
DELTA	1,61

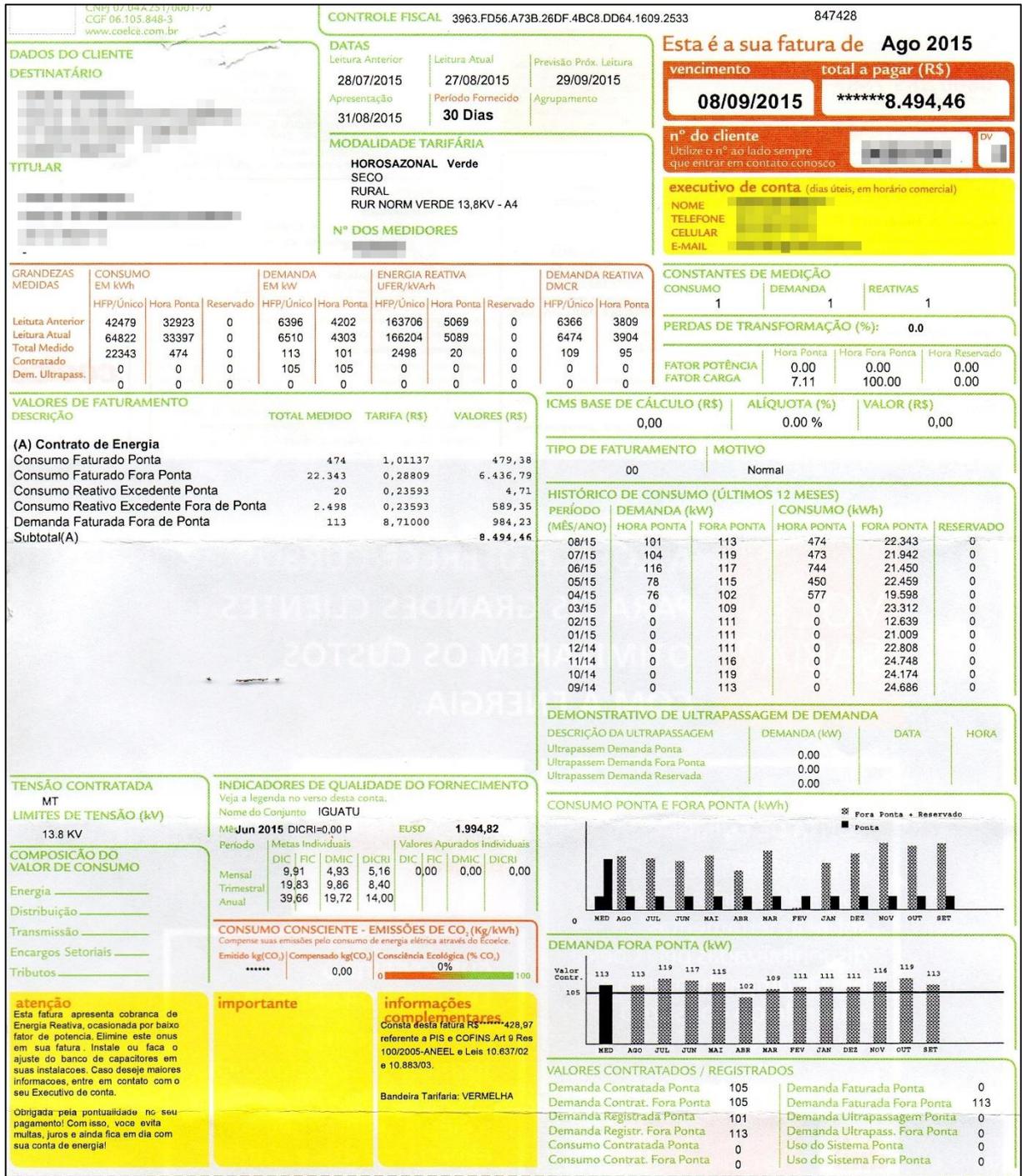
Fonte: Elaborado pela autora através de dados do CRESESB.

Assim, o valor médio de HSP para a localidade é 5,63 kWh/m².dia.

8.3 Análise do faturamento de energia da unidade consumidora

Após o levantamento inicial, realizou-se a análise do faturamento de energia referente ao mês de agosto de 2015 que pode ser observada na figura 21.

Figura 21 – Faturamento de energia da fábrica de rações – Agosto 2015.



Como pode-se perceber, alguns dados foram conservados por respeito a privacidade de informações do cliente.

Diante da metodologia anteriormente exposta, apresenta-se o quadro 4 com as principais informações extraídas da conta de energia.

Quadro 4 – Principais informações – Fábrica de Rações

PRINCIPAIS INFORMAÇÕES - FÁBRICA DE RAÇÕES					
INFORMAÇÕES GERAIS					
Local	Iguatu, CE	Mês de referência	Ago	Ano	2015
Modalidade Tarifária		Horosazonal Verde/ SECO/ RURAL			
Classe do Cliente	A	Subclasse do Cliente:			4
Tensão de fornecimento		13,8	kV		
VALORES CONTRATADOS					
Demanda Contratada Ponta		105		kW	
Demanda Contratada F. Ponta		105		kW	
TE Demanda Contratada		8,71		R\$/kW	
TE Consumo Ponta		1,01137		R\$/kW	
TE Consumo F. Ponta		0,28809		R\$/kW	
CONSUMO MÉDIO					
	Demanda [kW]		Consumo [kWh]		OBS: A Energia Consumida, neste caso, é calculada pela soma das médias de Consumo em Ponta e F. Ponta.
	Ponta	F. Ponta	Ponta	F. Ponta	
08/15	101	113	474	22.343	
07/15	104	119	473	21.942	
06/15	116	117	744	21.450	
05/15	78	115	450	22.459	
04/15	76	102	577	19.598	
03/15	0	109	0	23.312	
02/15	0	111	0	12.639	
01/15	0	111	0	21.009	
12/14	0	111	0	22.808	
11/14	0	116	0	24.748	
10/14	0	119	0	24.174	
09/14	0	113	0	24.686	
MÉDIA	40	113	227	21.764	Econs [kWh] 21.991

Fonte: Elaborado pela autora

A classificação “rural” e “verde” vista na conta apresentada, segundo a COELCE, significam que a demanda a ser faturada se dá pelo maior valor entre a demanda máxima medida no ciclo de faturamento e 10% (dez por cento) da demanda

contratada, conforme informação disponibilizada no Portal Coelce, na seção “Orientações básicas para clientes de Alta Tensão”.

Assim, tem-se que a energia consumida da fábrica é 21.991 kWh/mês.

8.4 Cálculo da energia de compensação

Como explanado, a energia de custo mínimo para clientes em AT é zero. Assim, a energia que deve ser gerada pelo SFCR é igual a média da energia consumida na fábrica, ou seja, 21.991 kWh/mês.

8.5 Cálculo da potência preliminar do SFCR

A potência do SFCR é dada pela equação (34), assim:

$$Pot_{SFCR} = \frac{21.991/30}{5,63} = 130,20 \text{ kW} \quad (34)$$

Como é possível perceber, a potência preliminar do sistema é superior ao valor de demanda contratada da unidade consumidora. Desta forma, é necessário fazer uma análise do custo-benefício que se teria para solicitar o aumento da potência disponibilizada.

Para o caso de clientes em AT, a potência disponibilizada é equivalente à demanda contratada, expressa em kW, logo, o aumento desse valor significa um aumento no valor da demanda contratada do cliente, o qual acarreta em um valor maior de custo mínimo para o cliente.

Existe, ainda, outra ressalva a ser feita em relação ao aumento de demanda contratada, caso o incremento resulte em potência cujo valor exceda a capacidade do transformador da unidade, a troca e adequamento do equipamento deverá ser realizada pelo cliente, ocasionando em mais custos para o mesmo.

Assim, para o caso específico do projeto da fábrica de rações, observou-se que a potência preliminar do SFCR ultrapassou em 25,2 kW a demanda contratada. Porém, como neste valor ainda não estão inclusas as perdas associadas ao sistema, a análise de custo-benefício para o aumento da potência disponibilizada foi realizada apenas após o recálculo do dimensionamento.

8.6 Definição dos modelos de componentes do SFCR

Para este trabalho, foram selecionados modelos de componentes comuns no mercado brasileiro para este tipo de aplicação, dos quais se teve acesso às informações técnicas e financeiras, como mostrado a seguir.

8.6.1 *Módulo fotovoltaico*

O módulo selecionado foi do fabricante Hareon Solar Technology Co., Ltd. cujas principais características estão apresentadas no quadro 5. Seu manual encontra-se disponível no anexo A deste trabalho.

Quadro 5 – Principais características do módulo Hareon.

