



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NATÁLIA PIMENTEL LADO CES

**MODELAGEM E ANÁLISE EM ATP DO COMPORTAMENTO DA MICRORREDE
DO CONDOMÍNIO RESIDENCIAL ALPHAVILLE-FORTALEZA**

FORTALEZA

2018

NATÁLIA PIMENTEL LADO CES

MODELAGEM E ANÁLISE EM ATP DO COMPORTAMENTO DA MICRORREDE DO
CONDOMÍNIO RESIDENCIAL ALPHAVILLE-FORTALEZA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Furtado
Sampaio

Coorientador: Prof. M. Sc. Lucas Silveira Melo

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C38m Ces, Natália Pimentel Lado.
Modelagem e Análise em ATP do Comportamento da Microrrede do Condomínio Residencial
Alphaville-Fortaleza / Natália Pimentel Lado Ces. – 2018.
98 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.
Coorientação: Prof. Me. Lucas Silveira Melo.
1. Geração Distribuída. 2. Microrredes. 3. Simulador ATP. 4. Recursos Energéticos Distribuídos. 5.
Sistemas de Armazenamento. I. Título.

CDD 621.3

NATÁLIA PIMENTEL LADO CES

MODELAGEM E ANÁLISE EM ATP DO COMPORTAMENTO DA MICRORREDE DO
CONDOMÍNIO RESIDENCIAL ALPHAVILLE-FORTALEZA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. M. Sc. Lucas Silveira Melo (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. PhD. Ruth Pastôra Saraiva Leão
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. M. Sc. Eudes Barbosa de Medeiros
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)
Enel Distribuição Ceará

Deus, minha fortaleza. Aos meus pais, Andrea e Paulo. A minha irmã, Andressa. Ao meu namorado, Lucas. A todos os meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me presenteou com uma família maravilhosa, oportunidades enriquecedoras e várias pessoas que tanto me apoiaram e contribuíram muito com o meu crescimento.

Aos meus pais, Andrea e Paulo, que nunca mediram esforços para me proporcionar a melhor educação, que sempre me ensinaram a importância dos bons valores e que sempre estiveram presentes em todas as etapas da minha vida como minhas referências.

A minha irmã Andressa, a minha melhor amiga, companheira de tantos momentos felizes e tristes. Você é a certeza de que nunca estarei sozinha.

A minha família, pela presença, união e cuidado que temos uns com os outros.

Ao meu namorado Lucas, que esteve me apoiando e ensinando bastante não só nesse trabalho, mas durante toda a graduação, sempre me incentivando a buscar o meu melhor e me estimulando em momentos difíceis.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica, que me incentivaram a evoluir e me transmitiram vários ensinamentos, em especial aos professores Raimundo Furtado e Lucas Melo que me orientaram ativamente e contribuíram muito com meu crescimento.

Aos profissionais da Enel Distribuição Ceará, um ambiente que cresci muito pessoalmente e profissionalmente, em especial ao Eng. Walbher e ao José Erivan que sempre estiveram disponíveis para transmitir vários conhecimentos durante todo o meu estágio.

Aos profissionais que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho, o Eng. Saulo Campos, que me forneceu vários materiais para que eu pudesse desenvolver esse trabalho e esteve disponível para esclarecer quaisquer dúvidas que surgissem e ao Eng. Fernando Barros que também contribuiu com várias fontes utilizadas.

Aos meus amigos de graduação e de vida, pelos momentos de diversão, apoio e crescimento.

Aos professores Eudes Barbosa e Ruth Pastôra, pela participação na banca e contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original.”

(Albert Einstein)

RESUMO

A sociedade atual demanda cada vez mais por um fornecimento de energia confiável, segura e de qualidade. Além disso, fatores como o surgimento de novas tecnologias, impactos ambientais e a crescente demanda de energia contribuem para o desenvolvimento de novas soluções e evolução das redes elétricas com a inserção de geração distribuída e microrredes. As microrredes constituem um grupo de cargas controláveis e recursos de energia distribuída, como geração e sistemas de armazenamento, que operam de forma coordenada atuando como um único subsistema controlável com relação à rede externa, podendo operar de forma conectada ou desconectada desta, não prejudicando sua integridade. Esse trabalho tem como objetivo apresentar os resultados da análise dos níveis de tensão de uma microrrede de um condomínio residencial de alto padrão, com cargas equilibradas e desequilibradas, operando em modo ilhado e conectado, realizada no ATP. Para tanto, coletou-se os dados das tecnologias integrantes da microrrede e dos seus modos de operação para realizar a sua modelagem no ATP, um programa para a análise de Transitórios Eletromagnéticos. No programa, foram modeladas as cargas, fontes de geração distribuída, sistemas de armazenamento e alimentadores que compõem a rede que alimenta o condomínio. Através do modelo, foi feita a análise dos níveis de tensão da rede de distribuição para situações de carga equilibrada e desequilibrada em situações de modo conectado e modo de ilhado, além dos níveis de tensão na ocorrência de curto-circuito monofásico e trifásico no modo conectado. As simulações feitas através do modelo mostram que gerações distribuídas de pequeno porte conectadas na baixa tensão da rede de distribuição interferem pouco na elevação dos níveis de tensão da baixa tensão e minimamente na média tensão. Além disso, foi possível verificar que a geração conectada a fases sobrecarregadas ajuda a melhorar os níveis de tensão. A avaliação dos níveis de curto-circuito mostrou a pequena influência que gerações de pequeno porte instaladas na baixa tensão provocam nos níveis de curto-circuito. Por fim, foi verificada que a microrrede estudada não provoca nenhum grande impacto à rede de distribuição e apresenta vários benefícios às unidades consumidoras integrantes da microrrede.