Módulo Fotovoltaico - HR-265W			
Parâmetros Mecânicos			
Tipo de célula		Policristalina	
Dimensões (CxLxA)		1636x992x35	mm
Nº de células		60	und
Nº de diodos		3	und
Qualificação			
Limites de Temp de Operação		-40 a +85	°C
Parâmetros Elétricos - STC			
Potência Nominal	P_N	265	W
Tensão em Máx. Potência	V_{MP}	30,71	V
Corrente em Máx. Potência	I_{MP}	8,63	A
Tensão em Circuito Aberto	V_{OC}	37,81	V
Corrente em Curto-Circuito	I_{SC}	9,24	A
Eficiência do Módulo	η_m	16,33	%
Coeficientes de Perda por Temperatura			
Potência Nominal	K_{Pot}	-0,44	%/°C
Tensão de Circuito Aberto	K_V	-0,32	%/°C
Corrente de Curto-circuito	K_I	0,055	%/°C
Garantias			
Degradação Máx. de Pot. Pico		3%	1º ano
Degradação Máx. de Pot. Pico		0,70%	24 anos
Garantia física de materiais		10	anos

Fonte: Elaborado pela autora com base em manual do equipamento.

8.6.2 Inversor Interativo

O inversor interativo selecionado foi do fabricante Fronius cujas principais características estão apresentadas no quadro 6. Seu manual encontra-se disponível no anexo B deste trabalho.

Quadro 6 – Principais características do inversor Fronius.

Inversor Interativo - Fronius AGILO 75.0-3			
Características de ENTRADA - CC			
Potência Máx.	$P_{CC-máx}$	78,1	kW
Tensão Nominal	V_{CC-N}	460	V
Tensão Máx.	$V_{CC-máx}$	950	V
Tensão Mín.	$V_{CC-mín}$	460	V
Tensão de Partida	V_{CC-ON}	475	V
Intervalo de tensão MPPT	V_{MPPT}	460 a 820	V
Corrente Máx.	$I_{CC-máx}$	170	A
Corrente Máx. de Curto-Circuito do Arranjo	$I_{SC-A-máx}$	225	A
Nº de MPPT		1	und
Características de SAÍDA - CA			
Potência Nominal	P_{CA-N}	75	kW
Potência Máx.	$P_{CA-máx}$	75	kVA
Corrente Máx.	$I_{CA-máx}$	114,4	A
Tensão Mín.		170	V
Tensão Máx.		270	V
Intervalo de Tensão para Conexão		400 / 230	V
Frequência	f	60	Hz
Taxa de Distorção Harmônica	k	<3	%
Fator de Potência	FP	0,8 e 1	ind./cap.
Dados Gerais			
Dimensões (AxCxL)		1,884 x 1,100 x 0,700	m
Peso		760	kg
Classe de Proteção (partes eletrônicas)		IP 30 (IP 54)	
Consumo noturno		< 36	W
Tipo de instalação		Interna	
Limites de temperatura ambiente		-20 a +50	°C
Umidade permitida		0 a 95	%
Dados Técnicos			
Eficiência Máx	η_{inv}	97,30	%
Eficiência MPPT	η_{MPPT}	>99,9	%

Fonte: Elaborado pela autora com base em manual do equipamento.

8.7 Dimensionamento dos componentes

Os cálculos propostos para os limites preliminares do SFCR foram realizados via software Excel e seus resultados encontram-se no quadro 7.

Quadro 7 – Limites preliminares do SFCR.

LIMITES PRELIMINARES DO SFCR		
Pot _{SFCR}	130,2	kW
Módulos Fotovoltaicos		
N _{mod}	492	und
Inversor Interativo		
N _{mód,máx}	294	und
N ^S _{máx mód}	25	und
N ^S _{mín mód}	15	und
N ^P _{máx string}	18	und

Fonte: Elaborado pela autora.

Através do quadro 8, é possível concluir que são necessários dois inversores interativos para atender a potência do SFCR. Assim, as configurações propostas para os inversores são:

Quadro 8 – Configuração preliminar dos inversores.

Configuração Preliminar dos Inversores					
Inversor 01			Inversor 02		
Nº de MF por string	25	und	Nº de MF por string	22	und
Nº de strings	10	und	Nº de strings	11	und
Total de MF	250	und	Total de MF	242	und
Potência Total (MF)	66,25	kW	Potência Total (MF)	64,13	kW
FDI	1,179		FDI	1,218	
P _{CC-máx} (INVERSOR)	78,1	kW	P _{CC-máx} (INVERSOR)	78,1	kW
0,75% x Pot. Total (MF)	49,69	kW	0,75% x Pot. Total (MF)	48,1	kW
P _{CA-N} (INVERSOR)	75	kW	P _{CA-N} (INVERSOR)	75	kW

Fonte: elaborado pela autora.

Cujo:

FDI é o fator de dimensionamento dos inversores. Os valores de FDI ótimo na literatura, para este tipo de projeto, são controversos. Alguns autores defendem que os inversores devam ser subdimensionados (PEREIRA; GONÇALVES, 2008), enquanto outros acreditam que o sobredimensionamento apresente maiores ganhos energéticos (MONDOL; YOHANIS, NORTON, 2006; *CLEAN ENERGY COUNCIL*, 2013). Para este trabalho, preferiu-se respeitar os limites de entrada do inversor escolhido, acarretando em um $FDI > 1$.

Além disso, a configuração escolhida permaneceu dentro das sugestões, anteriormente relatadas, do *Clean Energy Council* (2013), como também pode ser visto no quadro 8.

9 ANÁLISE DE PERDAS E AJUSTES PARA REDIMENSIONAMENTO DO SFCR DA FÁBRICA DE RAÇÕES

9.1 Correção do valor de radiação solar para o plano dos módulos fotovoltaicos

Para realizar a correção do valor de radiação solar para o plano dos MF, é necessário conhecer o ângulo de inclinação da superfície e sua respectiva orientação.

Calculando o ângulo de inclinação da superfície, através da equação (3), para a latitude de 6.3604° S tem-se que $\beta = 8,09^{\circ}$. Porém, como o valor calculado é menor do que 10° , utiliza-se, $\beta = 10^{\circ}$. Como o local de instalação está localizado no hemisfério sul, a orientação é o norte, ou seja, 0° .

Utilizando o Radiasol, os valores de HSP foram corrigidos e seus resultados podem ser vistos no quadro 9.

Quadro 9 – Disponibilidade solar fábrica de rações – Corrigida.

DISPONIBILIDADE SOLAR FÁBRICA DE RAÇÕES - CORRIGIDA		
INFORMAÇÕES GERAIS		
Banco de Dados	CRESESB	
Estação	Iguatu, CE	
Medição Utilizada	ISGPH	
Software de Correção	RADIASOL	
DADOS [kWh/m².dia]		Δ
Jan	5,06	-0,27
Fev	5,26	-0,13
Mar	5,35	0,04
Abr	5,24	0,21
Mai	5,75	0,39
Jun	5,35	0,43
Jul	5,95	0,45
Ago	6,40	0,32
Set	5,91	0,10
Out	6,38	-0,15
Nov	5,93	-0,32
Dez	5,59	-0,41
MÉDIA	5,68	0,06

Fonte: Elaborado pela autora.

Cujo:

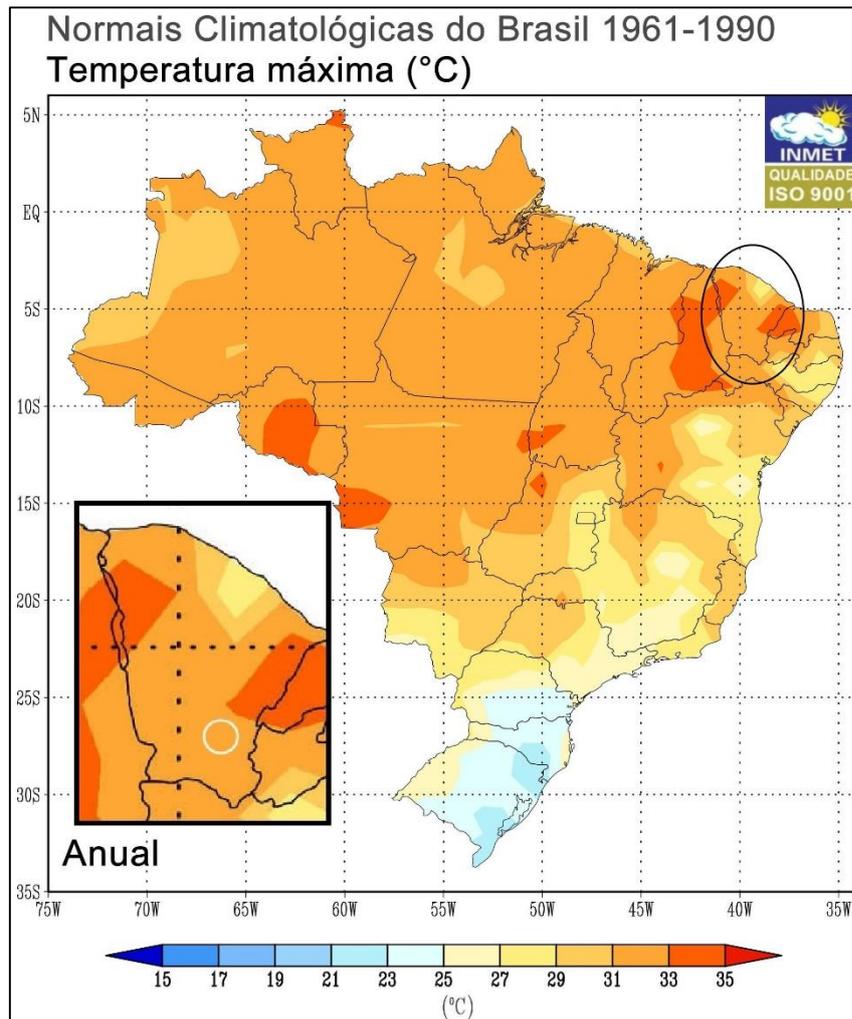
Δ é a diferença entre o valor corrigido e o anterior. Percebe-se, então, que a inclinação de 10° trará maiores ganhos solares para o sistema. O novo valor de HSP médio é $5,68 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$.

9.2 Compensação de perdas por fator temperatura

A média anual das temperaturas ambiente máximas da cidade de Iguatu pode ser observada através da figura 22, adaptada do mapa do INMET. O estado do Ceará está realçado em preto e, na figura maior, a localização aproximada da cidade de Iguatu está destacada em branco. Assim, pode-se perceber que a temperatura máxima está entre 31°C e 33°C , logo, o valor assumido para T_{amb} será 32°C .

Alguns projetos podem demandar uma avaliação mais criteriosa desses valores, fazendo-se necessário um levantamento mensal, ao invés de anual. Porém, foi observado que, para a cidade de Iguatu, não há alterações de temperatura tão relevantes que justifiquem esta análise.

Figura 22 – Média anual das temperaturas máximas de Iguatu - Ceará.



Fonte: Adaptado de INMET.

Assim, as compensações relevantes, para redimensionamento do SFCR, por fator temperatura foram realizados, via software Excel, e os resultados podem ser observados no quadro 10.

Quadro 10 – Resultados de cálculos de compensação por fator temperatura.

Compensação por Fator Temperatura			
	Pot. Nominal [W]	Tensão em MP [V]	Corrente em SC [A]
K [%/°C]	-0,44	-0,32	0,055
T_{calc} [°C]	32	85	85
L [%]	-14,08	-27,2	4,675
Valor Comp.	227,69	22,36	9,67

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que a potência nominal do MF, que antes acreditava-se ser 265 Wp, é, na verdade, 227,69 Wp, logo, esta diferença deve ser considerada no projeto.

Além disso, também houveram mudanças consideráveis em sua tensão de circuito aberto e sua corrente de curto-circuito que foram compensadas para os valores extremos de funcionamento do equipamento, como anteriormente explanado. Assim, faz-se necessário rever a potência do sistema e seus respectivos limites de operação, para correta adequação ao inversor interativo.

9.3 Compensação de perda por conversão CC/CA

Outra perda que deve ser levada em consideração é a eficiência máxima do inversor, que resulta em um déficit da energia na entrada para a energia que sai. Assim, para o inversor escolhido, a eficiência máxima de conversão é dada por $\eta_{inv} = 97,30\%$.

9.4 Outras perdas

Para consideração de outras perdas, as seguintes análises foram feitas:

- ✓ Sombreamento: Foi considerado um valor de 3% devido à presença de árvores, possibilidade de dias nublados, etc.
- ✓ Sujeira: Foi considerado um valor de 3% devido à localização da instalação do sistema, o qual é propício ao depósito de partículas de poeira.
- ✓ Tolerância de potência pico: Não foi considerado, pois, segundo o manual do equipamento, não é tolerância negativa para seu valor de potência.
- ✓ Mismatching: Não foi considerado para o projeto.
- ✓ MPPT: Não foi considerado, pois, segundo o manual do equipamento, sua eficiência é superior a 99,9%.
- ✓ Cabeamento CC e CA: Apesar de, neste trabalho, os cabos não terem sido dimensionados, considerou-se uma perda de 2% para este item.
- ✓ Tempo de parada: Não foi considerado para o projeto.

9.5 Redimensionamento do SFCR

Um resumo das perdas consideradas pode ser visto no quadro 11, junto com o respectivo fator de perda global (K_G).

O coeficiente de perda por fator temperatura e o valor corrigido das HSP não foram considerados para a análise do fator de perda global, pois os mesmos foram utilizados como novos valores de potência pico dos MF e HSP do local, respectivamente.

Quadro 11 – Perdas consideradas para o SFCR da Fábrica de Rações.

PERDAS APLICÁVEIS AO SFCR - FÁBRICA DE RAÇÕES		
	% Perda	K
K_{SOMB}	3	0,97
K_{SUJ}	3	0,97
$K_{CC \text{ e } CA}$	2	0,98
K_{INV}	2,7	0,973
K_G		0,897

Fonte: Elaborado pela autora.

9.5.1 Cálculo da Potência do SFCR – Corrigido

Assim, a potência efetiva do SFCR deverá ser:

$$Pot_{SFCR,c} = \frac{130,20}{0,897} \cong 145 \text{ kW} \quad (35)$$

9.5.2 Cálculo do número de MF – Corrigido

O número de MF necessários para gerar a potência do SFCR será:

$$N_{mod,c} = \frac{145.000}{227,69} \cong 637 \text{ MF} \quad (36)$$

9.5.3 Número máximo de módulos por inversor – Corrigido

O número máximo, corrigido, de MF que poderão ser conectados ao inversor será:

$$N_{mód,máx,c} = \frac{78.100}{227,69} \cong 343 \text{ MF} \quad (37)$$

9.5.4 Número mínimo de módulos por string – Corrigido

O número mínimo, corrigido, de módulos por string será:

$$N_{mín\ mód,c}^S = \frac{460}{22,36} \cong 21 \text{ MF} \quad (38)$$

9.5.5 Número máximo de strings em paralelo – Corrigido

O número máximo, corrigido, de strings em paralelo será:

$$N_{máx\ string,c}^P = \frac{170}{9,67} \cong 17 \quad (39)$$

Assim, um resumo dos limites reais do SFCR e a respectiva configuração dos inversores podem ser observadas nos quadros 12 e 13.

Quadro 12 - Limites reais do SFCR.

LIMITES REAIS DO SFCR		
Pot _{SFCR,c}	145	kW
Módulos Fotovoltaicos		
N _{mod,c}	637	und
Inversor Interativo		
N _{mód,máx,c}	343	und
N _{máx mód} ^S	25	und
N _{mín mód,c} ^S	21	und
N _{máx string,c} ^P	17	und

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 13 – Configuração dos inversores.

Configuração Real dos Inversores					
Inversor 01			Inversor 02		
Nº de MF por string	25	und	Nº de MF por string	24	und
Nº de strings	13	und	Nº de strings	13	und
Total de MF	325	und	Total de MF	312	und
Potência Total (MF)	74,00	kW	Potência Total (MF)	71,04	kW
FDI	1,055		FDI	1,099	
$P_{CC-máx}$ (INVERSOR)	78,1	kW	$P_{CC-máx}$ (INVERSOR)	78,1	kW
0,75% x Pot. Total (MF)	55,50	kW	0,75% x Pot. Total (MF)	53,28	kW
P_{CA-N} (INVERSOR)	75	kW	P_{CA-N} (INVERSOR)	75	kW

Fonte: Elaborado pela autora.

Como é possível perceber, não foi necessária a mudança de nenhum dos equipamentos previamente selecionados. Além disso, os limites estabelecidos por *Clean Energy Council* (2013) continuam sendo atendidos.

O próximo passo é, então, avaliar o custo-benefício da ultrapassagem do limite permitido para a potência do SFCR da fábrica de rações. A potência efetiva estimada foi de 145 kW, o que equivale a 637 MF com potência nominal compensada, porém, a norma diz que o limite aplicável ao SFCR é em cima da potência instalada e não da compensada.

Assim, a potência instalada dos MF seria de $637 \times 265 \text{ Wp} \approx 169\text{kWp}$. Este valor resultaria em um aumento de 64 kW na demanda contratada, porém, o transformador da unidade consumidora tem capacidade máxima de 150 kW. Dessa maneira, não se considera viável um aumento de potência disponibilizada que resulte na troca do transformador, visto que todos os reforços e adequações da rede sairiam por conta do cliente, já que o mesmo se enquadra na classificação de minigerador.

Dessa forma, optou-se por limitar o SFCR à potência instalada de 150 kW, o que resulta em um total de 566 MF. Logo, faz-se necessário, ajustar, mais uma vez, o dimensionamento do SFCR projetado, suas características finais podem ser encontradas no quadro 14.

Quadro 14 – Características de projeto final para Fábrica de Rações.

PROJETO DE SFCR FINAL - FÁBRICA DE RAÇÕES		
Limite Normativo de Pot.	150	kW
Qtde respectiva de MF	566	und
Pot. Efetiva do SFCR	128,87	kW
% Pot. Efetiva / Pot. Demandada	88,9	%

Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, apenas 88,9% da potência demandada para abastecer todo o consumo da fábrica será fornecida. No quadro 14, potência efetiva é o mesmo que potência compensada. A respectiva configuração final dos inversores pode ser encontrada no quadro 15.