Palavras-chave: Simulador ATP. ATPDraw. Geração Distribuída. Microrredes. Recursos Energéticos Distribuídos. Sistemas de Armazenamento

ABSTRACT

Modern society demands more and more for a reliable, safe and quality energy supply. In addition, factors such as the emergence of new technologies, environmental impacts and the increasing demand for energy contribute to the development of new solutions and evolution of the electrical networks with the insertion of distributed generation and microgrids. The microgrids are a group of controllable loads and distributed energy resources, like distributed generation and storage systems, which operate in a coordinated way, acting as a single subsystem which is controllable from the point of view of the external network, being able to operate both connected or disconnected from this external network, without posing risks to its integrity. This work aims to present the results of an analysis of the voltage levels of a microgrid of a high standard residential condominium, with balanced and unbalanced loads, operating in islanded and connected mode, performed in ATP. For this purpose, the data of the technologies which integrate the microgrid and its modes of operation were collected in order to carry out its modeling in the ATP software, which is a widely used tool for the analysis of Electromagnetic Transients. In the program, models were designed for the electrical loads, distributed generation sources, storage systems and the feeders which compose the electrical grid that supplies the condominium. Through this modelling, an analysis of voltage levels was carried out for situations of balanced and unbalanced loads in combination with islanded and connected modes, in addition to voltage levels for the occurrences of single-phase and three-phase short circuits in connected mode. The simulations carried out through the model show that small-scale distributed generation sources have little impact on the increase of voltage level on the low voltage side, and even less on the medium voltage side of the grid. In addition, it could be verified that the generation connected to overloaded phases helps improving voltage levels. The assessment of short-circuit levels shows a small increase caused by the addition of these small-scale distributed generation sources on the low voltage side. Finally, it could be verified that the examined microgrid does not cause any significant impact on the distribution grid and brings many benefits to the consumer units that are a part of this microgrid.

Keywords: ATP Simulator. ATPDraw. Distributed Generation. Microgrids. Distributed Energy Resources. Storage Systems

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arquitetura básica de uma microrrede	22
Figura 2 – Controle hierárquico de uma microrrede	26
Figura 3 – Arquitetura do projeto piloto	33
Figura 4 – Unidade de armazenamento central	34
Figura 5 – Diagrama unifilar da geração fotovoltaica do clube	35
Figura 6 – Esquemático de ligação dos aerogeradores	36
Figura 7 – Unidade residencial com sistema de armazenamento local	37
Figura 8 – Unidade residencial sem sistema de armazenamento local	38
Figura 9 – Conexões conversor <i>back-to-back</i>	39
Figura 10 – Rede de comunicação da microrrede	40
Figura 11 – Rotina de operações na ocorrência de ilhamento	42
Figura 12 – Modelo de transformador no ATP	43
Figura 13 – Parâmetros de entrada do SATTRAFO	46
Figura 14 – Parâmetros da curva de saturação SATTRAFO	46
Figura 15 – Impedância dos condutores da rede de distribuição do condomínio	50
Figura 16 – Modelagem de unidade residencial com geração fotovoltaica	56
Figura 17 – Modelagem do clube	56
Figura 18 – Modelagem do sistema de armazenamento central	57
Figura 19 – Modelagem da microrrede do condomínio residencial Alphaville	58
Figura 20 – Tensão de fase na entrada do condomínio	59
Figura 21 – Tensão de linha na entrada do condomínio	60
Figura 22 – Tensão de fase no secundário de transformador de distribuição	60
Figura 23 – Tensão de linha no secundário de transformador de distribuição	61
Figura 24 – Tensão de fase entrada do condomínio com cargas equilibradas em modo ilhado	63
Figura 25 – Tensão de linha entrada do condomínio com cargas equilibradas em modo ilhado	63
Figura 26 – Tensão de fase secundário do transformador com cargas equilibradas em modo ilhado	64
Figura 27 – Tensão de linha secundário do transformador com cargas equilibradas em modo ilhado	64