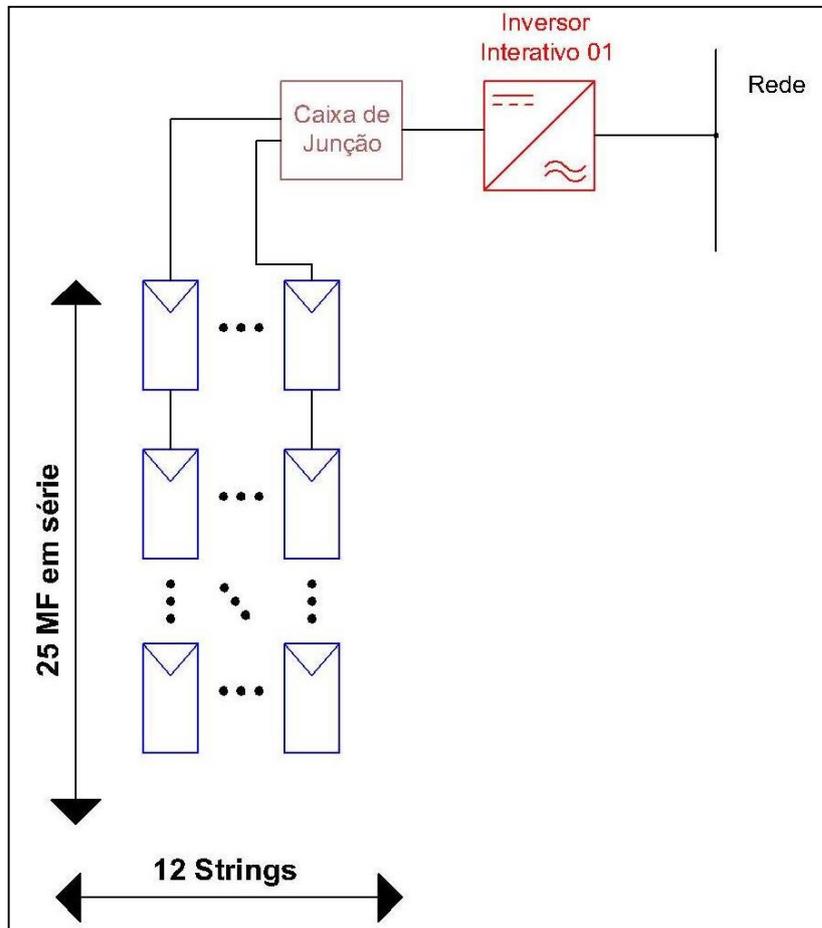
Quadro 15 - Configuração final dos inversores.

Configuração Final dos Inversores					
Inversor 01			Inversor 02		
Nº de MF por string	25	und	Nº de MF por string	19	und
Nº de strings	12	und	Nº de strings	14	und
Total de MF	300	und	Total de MF	266	und
Potência Total (MF)	68,31	kW	Potência Total (MF)	60,57	kW
FDI	1,143		FDI	1,290	
$P_{CC-máx}$ (INVERSOR)	78,1	kW	$P_{CC-máx}$ (INVERSOR)	78,1	kW
0,75% x Pot. Total (MF)	51,23	kW	0,75% x Pot. Total (MF)	45,42	kW
P_{CA-N} (INVERSOR)	75	kW	P_{CA-N} (INVERSOR)	75	kW

Fonte: Elaborado pela autora.

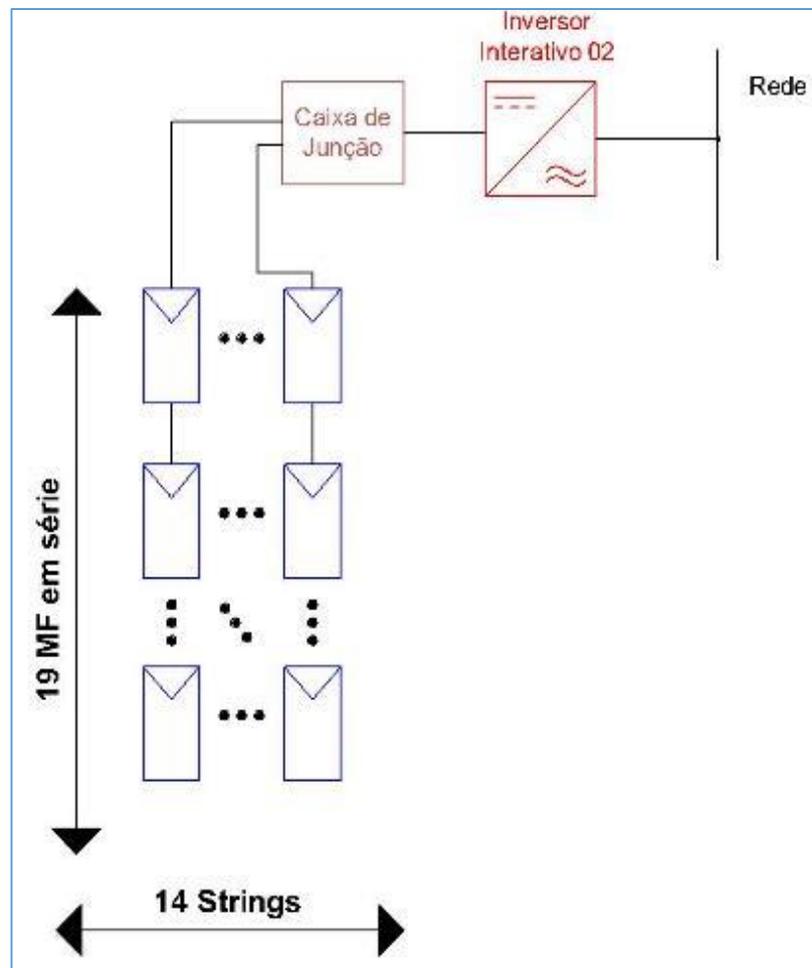
Os diagramas unifilares simplificados do SFCR da fábrica de rações podem ser observados nas figuras 23 e 24.

Figura 23 – Diagrama unifilar simplificado do SFCR da fábrica de rações – Inversor 01



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 24 – Diagrama unifilar simplificado do SFCR da fábrica de rações –
Inversor 02



Fonte: Elaborado pela autora.

É importante, destacar, mais uma vez, que os dispositivos de seccionamento e de proteção não foram avaliados no escopo deste trabalho, porém, os mesmos devem estar presentes em um projeto técnico de SFCR.

Além disso, como anteriormente mencionado, a análise dos limites normativos para a potência instalada do SFCR foi realizada com base na potência nominal dos MF. No entanto, caso a distribuidora local considere a potência de saída dos inversores, não é necessário redimensionar o sistema, podendo este ter o total de 637 MF, já que a potência de saída dos dois inversores é de, exatamente, 150 kW.

10 ANÁLISE FINANCEIRA SIMPLIFICADA DO SFCR

Após o correto dimensionamento do SFCR é interessante avaliar o retorno de seu investimento frente ao sistema de compensação de energia elétrica regulamentado no Brasil.

Para este trabalho, propõe-se uma análise financeira simplificada, onde os índices financeiros utilizados possuem baixo nível de complexidade. Além disso, esta metodologia é de simples entendimento e é amplamente utilizada no mercado e na literatura.

A análise financeira tem como objetivo avaliar o retorno do investimento feito ao logo dos 25 anos de garantia dos módulos fotovoltaicos. Sua metodologia consiste em uma avaliação do balanço financeiro entre o investimento que sai e a receita que entra. O ganho é calculado tendo em vista que a energia gerada poderia ter sido comprada da distribuidora, logo, o valor da energia gerada foi calculado por:

$$\text{Valor da Energia Gerada [R\$]} = PAE * TE \quad (40)$$

Cuja:

PAE é a produção anual de energia, em kWh e TE é a tarifa para o consumo de energia.

A PAE, por sua vez, foi calculada por:

$$PAE = P_{N\ SFCR_{comp}} * HSP_{méd} * 365 \quad (41)$$

Cujo:

365 representa o número de dias em 1 ano e:

- ✓ $P_{N\ SFCR_{comp}}$: é a potência nominal do SFCR compensado, dado em kW, que leva em consideração a potência efetiva do sistema (abatidos suas perdas por fator temperatura), mais os índices de degradação anual previstos pelo fabricante dos MF.
- ✓ $HSP_{méd}$: é o valor médio da radiação solar diária corrigida para o plano dos MF, dado em kWh/m².dia.

É importante ressaltar que não há necessidade de incluir outras perdas, pois como demonstrado anteriormente, o sistema já está dimensionado para atender a 88,9% do consumo da fábrica.

Os custos diretos, por sua vez, envolvem todas as despesas ao longo da vida útil do sistema, também é chamado de LCC (sigla do inglês: *Life Cycle Cost*). Eles são calculados pela soma do custo *turn-key* mais as despesas de O&M ao longo dos 25 anos que se deseja considerar. Assim, o LCC é dado por:

$$LCC = C_{turn-key} + C_{MP} + C_{MC} - V_R \quad (42)$$

Cujo:

C denomina custo, MP manutenção preventiva, MC manutenção corretiva e V_R valor residual do SFCR, que é o preço que os equipamentos valem ao final de sua vida útil.

O custo *turn-key* envolve todas as despesas para que a planta entre em operação. Aqui estão inclusos todos os gastos com equipamentos principais e secundários, além de ferramentas e utensílios necessários para a instalação, mão-de-obra para implantação e para engenharia, e outros gastos. Estes, por sua vez, podem envolver a adequação do SFCR junto a distribuidora (melhorias no ramal de entrada, adequações no sistema elétrico da unidade consumidora, troca de medidor de energia, etc.), reformas na estrutura civil (terraplanagem, modificações para instalação das estruturas de fixação, etc.), entre outros.

Os gastos com O&M englobam manutenções preventivas (exemplo: limpezas, inspeções elétricas, troca de componentes de curta e média duração, como varistores ou fusíveis) e corretivas (exemplo: troca de equipamentos em fim de vida útil, como os inversores interativos ou dispositivos danificados). O valor mais utilizado para estimar as despesas com MP varia entre 0,5% e 1% do custo *turn-key*. Para a MC, a troca dos equipamentos principais deve levar em consideração os valores iniciais ajustados por um fator de redução, relativo à época em que se avalia sua substituição.

No caso deste projeto, considerou-se a troca do inversor interativo de 10 em 10 anos que, apesar de possuir garantia de 5 anos, tem em média este tempo de vida útil.

O fator de redução (f_r) utilizado é calculado por:

$$f_r = \frac{1}{(1 + d)^t} \quad (43)$$

Cujo:

d é a taxa de desconto e t o período de tempo, em anos. Para este trabalho, estimou-se uma taxa de desconto de 5%, o que pode ser considerado conservador, visto a grande possibilidade de maiores incentivos à esta fonte no Brasil.

Os demais custos podem ser observados no quadro 16.

Quadro 16 – Levantamento de custos do SFCR da fábrica de rações.

LEVANTAMENTO DE CUSTOS DO SFCR FÁBRICA DE RAÇÕES	
Custos Turn-Key	
Módulos Fotovoltaicos	R\$ 382.824,00
Inversores Interativos	R\$ 199.827,97
Estruturas de Fixação	R\$ 204.900,00
Projeto e Instalação	R\$ 80.000,00
Medidor Bidirecional	R\$ 330,00
Outros Custos	R\$ 30.000,00
TOTAL	R\$ 897.881,97
Custos MP	
Custo Manutenção/ ano	R\$ 4.489,41
Taxa de Desconto para fr	7%
Custos MC	
Troca dos Inversores	11º ano
fr (10 anos)	0,6139
Valor 1ª Troca	R\$ 122.677,04
Troca dos Inversores	21º ano
fr (20 anos)	0,3769
Valor 2ª Troca	R\$ 75.313,06
Total Trocas INVERSORES	R\$ 197.990,10

Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores considerados foram baseados em cotações do mercado atual. O custo inicial de MP foi estimado em 0,5% do custo de *turn-key* e os demais tiveram correção por meio do fator de redução com taxa de 7% ao ano. O valor residual dos equipamentos não foi considerado para o cálculo do tempo de *payback*, tornando-o mais conservador e cauteloso.

A tarifa de energia elétrica inicial foi considerada como sendo igual a tarifa do faturamento de energia apresentado e sua correção foi de 10% ao ano, valor próximo ao índice médio de inflação.

O quadro 17 mostra, então, o fluxo de caixa do SFCR dimensionado para a fábrica de rações, onde seu tempo de *payback* pode ser observado entre o 8º e 9º ano, mais precisamente, 8 anos e 8 meses.

Quadro 17 – Fluxo de Caixa – SFCR da fábrica de rações.

Ano	Pot. Nominal SFCR comp. [kW]	Prod. Anual de Energia [kWh]	Tarifa Consumo [R\$/kW]	ENTRADAS	SAÍDAS	BALANÇO ACUMULADO [R\$]
				Valor da Energia Gerada [R\$]	Custos Diretos [R\$]	
0					-R\$ 897.881,97	-R\$ 897.881,97
1	125,01	259.198,94	R\$ 0,288	R\$ 74.672,62	-R\$ 4.489,41	-R\$ 827.698,75
2	124,130	257.384,55	R\$ 0,317	R\$ 81.564,91	-R\$ 4.195,71	-R\$ 750.329,56
3	123,261	255.582,86	R\$ 0,349	R\$ 89.093,35	-R\$ 3.921,22	-R\$ 665.157,44
4	122,398	253.793,78	R\$ 0,383	R\$ 97.316,66	-R\$ 3.664,70	-R\$ 571.505,47
5	121,542	252.017,22	R\$ 0,422	R\$ 106.298,99	-R\$ 3.424,95	-R\$ 468.631,43
6	120,691	250.253,10	R\$ 0,464	R\$ 116.110,39	-R\$ 3.200,89	-R\$ 355.721,93
7	119,846	248.501,33	R\$ 0,510	R\$ 126.827,38	-R\$ 2.991,48	-R\$ 231.886,04
8	119,007	246.761,82	R\$ 0,561	R\$ 138.533,54	-R\$ 2.795,78	-R\$ 96.148,28
9	118,174	245.034,48	R\$ 0,618	R\$ 151.320,19	-R\$ 2.612,88	R\$ 52.559,04
10	117,347	243.319,24	R\$ 0,679	R\$ 165.287,04	-R\$ 2.441,94	R\$ 215.404,14
11	116,525	241.616,01	R\$ 0,747	R\$ 180.543,04	-R\$ 124.959,23	R\$ 270.987,95
12	115,710	239.924,70	R\$ 0,822	R\$ 197.207,16	-R\$ 2.132,89	R\$ 466.062,22
13	114,900	238.245,22	R\$ 0,904	R\$ 215.409,38	-R\$ 1.993,35	R\$ 679.478,24
14	114,096	236.577,51	R\$ 0,995	R\$ 235.291,66	-R\$ 1.862,95	R\$ 912.906,96
15	113,297	234.921,46	R\$ 1,094	R\$ 257.009,08	-R\$ 1.741,07	R\$ 1.168.174,98
16	112,504	233.277,01	R\$ 1,203	R\$ 280.731,02	-R\$ 1.627,17	R\$ 1.447.278,83
17	111,716	231.644,07	R\$ 1,324	R\$ 306.642,50	-R\$ 1.520,72	R\$ 1.752.400,61
18	110,934	230.022,57	R\$ 1,456	R\$ 334.945,60	-R\$ 1.421,23	R\$ 2.085.924,98
19	110,158	228.412,41	R\$ 1,602	R\$ 365.861,08	-R\$ 1.328,25	R\$ 2.450.457,80
20	109,387	226.813,52	R\$ 1,762	R\$ 399.630,06	-R\$ 1.241,36	R\$ 2.848.846,50
21	108,621	225.225,83	R\$ 1,938	R\$ 436.515,91	-R\$ 1.160,15	R\$ 3.284.202,26
22	107,861	223.649,25	R\$ 2,132	R\$ 476.806,33	-R\$ 1.084,25	R\$ 3.759.924,33
23	107,106	222.083,70	R\$ 2,345	R\$ 520.815,55	-R\$ 1.013,32	R\$ 4.279.726,57
24	106,356	220.529,12	R\$ 2,580	R\$ 568.886,83	-R\$ 947,03	R\$ 4.847.666,37
25	105,611	218.985,41	R\$ 2,838	R\$ 621.395,08	-R\$ 885,07	R\$ 5.468.176,38

Fonte: elaborado pela autora.

Uma outra metodologia de cálculo para o tempo de *payback* foi realizada, a mesma encontra-se no Apêndice A.

11 CONCLUSÕES

A metodologia para dimensionamento de SFCR e os fluxogramas propostos ofertam um caminho apropriado para projeto de pequeno à grande porte, além da possibilidade de escolha sobre o nível de critério e complexidade do trabalho.

Julga-se que para projetos de pequeno porte, a análise de perdas e ajustes sobre os SFCR pode ser desconsiderada, visto o aumento dos custos de engenharia envolvidos no projeto.

Para projetos de grande porte, no entanto, esta análise é fundamental, visto que o capital investido é alto, logo, deve-se ter uma análise de rendimento da planta mais realista.

O procedimento aqui proposto pode ser aplicado para projetos solares fotovoltaicos regulamentados pela ANEEL no Brasil, já levando em consideração as normas que entrarão em rigor em março de 2016.

Este processo apresentou-se adequado à aplicação requerida, que foi o projeto solar fotovoltaico conectado à rede de distribuição de uma fábrica de rações no município de Iguatu - Ceará, Brasil.

O SFCR projetado possui potência instalada de 150 kW, valor este que respeita a capacidade máxima do transformador do local. Este valor corresponde a 566 módulos fotovoltaicos de 265Wp do fabricante Hareon e a 2 inversores de 75kW do fabricante Fronius.

No entanto, a potência efetiva da planta é 128,87 kW, devido a compensação por fator temperatura dos módulos fotovoltaicos. E este valor, por sua vez, representa apenas 88,9% da potência demandada para fornecer todo o consumo médio de energia da fábrica, devido a outras perdas e ajustes analisados.