Figura 28 – Tensão de fase entrada do condomínio com cargas desequilibradas em modo conectado	66
Figura 29 – Tensão de linha entrada do condomínio com cargas desequilibradas em modo conectado	66
Figura 30 – Tensão de fase secundário do transformador com cargas desequilibradas em modo conectado	67
Figura 31 – Tensão de linha secundário do transformador com cargas desequilibradas em modo conectado	67
Figura 32 – Tensão de fase entrada do condomínio com cargas desequilibradas em modo ilhado	69
Figura 33 – Tensão de fase entrada do condomínio com cargas desequilibradas em modo ilhado	69
Figura 34 – Tensão de fase secundário do transformador com cargas desequilibradas em modo ilhado	70
Figura 35 – Tensão de linha secundário do transformador com cargas desequilibradas em modo ilhado	70
Figura 36 – Corrente curto-circuito monofásico no barramento principal em rede sem geração	72
Figura 37 – Tensão curto-circuito monofásico no barramento principal em rede sem geração	72
Figura 38 – Corrente curto-circuito trifásico no barramento principal em rede sem geração	73
Figura 39 – Tensão curto-circuito trifásico no barramento principal em rede sem geração	73
Figura 40 – Corrente curto-circuito monofásico no barramento principal em rede com geração	74
Figura 41 – Tensão curto-circuito monofásico no barramento principal em rede com geração	74
Figura 42 – Corrente curto-circuito trifásico no barramento principal em rede com geração	75
Figura 43 – Tensão curto-circuito trifásico no barramento principal em rede com geração	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas de tensão de leitura em pontos de conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV	28
Tabela 2 – Faixas de tensão de leitura em pontos de conexão em tensão nominal inferior a 1 kV (380/220)	29
Tabela 3 – Limites para os desequilíbrios de tensão	29
Tabela 4 – Resumo dos recursos energéticos distribuídos da microrrede do Alphaville .	42
Tabela 5 – Dados dos transformadores da rede interna do condomínio	44
Tabela 6 – Curva de magnetização da chapa de aço silício de grãos orientados da acesita	45
Tabela 7 – Resistência e indutância dos trechos da rede de distribuição interna do condomínio	52
Tabela 8 – Potência de carga dos transformadores da rede de distribuição interna	54
Tabela 9 – Tensão de fase para cargas equilibradas no modo conectado	61
Tabela 10 – Tensão de linha para cargas equilibradas no modo conectado	62
Tabela 11 – Tensão de fase para cargas equilibradas no modo ilhado	65
Tabela 12 – Tensão de linha para cargas equilibradas no modo ilhado	65
Tabela 13 – Tensão de fase para cargas desequilibradas no modo conectado	68
Tabela 14 – Tensão de linha para cargas desequilibradas no modo conectado	68
Tabela 15 – Tensão de fase para cargas desequilibradas no modo ilhado	70
Tabela 16 – Tensão de linha para cargas desequilibradas no modo ilhado	71
Tabela 17 – Tensão e corrente de fase de circuitos monofásicos e trifásicos	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ATP</i>	<i>Alternative Transient Program</i>
<i>DMS</i>	<i>Distribution Management System/Sistema de Gestão da Distribuição</i>
<i>EMTP</i>	<i>Electromagnetic Transient Program/Programa de Transitórios Eletromagnéticos</i>
<i>LC</i>	<i>Load Controller/Controlador de Carga</i>
<i>MC</i>	<i>Microgenerator Controller/Controlador do Microgerador</i>
<i>MGCC</i>	<i>Micro Grid System Central Controller/Controlador Geral do Sistema Microrrede</i>
<i>PCC</i>	<i>Point of Common Coupling</i>
<i>SCADA</i>	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
<i>TACS</i>	<i>Transient Analysis of Control Systems/Análise de Transiente em Sistemas de Controle</i>
DAE	Dispositivo de Armazenamento de Energia
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
GD	Geração Distribuída
IP	Iluminação Pública
MR	Microrrede
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RED	Recursos Energéticos Distribuídos
REI	Rede Elétrica Inteligente
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Parâmetro para cálculo do fator de desequilíbrio
V_{ab}	Tensão de linha eficaz entre as fases a e b
V_{bc}	Tensão de linha eficaz entre as fases b e c
V_{ca}	Tensão de linha eficaz entre as fases c e a
$FD\%$	Fator de desequilíbrio percentual
H	Intensidade do campo magnético
B	Densidade do fluxo magnético
α	Relação de transformação do transformador
$S_{1\varnothing}$	Potência monofásica
$I_{np(linha)}$	Corrente de linha no primário
$I_{np(fase)}$	Corrente na bobina do primário
V_P	Tensão de fase no primário
V_S	Tensão de fase no secundário
I_{0RMS}	Valor eficaz da corrente a vazio
I_{0pico}	valor de pico da corrente a vazio
$Z_{base(p)}$	Impedância de base no primário
$Z_{base(s)}$	Impedância de base no secundário
Z_{cc}	Impedância no ensaio de curto-circuito
Z_P	Impedância no primário
Z_S	Impedância no secundário
R_P	Resistência no primário
R_S	Resistência no secundário
$R\%$	Resistência percentual no primário
Z	Módulo da impedância no trecho
R	Resistência do trecho
X	Reatância do trecho

X_P	Reatância do primário
X_S	Reatância do secundário
L	Indutância do trecho
C	Capacitância do trecho
f	Frequência de operação do sistema
P_0	Potência a vazio
R_{mag}	Resistência de magnetização
λ_0	Valor de pico do fluxo de magnetização