Para a instalação do sistema, será necessário, então, a solicitação do aumento da potência disponibilizada pela COELCE, de 105kW para 150kW. Este incremento corresponde a um acréscimo de R\$ 391,95 no valor de demanda contratada da unidade consumidora, considerando a tarifa presente no faturamento apresentado.

Este valor é considerado viável, visto ao atual custo de energia consumida pela fábrica de rações (R\$ 6.916,17), representando apenas 5,67% deste valor.

Observou-se, ainda, que, possivelmente, o banco capacitor da fábrica esteja subdimensionado, visto a cobrança de consumo reativo dentro e fora de ponta. Tendo sido sugerido, ao cliente, reanalisar o dimensionamento deste equipamento.

A análise financeira efetuada mostrou que o tempo de *payback* do investimento é de 8 anos e 8 meses, valor considerado satisfatório, visto que, para projetos de menor porte, os quais, geralmente, possuem viabilidade maior e retorno financeiro mais rápido, o tempo médio de *payback* também se enquadra neste valor.

Conclui-se, assim, que os objetivos estipulados foram corretos e satisfatoriamente atingidos.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atlas de Energia Elétrica**. Site, 2005. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/petroleo/7_3.htm>. Acesso em: 20 já. 2016.

_____. Resolução Normativa Nº 414, 9 de setembro de 2010. Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 15 set. 2010. Seção 1, p. 115.

_____. Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso a microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 abr. 2012. Seção 1, p. 53.

_____. Resolução Normativa Nº 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012, e os módulos 1 e 3 dos procedimentos de distribuição – PRODIST. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2 dez. 2015. Seção 1, p. 45.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA (ABINEE). **Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira**. São Paulo, 2012

Banco de Informações de Geração (BIG). **Capacidade de Geração do Brasil**. Site, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

BLUESOL, **Energia solar: Como funciona? Tipos de células fotovoltaicas**. Site, 2012. Disponível em: <<http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-tipos-de-celulas-fotovoltaicas>>. Acesso em: 16 nov. 2015.

CLEAN ENERGY COUNCIL. **Grid-connected solar PV systems**. Melbourne, 2013.

COMPANHIA ENERGÉTICA DO CEARÁ (COELCE). **NT-Br 010/2015: conexão de micro e minigeração distribuída ao sistema elétrico da AMPLA/COELCE**. Fortaleza, 2015.

ENERDATA. **Global energy statistical yearbook 2015**. Disponível em: <<https://yearbook.enerdata.net>>. Acesso em: 9 jan. 2016.

ENERGIA TECSOLAR. **Painel solar? Qual a melhor escolha?**. Site, 2015. Disponível em: <<http://energiatecsolar.com.br/painel-solar-qual-a-melhor-escolha/#sthash.OWhbYH3A.dpbs>>. Acesso nov. 2015.

ENERGY MARKET AUTHORITY. **Handbook for solar photovoltaic (PV) systems**. Singapore: EMA, 2009.

FOSTER, R.; GHASSEMI, M; COTA, A. **Solar energy**: renewable energy and the environment. Boca Raton: CRC Press, 2009.

FROM SUN TO POWER. **How electricity is generated in solar cells**. Site, 2012. Disponível em: < <https://fromsuntopower.wordpress.com>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

GREEN PRO. **Energia fotovoltaica** - Manual sobre tecnologias, projecto e instalação. Site, 2004. Disponível em: < <http://whatisgreenpro.org>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

MONDOL, J. D.; YOHANIS, G. Y; NORTON, B. Optimal sizing of array and inverter for grid connected photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 80, p. 1517-1539, 2006.

MORENO, R. P. Paneles solares fotovoltaicos monocristalinos o policristalinos. ¿Sabemos cuál comprar?. Blog, 2013. Disponível em: <<http://energias-renovables-y-limpias.blogspot.com.br/2013/04/que-panel-comprar-monocristalino-o-policristalino.html>>. Acesso em: 16 nov. 2015.

PEREIRA; O. L. S.; GONÇALVES, F.F. Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: Estudo de caso da rede de Tubarão – SC. **Revista Brasileira de Energia** v. 14, n. 1. p. 25-45, 2008.

SOUZA, R. di. **Introdução a sistemas de energia solar fotovoltaica**. Ribeirão Preto: Blue Sol Energia Solar, 2014.

WIKIENERGIA. **Preço do silício cai 70% em menos de um ano nos EUA**. Site, 2009. Disponível em: < http://www.wikienergia.pt/~edp/index.php?title=Pre%C3%A7o_do_sil%C3%ADcio_cai_70%25_em_menos_de_um_ano_nos_EUA >. Acesso em: 30 nov 2015

WORLDOMETERS. **World population sections**. Site, 2015. Disponível em: <<http://www.worldometers.info/world-population/>> Acesso em: 25 nov. 2015.

XING, W., ZHOU, J.; FENG, Z. Effects of mounting geometries on photovoltaic module performance using CFD and single-diode model **Solar Energy**, v. 103, p.541-549, 2014,

APÊNDICE A – ANÁLISE FINANCEIRA – METODOLOGIA 02

Uma segunda análise financeira foi desenvolvida para calcular o tempo de *payback* do SFCR da fábrica de rações. Os objetivos desta metodologia adicional é confirmar o retorno já estimado, além de fornecer maiores informações ao cliente quanto as características reais do seu faturamento de energia futuro, com a implantação do sistema.

Uma das premissas deste cálculo é que, durante os 25 anos de simulação, o consumo médio de energia da fábrica permaneceria o mesmo, em 263.886,00 kWh.

Nesta análise, foram considerados todos os custos de energia do cliente, incluindo o consumo excedente de energia, indicado como saldo energético, e os custos referentes ao novo valor de demanda contratada. A produção anual de energia é a mesma estimada na metodologia 01.

O balanço monetário é feito, então, através da economia de energia obtida através da diferença entre o total faturado sem e com o SFCR.

As simulações e o tempo de *payback* podem ser observados no quadro 18. O retorno do investimento ficou ente o 8º e 9º ano, mais especificamente em 8 anos e 7 meses.

Como se pode perceber, os cálculos em ambas as metodologias deram o mesmo tempo de retorno, o que confirma a confiabilidade do resultado. A diferença entre os dois tempos ficou em apenas uma semana.

Quadro 18 - Análise financeira – metodologia 02

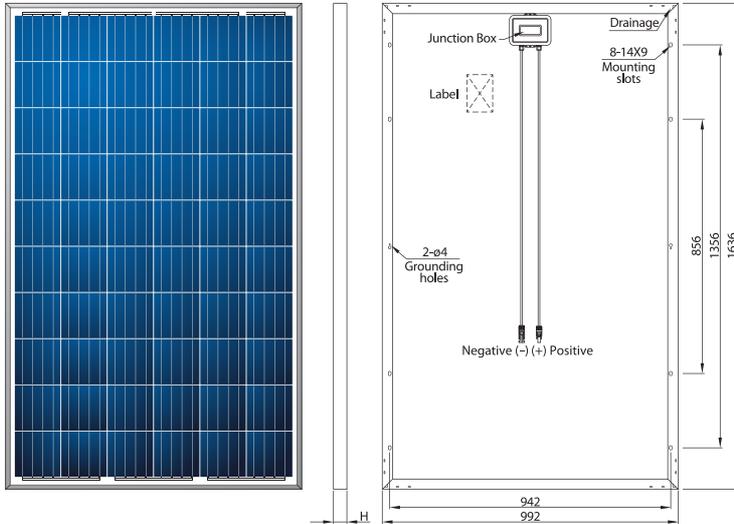
Ano	Consumo Anual de Energia [kWh]	SALDO ENERGÉTICO [kWh]	Valor a Pagar: CONSUMO Comp. [R\$]	Tarifa Demanda [R\$/kW]	Valor a Pagar: DEMANDA [R\$]	TOTAL A PAGAR COM SFCR [R\$]	TOTAL A PAGAR SEM SFCR [R\$]	ECONOMIA DE ENERGIA [R\$]	Custos Diretos [R\$]	BALANÇO ACUMULADO [R\$]
0									-R\$ 897.881,97	
1	263.886,00	4.687,06	R\$ 1.350,30	8,71	R\$ 1.306,50	R\$ 2.656,80	R\$ 77.329,42	R\$ 74.672,62	-R\$ 4.489,41	R\$ 823.209,35
2	263.886,00	6.501,45	R\$ 2.060,30	9,581	R\$ 1.437,15	R\$ 3.497,45	R\$ 85.062,36	R\$ 81.564,91	-R\$ 4.489,41	R\$ 746.133,85
3	263.886,00	8.303,14	R\$ 2.894,38	10,5391	R\$ 1.580,87	R\$ 4.475,25	R\$ 93.568,60	R\$ 89.093,35	-R\$ 4.489,41	R\$ 661.529,91
4	263.886,00	10.092,22	R\$ 3.869,84	11,59301	R\$ 1.738,95	R\$ 5.608,79	R\$ 102.925,46	R\$ 97.316,66	-R\$ 4.489,41	R\$ 568.702,66
5	263.886,00	11.868,78	R\$ 5.006,16	12,752311	R\$ 1.912,85	R\$ 6.919,01	R\$ 113.218,00	R\$ 106.298,99	-R\$ 4.489,41	R\$ 466.893,08
6	263.886,00	13.632,90	R\$ 6.325,28	14,0275421	R\$ 2.104,13	R\$ 8.429,41	R\$ 124.539,80	R\$ 116.110,39	-R\$ 4.489,41	R\$ 355.272,10
7	263.886,00	15.384,67	R\$ 7.851,86	15,43029631	R\$ 2.314,54	R\$ 10.166,41	R\$ 136.993,78	R\$ 126.827,38	-R\$ 4.489,41	R\$ 232.934,14
8	263.886,00	17.124,18	R\$ 9.613,62	16,97332594	R\$ 2.546,00	R\$ 12.159,62	R\$ 150.693,16	R\$ 138.533,54	-R\$ 4.489,41	R\$ 98.890,01
9	263.886,00	18.851,52	R\$ 11.641,69	18,67065854	R\$ 2.800,60	R\$ 14.442,29	R\$ 165.762,47	R\$ 151.320,19	-R\$ 4.489,41	R\$ 47.940,77
10	263.886,00	20.566,76	R\$ 13.971,02	20,53772439	R\$ 3.080,66	R\$ 17.051,68	R\$ 182.338,72	R\$ 165.287,04	-R\$ 4.489,41	R\$ 208.738,41
11	263.886,00	22.269,99	R\$ 16.640,83	22,59149683	R\$ 3.388,72	R\$ 20.029,56	R\$ 200.572,59	R\$ 180.543,04	-R\$ 4.489,41	R\$ 262.114,99
12	263.886,00	23.961,30	R\$ 19.695,10	24,85064651	R\$ 3.727,60	R\$ 23.422,70	R\$ 220.629,85	R\$ 197.207,16	-R\$ 4.489,41	R\$ 454.832,74
13	263.886,00	25.640,78	R\$ 23.183,10	27,33571116	R\$ 4.100,36	R\$ 27.283,46	R\$ 242.692,84	R\$ 215.409,38	-R\$ 4.489,41	R\$ 665.752,71
14	263.886,00	27.308,49	R\$ 27.160,07	30,06928228	R\$ 4.510,39	R\$ 31.670,46	R\$ 266.962,12	R\$ 235.291,66	-R\$ 4.489,41	R\$ 896.554,96
15	263.886,00	28.964,54	R\$ 31.687,82	33,07621051	R\$ 4.961,43	R\$ 36.649,25	R\$ 293.658,34	R\$ 257.009,08	-R\$ 4.489,41	R\$ 1.149.074,64
16	263.886,00	30.608,99	R\$ 36.835,57	36,38383156	R\$ 5.457,57	R\$ 42.293,15	R\$ 323.024,17	R\$ 280.731,02	-R\$ 4.489,41	R\$ 1.425.316,25
17	263.886,00	32.241,93	R\$ 42.680,76	40,02221471	R\$ 6.003,33	R\$ 48.684,09	R\$ 355.326,59	R\$ 306.642,50	-R\$ 4.489,41	R\$ 1.727.469,34
18	263.886,00	33.863,43	R\$ 49.309,98	44,02443618	R\$ 6.603,67	R\$ 55.913,65	R\$ 390.859,24	R\$ 334.945,60	-R\$ 4.489,41	R\$ 2.057.925,53
19	263.886,00	35.473,59	R\$ 56.820,06	48,4268798	R\$ 7.264,03	R\$ 64.084,09	R\$ 429.945,17	R\$ 365.861,08	-R\$ 4.489,41	R\$ 2.419.297,20
20	263.886,00	37.072,48	R\$ 65.319,19	53,26956778	R\$ 7.990,44	R\$ 73.309,63	R\$ 472.939,69	R\$ 399.630,06	-R\$ 4.489,41	R\$ 2.814.437,84
21	263.886,00	38.660,17	R\$ 74.928,27	58,59652456	R\$ 8.789,48	R\$ 83.717,74	R\$ 520.233,65	R\$ 436.515,91	-R\$ 79.802,47	R\$ 3.171.151,28
22	263.886,00	40.236,75	R\$ 85.782,26	64,45617701	R\$ 9.668,43	R\$ 95.450,69	R\$ 572.257,02	R\$ 476.806,33	-R\$ 4.489,41	R\$ 3.643.468,20
23	263.886,00	41.802,30	R\$ 98.031,90	70,90179472	R\$ 10.635,27	R\$ 108.667,17	R\$ 629.482,72	R\$ 520.815,55	-R\$ 4.489,41	R\$ 4.159.794,34
24	263.886,00	43.356,88	R\$ 111.845,37	77,99197419	R\$ 11.698,80	R\$ 123.544,17	R\$ 692.430,99	R\$ 568.886,83	-R\$ 4.489,41	R\$ 4.724.191,76
25	263.886,00	44.900,59	R\$ 127.410,34	85,79117161	R\$ 12.868,68	R\$ 140.279,01	R\$ 761.674,09	R\$ 621.395,08	-R\$ 4.489,41	R\$ 5.341.097,43

Fonte: Elaborado pela autora.

ANEXO A – Manual do módulo fotovoltaico Hareon 265wp

4BB HR-240P-18/Bb — HR-265P-18/Bb

Poly-Crystalline Silicon Module



MECHANICAL PARAMETERS

Cell (mm)	156×156 Poly
Weight (kg)	19.0/19.3
Dimensions (L×W×H) (mm)	1636×992×35/40
Cable Cross Section Size (mm ²)	4
No. of Cells and Connections	60(6×10)
No. of Diodes	3

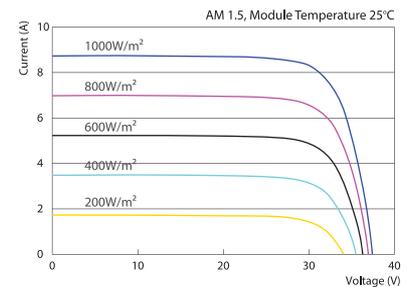
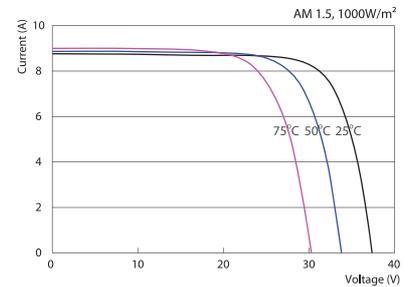
QUALIFICATION

Max. System Voltage	1000VDC / 1500VDC
Temperature Cycling Range	-40°C~+85°C
Max. Series Fuse	15 A
Max. Wind Load / Max. Snow Load	2400Pa / 5400Pa
Damp Heat Test	85°C and 85% relative humidity for 1000h
Hot Spot Free	100%EL inspection before and after lamination

ELECTRICAL PARAMETERS

TYPE		HR-240W	HR-245W	HR-250W	HR-255W	HR-260W	HR-265W
STC AM 1.5, 1000W/m ² , Module Temperature 25°C	Rated Max. Power at STC (W)	240	245	250	255	260	265
	Max. Power Voltage / Vmp (V)	29.67	29.88	29.98	30.25	30.51	30.71
	Max. Power Current / Imp (A)	8.09	8.20	8.34	8.43	8.52	8.63
	Open Circuit Voltage / Voc (V)	37.25	37.34	37.41	37.54	37.65	37.81
	Short Circuit Current / Isc (A)	8.48	8.63	8.79	8.94	9.09	9.24
	Module Efficiency (%)	14.79	15.10	15.40	15.71	16.02	16.33
NOCT AM 1.5, 800W/m ² , Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s	Rated Max. Power at NOCT (W)	173.0	176.7	180.4	184.1	187.5	191.0
	Max. Power Voltage / Vmp (V)	27.50	27.60	27.70	27.80	27.90	28.00
	Max. Power Current / Imp (A)	6.29	6.40	6.51	6.62	6.72	6.82
	Open Circuit Voltage / Voc (V)	33.90	34.00	34.10	34.20	34.30	34.45
	Short Circuit Current / Isc (A)	6.86	6.98	7.11	7.23	7.35	7.47
	Module Efficiency (%)	13.32	13.61	13.89	14.18	14.44	14.71
Temperature Coefficient of Pm		-0.44%/°C					
Temperature Coefficient of Voc		-0.32%/°C					
Temperature Coefficient of Isc		+0.055%/°C					
Nominal Operating Cell Temperature		45°C±3°C					
Output Tolerance		0~5W					

250W CURVES



PACKING CONFIGURATION

MODULE SIZE	CONTAINER	20'GP	40'HC
1636×992×35	Pieces Per Pallet	30	30
	Pallets Per Container	6	28
	Pieces Per Container	180	840
1636×992×40	Pieces Per Pallet	25	25
	Pallets Per Container	6	28
	Pieces Per Container	150	700

LINEAR WARRANTY

- No more than 3% peak power degradation in **1st** year;
- No more than 0.7% peak power degradation in coming **24** years;
- Free from defects of materials and workmanship for **10** years.