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação	18
1.1.1	<i>Objetivos gerais</i>	18
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	18
1.2	Metodologia aplicada	18
1.3	Estrutura do trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Introdução	20
2.2	Tendências do segmento de distribuição de energia elétrica no Brasil	20
2.3	Geração distribuída	21
2.4	Arquitetura de uma microrrede	21
2.5	Modos de operação de uma microrrede	22
2.6	Conceito de microrrede	23
2.7	Dispositivos de armazenamento de energia	24
2.8	Sistemas de controle de microrredes	24
2.8.1	<i>Controle centralizado</i>	24
2.8.2	<i>Controle descentralizado</i>	25
2.8.3	<i>Controle hierárquico</i>	25
2.9	Vantagens associadas às microrredes	26
2.10	Desafios à utilização de microrredes	27
2.11	Aspectos normativos de qualidade de energia elétrica	28
2.12	Considerações finais	30
3	TOPOLOGIA E FERRAMENTA DE MODELAGEM DA MICRORREDE DO CONDOMÍNIO RESIDENCIAL ALPHAVILLE-FORTALEZA	31
3.1	Introdução	31
3.2	ATPDraw	31
3.3	Apresentação da microrrede	32
3.3.1	<i>Unidade Central de Armazenamento de Energia</i>	33
3.3.2	<i>Unidade do Clube do Condomínio</i>	35
3.3.3	<i>Unidades Residenciais</i>	37

3.3.4	<i>Unidade da portaria</i>	39
3.3.5	<i>Unidade de medição, controle e supervisão</i>	39
3.4	Possibilidades de operação da microrrede	40
3.5	Considerações finais	42
4	MODELAGEM DA MICRORREDE	43
4.1	Introdução	43
4.2	Modelagem dos transformadores e alimentadores da rede de distribuição	43
4.2.1	<i>Dados para modelagem de transformadores de distribuição</i>	43
4.2.2	<i>Cálculo dos parâmetros de entrada dos transformadores de distribuição</i> . .	45
4.2.3	<i>Modelagem dos condutores de distribuição</i>	50
4.3	Modelagem de cargas	53
4.4	Modelagem das unidades com geração	55
4.5	Modelagem do Sistema de Armazenamento Central	57
4.6	Modelagem da microrrede suprida pelos alimentadores da SE Água Fria	57
5	SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA MICRORREDE	59
5.1	Introdução	59
5.2	Simulação da microrrede com cargas equilibradas	59
5.3	Simulação da microrrede com cargas desequilibradas	65
5.4	Simulação de curto-circuitos na microrrede	71
6	CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTO FUTURO	76
6.1	Conclusão	76
6.2	Trabalhos futuros	77
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICES	80
	APÊNDICE A – Modelagem das cargas	80
	ANEXOS	83
	ANEXO A – Dados dos equipamentos da geração residencial	83
	ANEXO B – Potência instalada por UC e tabelas para cálculo de demanda	87
	ANEXO C – Dados dos equipamentos da geração do clube	91
	ANEXO D – Folhas de dados dos transformadores de potências de 45 kVA, 75 kVA e 150 kVA	96

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a sociedade demanda cada vez mais por um fornecimento seguro de energia, havendo uma crescente preocupação com a disponibilidade de energia e a infraestrutura das redes de distribuição e transmissão. Verifica-se nesse âmbito uma necessidade de investimento significativo para desenvolvimento e renovação das redes através de soluções que integrem novas tecnologias a valores da sociedade como meio ambiente e economia (HATZIARGYRIOU, 2014). Nesse sentido, as redes elétricas estão se modernizando com o surgimento do conceito de Rede Elétrica Inteligente (REI) ou *Smart Grids* que proporcionam o suporte necessário à expansão da matriz energética, movida pela crescente penetração de recursos renováveis e não renováveis de energias e do surgimento de diferentes tipos de usuários e agentes de mercado (FARHANGI, 2010).

Recursos Energéticos Distribuídos (RED) integrados às redes de distribuição são tecnologias que vêm gradativamente sendo empregadas dentro do processo de evolução das REI. Os RED consistem em fontes de geração e dispositivos armazenadores de energia elétrica. Os exemplos de RED mais utilizados referentes à geração de energia elétrica são motores de combustão interna, microturbinas, painéis fotovoltaicos, aerogeradores e células combustíveis. Dentre os dispositivos de armazenamento utilizados estão baterias, super capacitores e volantes de inércia, os quais contribuem para manutenção do balanço de potência devido as fontes que usam recursos renováveis intermitentes.

O advento dos RED tem contribuído para uma maior confiabilidade da rede elétrica, redução de picos de carga e das perdas de energia, além de postergar investimentos em infraestrutura de transmissão e geração de grande porte. No entanto, a utilização da Geração Distribuída (GD) e sistemas de armazenamento proporciona maior complexidade na operação da rede elétrica, aumento dos níveis de curto-circuito, ajuste mais complexo dos sistemas de proteção, aumento nos níveis de sobretensão, flutuação de tensão e desequilíbrios de tensão e corrente. As desvantagens desses recursos geram uma maior necessidade de monitoramento em tempo real e utilização de melhores tecnologias de automação e controle da rede, pois existe a necessidade de conhecer com melhor precisão as variáveis de estado do sistema para exercer adequadas ações de controle, monitoramento e uso eficiente das fontes de geração (HUANG *et al.*, 2016). Surge então o conceito de Microrrede (MR) para mitigar os impactos da geração distribuída na rede elétrica.

Uma MR consiste em um grupo semi-autônomo de RED e cargas interconectadas que

atuam como um único sistema controlável com relação à rede externa principal, podendo atuar de forma conectada ou desconectada desta (LASSETER *et al.*, 2002). A utilização crescente de microrredes requer uma análise dos impactos positivos e negativos para que a sua utilização seja a mais favorável possível e para contribuição no processo de evolução das redes elétricas.

1.1 Motivação

As microrredes constituem a próxima geração de redes elétricas com o uso de moderna tecnologia de comunicação integrando fontes de geração distribuída, cargas controláveis e sistemas de armazenamento de energia. Existem, no entanto, vários aspectos técnicos, mercadológicos e de legislação que precisam ser estudados nesse tema relativamente novo para que haja a obtenção de mais benefícios. Esse trabalho tem como objeto de estudo a microrrede do Condomínio Residencial Alphaville Fortaleza, que está sendo implantada pela Enel Distribuição Ceará por meio de recursos de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).

1.1.1 Objetivos gerais

Esse trabalho tem como objetivo geral apresentar a modelagem e análise do comportamento de uma microrrede implantada em um condomínio residencial em situações de carga equilibrada e desequilibrada, operando em modo ilhado e conectado, e na ocorrência de curto-circuito monofásico e trifásico, utilizando como ferramenta de simulação o ATP.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho abrangem:

- a) Analisar o comportamento da tensão e fator de desequilíbrio de tensão nas fases com a conexão de RED próximo a cargas equilibradas e desequilibradas;
- b) Analisar os níveis de tensão na microrrede operando no modo ilhado e conectado;
- c) Analisar os níveis de tensão e corrente na microrrede durante a ocorrência de curto-circuito.

1.2 Metodologia aplicada

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho abrange:

- a) Apresentação da configuração da microrrede do condomínio residencial Alphaville;
- b) Levantamento dos dados da rede de distribuição interna ao condomínio, dos alimentadores

responsáveis pelo suprimento da microrrede, das gerações distribuídas, dos sistemas de armazenamento e de controle;

- c) Cálculo dos parâmetros de entrada do ATPDraw para rede de distribuição interna, cargas internas, sistemas de geração e sistemas de armazenamento;
- d) Apresentação da simulação para as situações de operação da microrrede pré-estabelecidas.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho é dividido em 6 capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a contextualização do assunto principal discutido neste trabalho, os objetivos, a metodologia aplicada e a estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica com os conceitos básicos de microrredes, seus principais fundamentos, vantagens e desafios. Além disso, são apresentados os conceitos relativos às principais tecnologias integrantes das microrredes como geração distribuída, sistemas de armazenamento e sistemas de controle.

No Capítulo 3 é descrita a microrrede estudada no trabalho, apresentando o levantamento de dados necessários para sua modelagem, como as informações de fontes de microgeração, sistemas de armazenamento, rede de distribuição interna e modos de operação ilhado e conectado. Além disso, será apresentada a ferramenta de modelagem, o ATPDraw.

No Capítulo 4 é apresentado o desenvolvimento da microrrede no software ATPDraw mostrando as ferramentas e métodos utilizados para modelagem.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados de simulação para situações de operação em modo ilhado e conectado, com cargas equilibradas e desequilibradas e na ocorrência de curtos-circuitos monofásicos e trifásicos.

No Capítulo 6 é apresentada a conclusão do trabalho com avaliação dos resultados obtidos da simulação e a proposição de trabalhos posteriores.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

O aumento da demanda de energia, aspectos ambientais, evolução tecnológica e aspectos econômicos são fatores que estão influenciando a evolução dos sistemas de energia elétrica, dentre as evoluções verificadas atualmente, existe a implantação de microrredes nos sistemas de distribuição de energia. Nesse capítulo será feita uma revisão bibliográfica abordando os principais conceitos relativos a microrredes e suas principais tecnologias, além de aspectos normativos, suas vantagens e desvantagens.

2.2 Tendências do segmento de distribuição de energia elétrica no Brasil

O advento das Redes Elétricas Inteligentes, movido por tendências como a Geração Distribuída, a medição inteligente, maiores níveis de monitoramento, sensoriamento e automação da rede, além de um crescente fluxo de dados no sistema, mostram a grande mudança tecnológica pela qual as redes de distribuição no Brasil estão passando. A prospecção tecnológica no setor elétrico brasileiro (CGEE, 2017) aponta que até 2030, 10% do consumo de energia elétrica será suprido por GD, e 21% dos consumidores serão atendidos por medidores inteligentes.