ANEXO B – Manual do inversor interativo Fronius Agilo 75.0-3

FRONIUS AGILO

/ The central inverter with the revolutionary transport and installation system



/ PC board replacement process



/ Transport technology



/ Smart Grid Ready



/ As the first central inverter in its performance class that can be completely installed and maintained by the installer, the Fronius Agilo sets new standards. Special heavy-duty castors, its compact design and the ability to replace components on the customer's premises make the Fronius Agilo unique. With a maximum output power of 75 kVA and 100 kVA the Fronius Agilo is particularly suitable for industrial or commercial systems.

TECHNICAL DATA: FRONIUS AGILO

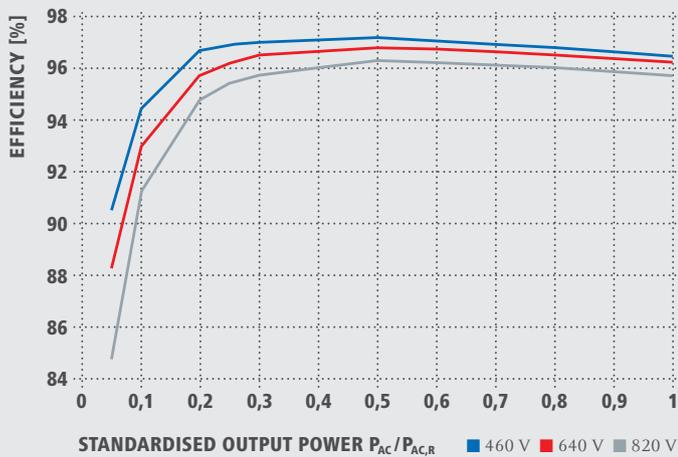
INPUT DATA	AGILO 75.0-3	AGILO 75.0-3 OUTDOOR	AGILO 100.0-3	AGILO 100.0-3 OUTDOOR
DC maximum power at $\cos \varphi = 1$		78.1 kW		104.5 kW
Max. input current ($I_{dc \max}$)		170.0 A		227.0 A
Max. array short circuit current		255 A		340.5 A
Min. input voltage ($U_{dc \min}$)			460 V	
Feed-in start voltage ($U_{dc \text{ start}}$)			475 V	
Nominal input voltage ($U_{dc,r}$)			460 V	
Max. input voltage ($U_{dc \max}$)			950 V	
MPP voltage range ($U_{mpp \min} - U_{mpp \max}$)			460 V - 820 V	
Number of DC inputs			4	

OUTPUT DATA	AGILO 75.0-3	AGILO 75.0-3 OUTDOOR	AGILO 100.0-3	AGILO 100.0-3 OUTDOOR
AC nominal output ($P_{ac,r}$)		75 kW		100 kW
Max. output power		75 kVA		100 kVA
Max. output current ($I_{ac \max}$)		114.4 A		152.6 A
Grid connection ($U_{ac,r}$)			3-NPE 400 V / 230 V	
Min. output voltage ($U_{ac \min}$)			170 V	
Max. output voltage ($U_{ac \max}$)			270 V	
Frequency (f_r)			50 Hz / 60 Hz	
Frequency range ($f_{\min} - f_{\max}$)			45 - 65 Hz	
Distortion factor			< 3 %	
Power factor ($\cos \varphi_{ac,r}$)			0.8 - 1 ind. / cap.	

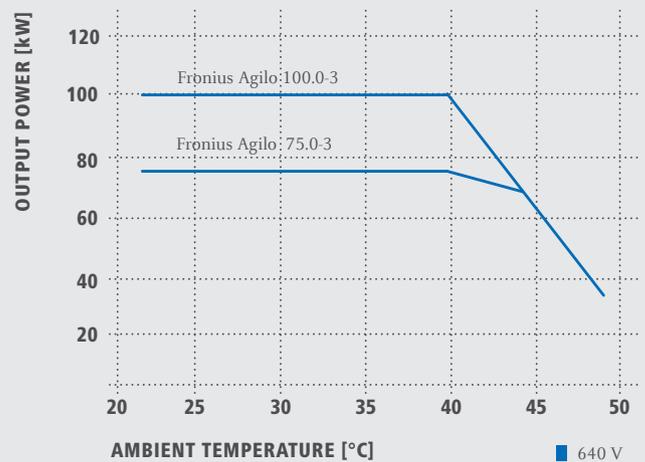
GENERAL DATA	AGILO 75.0-3	AGILO 75.0-3 OUTDOOR	AGILO 100.0-3	AGILO 100.0-3 OUTDOOR
Dimensions (height x width x depth)	1,884 x 1,100 x 700 mm	1,914 x 1,204 x 862 mm	1,884 x 1,100 x 700 mm	1,914 x 1,204 x 862 mm
Weight	760 kg	732 kg	834 kg	806 kg
Degree of protection (electronical parts)	IP 30 (IP 54)	IP 44 (IP 55)	IP 30 (IP 54)	IP 44 (IP 55)
Protection class			1	
Overvoltage category (DC / AC)			DC 2 / AC 3	
Night-time consumption			< 36 W	
Inverter concept			50 Hz transformer	
Cooling			Regulated air cooling	
Installation	Indoor installation	Outdoor installation	Indoor installation	Outdoor installation
Ambient temperature range	-20 - +50 °C	-25 - +55 °C	-20 - +50 °C	-25 - +55 °C
Permitted humidity			0 % - 95 %	
DC connection technology		V-shape connection lug / V-box terminal clamp (70 - 240 mm ²)		
AC connection technology		V-shape connection lug / V-box terminal clamp (35 - 95 mm ²)		
Certificates and compliance with standards	IEC 62109-1, IEC 62109-2, VDE AR N 4105, Generating systems on the medium-voltage network (BDEW), G59, Network connection systems for Denmark (>75 A), ÖVE / ÖNORM E 8001-4-712			

Further information regarding the availability of the inverters in your country can be found at www.fronius.com.

FRONIUS AGILO 100.0-3 EFFICIENCY CURVE



FRONIUS AGILO TEMPERATURE DERATING



TECHNICAL DATA: FRONIUS AGILO

EFFICIENCY	AGILO 75.0-3	AGILO 75.0-3 OUTDOOR	AGILO 100.0-3	AGILO 100.0-3 OUTDOOR
Max. efficiency	97.3 %		97.2 %	
European efficiency (η_{EU})	96.7 %		96.6 %	
η at 5 % $P_{ac,r}^{1)}$	90.6 / 87.2 / 84.4 %		90.5 / 88.3 / 84.8 %	
η at 10 % $P_{ac,r}^{1)}$	94.7 / 92.8 / 91.1 %		94.6 / 93.2 / 91.5 %	
η at 20 % $P_{ac,r}^{1)}$	96.7 / 95.6 / 94.7 %		96.6 / 95.7 / 94.7 %	
η at 25 % $P_{ac,r}^{1)}$	97.0 / 96.1 / 95.3 %		96.9 / 96.2 / 95.4 %	
η at 30 % $P_{ac,r}^{1)}$	97.1 / 96.4 / 95.7 %		97.0 / 96.5 / 95.7 %	
η at 50 % $P_{ac,r}^{1)}$	97.3 / 96.8 / 96.3 %		97.2 / 96.8 / 96.3 %	
η at 75 % $P_{ac,r}^{1)}$	97.1 / 96.7 / 96.2 %		96.9 / 96.6 / 96.1 %	
η at 100 % $P_{ac,r}^{1)}$	96.7 / 96.4 / 96.0 %		96.5 / 96.2 / 95.7 %	
MPP adaptation efficiency	> 99.9 %			
PROTECTIVE EQUIPMENT	AGILO 75.0-3	AGILO 75.0-3 OUTDOOR	AGILO 100.0-3	AGILO 100.0-3 OUTDOOR
DC insulation measurement	Warning/shutdown adjustable			
Overload behaviour	Operating point shift, power limitation			
DC circuit breaker	Integrated			
INTERFACES	AGILO 75.0-3	AGILO 75.0-3 OUTDOOR	AGILO 100.0-3	AGILO 100.0-3 OUTDOOR
2x RS422 (RJ45 socket)	Fronius Solar Net, interface protocol			

¹⁾ and at U_{mpp} min / $U_{dc,r}$ / U_{mpp} max

Further information regarding the availability of the inverters in your country can be found at www.fronius.com.

/ Battery Charging Systems / Welding Technology / Solar Electronics

WE HAVE THREE DIVISIONS AND ONE PASSION: SHIFTING THE LIMITS.

/ Whether Battery Charging Systems, Welding Technology or Solar Electronics - our goal is clearly defined: to be the technology and quality leader. With around 3,000 employees worldwide, we shift the limits of what's possible - our more than 850 active patents are testimony to this. While others progress step by step, we innovate in leaps and bounds. Further information about all Fronius products and our global sales partners and representatives can be found at www.fronius.com



v02 2012 EN

Fronius Australia Pty Ltd.
90-92 Lambeck Drive
Tullamarine VIC 3043
Australia
pv-sales-australia@fronius.com
www.fronius.com.au

Fronius UK Limited
Maidstone Road, Kingston
Milton Keynes, MK10 0BD
United Kingdom
pv-sales-uk@fronius.com
www.fronius.co.uk

Fronius International GmbH
Froniusplatz 1
4600 Wels
Austria
pv@fronius.com
www.fronius.com