Dessa forma, a infraestrutura das redes de distribuição convencionais tende a passar por uma renovação para se adaptar às exigências dos consumidores com relação à qualidade de energia e confiabilidade da rede, à flexibilização do mercado de energia e ao aumento da penetração da GD, que leva a implantação de microrredes. Essa transformação no setor elétrico brasileiro aponta para as seguintes tendências (CGEE, 2017):

- a) Necessidade de atualização das metodologias e sistemas de proteção, automação e controle;
- b) Grande volume de dados e elevados níveis de automação para integrar, garantir a interoperabilidade e maximizar os ganhos operacionais;
- c) Necessidade de uma robusta infraestrutura de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) e o rápido tratamento de dados;
- d) Novas tecnologias de equipamentos, ferramentas, algoritmos e metodologias que confirmam maior robustez à rede serão necessárias para atender o aumento da demanda e índices de qualidade de energia mais rígidos.

2.3 Geração distribuída

A geração distribuída, uma tecnologia típica integrante de microrredes, é definida como uma fonte de potência elétrica conectada à rede de distribuição ou diretamente a um consumidor (ACKERMANN *et al.*, 2001). A crescente demanda de energia, a importância do fator ambiental e os elevados custos de plantas centralizadas de geração promovem uma perspectiva de crescimento de GD nos próximos anos. Assim, a geração distribuída é parte fundamental de novas filosofias de expansão do sistema elétrico por várias razões:

- a) Diversificação das fontes primárias de energia, promovendo a inserção de fontes renováveis;
- b) Promoção da expansão das redes de energia com a inserção de geração próxima a carga;
- c) Redução da variação de carga ao longo do dia, podendo contribuir com a injeção de potência durante os horários de pico;
- d) Redução da vulnerabilidade do sistema durante distúrbios, permitindo a criação de subsistemas capazes de operar de forma autônoma.

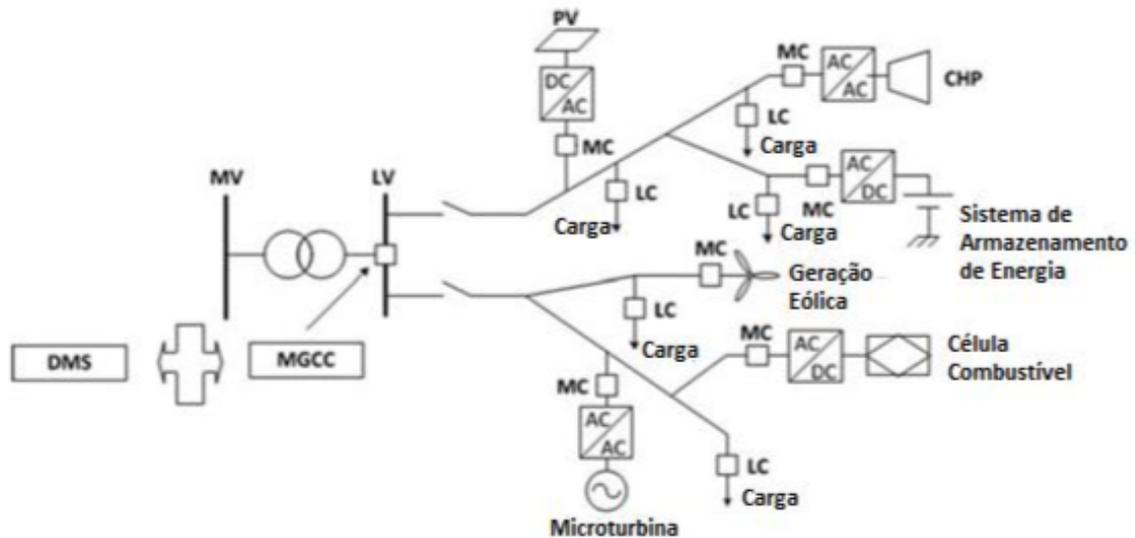
Apesar das muitas vantagens, a alta inserção de GD no sistema tem um impacto relevante no fluxo de potência, variação de tensão para os consumidores e pode levar a uma descoordenação dos sistemas de proteção da rede elétrica, podendo ter o efeito inverso se mal implementada (QUEZADA *et al.*, 2006).

2.4 Arquitetura de uma microrrede

A arquitetura básica de uma microrrede está representada na Figura 1, em que pode-se verificar os seus elementos principais: geração distribuída, Dispositivo de Armazenamento de Energia (DAE), cargas controláveis, inversores estáticos e dispositivos de controle. A microrrede mostrada na Figura 1 está conectada com a rede principal através de um transformador abaixador. O ponto de conexão de uma microrrede com a rede principal externa é denominado *Point of Common Coupling (PCC)*. Esse ponto é caracterizado pela presença de um dispositivo de proteção responsável pelas manobras de ilhamento e resincronização e pela proteção da microrrede.

Na Figura 1 são mostradas várias opções de fontes de energia que podem ser implementadas em microrredes, tais quais fotovoltaica, microturbinas, eólica, célula a combustível e sistema de geração combinada de energia térmica e elétrica, havendo um destaque das fontes

Figura 1 – Arquitetura básica de uma microrrede



Fonte: Hatziargyriou (2014).

renováveis variáveis. As possibilidades de sistema de armazenamento de energia são bancos de baterias, super capacitores e *flywheels*. Esses elementos para armazenar energia garantem o suprimento da microrrede em casos de desconexão com a rede principal, bem como balanço de potência. Outra característica fundamental da arquitetura de uma microrrede são os dispositivos baseados em eletrônica de potência que garantem a interface de conexão com a principal dos sistemas de armazenamento e fontes de energia com a microrrede com várias estratégias de controle desses dispositivos.

Além disso, nas microrredes, verificam-se diversos dispositivos de controle *Load Controller/Controlador de Carga (LC)*, *Microgenerator Controller/Controlador do Microgerador (MC)*. Esses dispositivos de controle local se comunicam com o *Micro Grid System Central Controller/Controlador Geral do Sistema Microrrede (MGCC)*, estabelecendo vários níveis de controle (HATZIARGYRIOU, 2014).

2.5 Modos de operação de uma microrrede

As microrredes são caracterizadas por dois modos básicos de operação:

- a) Modo Conectado: a microrrede está conectada eletricamente à rede principal, que pode supri-la totalmente ou parcialmente. Além disso, a microrrede pode injetar potência excedente na rede principal (BORGES, 2016).
- b) Modo Ilhado: a microrrede funciona de forma autônoma e isolada da rede principal. A

desconexão da rede pode ser planejada ou devido à detecção de alguma falta na rede externa (BORGES, 2016).

2.6 Conceito de microrrede

As microrredes compreendem um agregado de tecnologias inovadoras, que estão sendo bastante estudadas no meio acadêmico e aplicadas de forma crescente no Brasil e no mundo em resposta às novas demandas e valores da sociedade. Na literatura são encontradas diversas definições de microrredes. Dentre as definições encontradas, aquela que mais caracteriza a microrrede estudada nesse trabalho é:

Uma microrrede é um grupo de cargas e de recursos de energia distribuída interconectadas dentro de um limite elétrico claramente definido que atua como uma entidade controlável única com relação à rede. Uma microrrede pode conectar e desconectar-se da rede de modo que lhe permita operar integrada ou isolada da rede (“modo ilha”) (LASSETER *et al.*, 2002).

Normalmente, as fontes de geração distribuída empregadas em microrredes são de pequeno porte e instaladas próximas às unidades de consumo, compreendendo, em sua maioria, recursos energéticos distribuídos com predominância de recursos renováveis. Essas fontes de geração e os sistemas de armazenamento que constituem a microrrede devem ser conectados à rede por meio de inversores, responsáveis por fornecer energia dentro dos padrões normatizados, além de conferir flexibilidade de operação. Essa flexibilidade faz com que a fonte conectada ao inversor seja percebida como uma unidade controlada que fornece energia local de forma confiável e segura (CARNEIRO, 2017).

A atuação de uma microrrede deve ser inteligente, monitorar o estado do sistema sendo possível reconfigurar equipamentos de acordo com vários requisitos, eficiente, resiliente, dinâmica, flexível e com cargas integradas (SIOSHANSI, 2012). Nas microrredes seus diversos componentes como geradores, cargas e dispositivos de armazenamento são agrupados, operando como um único ativo dentro do Sistema Elétrico de Potência (SEP), o que facilita sua integração à rede elétrica. Assim, as microrredes são consideradas um importante ponto de transição entre operação de redes elétricas tradicionais (*dumb grids*) para redes inteligentes (*smart grids*) (SIOSHANSI, 2012).

2.7 Dispositivos de armazenamento de energia

A geração de energia do sistema elétrico tende a se tornar distribuída e com alta inserção de fontes renováveis. Existe, entretanto, aspectos negativos a essa grande penetração da GD, como por exemplo, a flutuação da geração de energia provida por fontes renováveis. Essas características demonstram que o sistema pode ter uma descompensação entre geração e demanda de carga.

No sistema elétrico com alta penetração de GD e com microrredes, deve haver balanço entre geração e demanda para manter a estabilidade do sistema, pois os fatores que influenciam a geração no futuro estão descorrelacionados com a demanda de carga (STRZELECKI, 2008). Nesse contexto, os DAE são soluções para manter a estabilidade. A presença de sistemas de armazenamento torna o sistema apto ao gerenciamento de energia, desacoplando a geração da demanda de carga. Dessa forma, os DAE contribuem para estabilidade do sistema, absorvendo a energia excedente da geração ou disponibilizando energia quando o sistema necessita.

A aplicação de dispositivos de armazenamento também é feita por questões de ordem econômica, como utilização em horário de pico para diminuição de despesas com a fatura de energia, além da utilização em situações em que a rede principal torna-se indisponível para manter as cargas consideradas críticas. Assim, o sucesso da reestruturação do sistema elétrico para melhorar a confiabilidade, qualidade de energia e inserção de geração distribuída por fontes renováveis passa pela efetividade dos sistemas de armazenamento de energia elétrica (USDE, 2007).

2.8 Sistemas de controle de microrredes

Para garantir a operação da microrrede da forma mais favorável. Existem três estratégias de controle para microrredes: controle centralizado, controle descentralizado e controle hierárquico. Deve-se salientar que esses nomes podem divergir de acordo com as referências (BORGES, 2016).

2.8.1 Controle centralizado

Os dados de toda a microrrede são processados em um controlador central que determinará as ações de controle de cada unidade controlada. Esse sistema, dependendo do tamanho da microrrede em que é empregado, requer um grande sistema de comunicação (BORGES,

2016).

2.8.2 Controle descentralizado

Cada unidade responsável por alguma ação de controle possui um controlador próprio que recebe apenas informação local sem interferência de variáveis do sistema e da ação de outros controladores (BORGES, 2016).

Analisando os tipos de controle centralizado e descentralizado, percebe-se que para sistemas de grande porte o controle centralizado torna-se inviável devido ao sistema de comunicação necessário, o que dificulta o processamento de dados. Uma estrutura hierárquica é frequentemente usada para coordenar os controladores locais para melhorar os efeitos do controle global. Além disso, o controle descentralizado torna inviável o acoplamento de informações entre as unidades de redes extensas. O controle hierárquico estabelece um modelo mais favorável dado os aspectos negativos citados nos outros modelos.

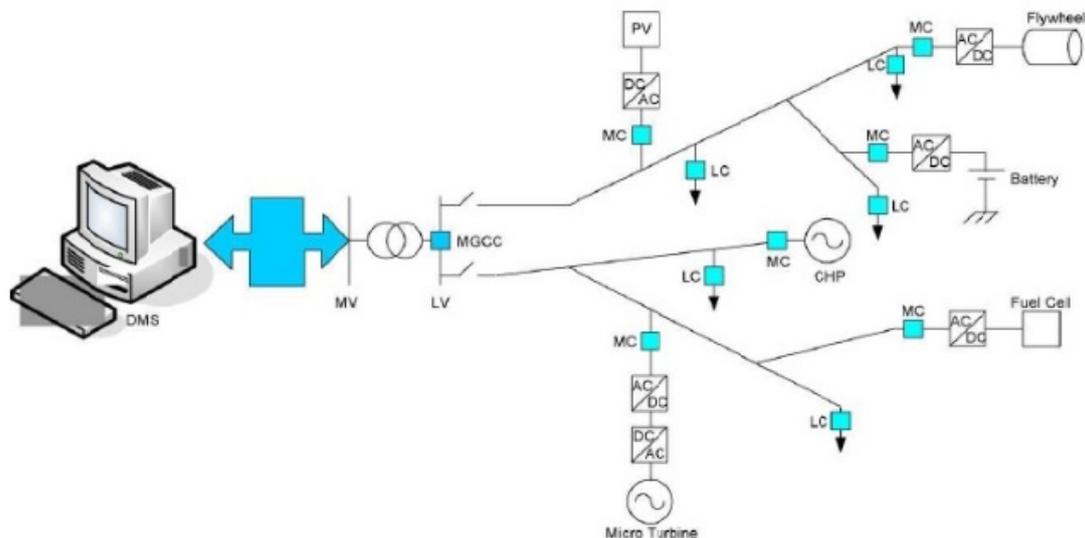
2.8.3 Controle hierárquico

O controle hierárquico trata-se de uma estratégia com três níveis de controle: *MC*, *LC*, *MGCC* e *Distribution Management System/Sistema de Gestão da Distribuição (DMS)*. Esses níveis de controle diferem entre si devido ao tempo e velocidade de resposta, além da infraestrutura necessária (VICENTIM, 2015).

A Figura 2 ilustra o controle hierárquico de microrredes. No nível mais baixo estão os controladores dos microgeradores ou *MC*, responsáveis pelo controle local de microfones e de elementos de armazenamento de energia, e, os controladores de carga ou *LC*. Os controladores de fonte, muitas vezes estão vinculados a dispositivos de eletrônica de potência, o que confere bastante flexibilidade à microrrede, sendo responsáveis, por exemplo, pelo controle de injeção de potência ativa e reativa e valores de tensão de acordo com o fluxo de informações com controladores em níveis hierárquicos superiores. Os controladores de cargas atuam através da conexão e desconexão de certos equipamentos em períodos pré-determinados ou em situações de alívio de carga. Os controladores em níveis mais baixos trocam informações com o *MGCC* ou controlador central da microrrede, que retorna com os comandos adequados. O *MGCC* está em um nível hierárquico intermediário e se comunica simultaneamente com o sistema de gerenciamento do sistema de distribuição (*DMS*) e os controladores de fonte e carga. O *DMS* representa o nível hierárquico mais elevado, estando a montante do *PCC*. Pode haver mais de um

MGCC conectado a um DMS em uma microrrede (BORGES, 2016).

Figura 2 – Controle hierárquico de uma microrrede



Fonte: ZAMORA e SRIVASTAVA (2010).

2.9 Vantagens associadas às microrredes

As microrredes representam uma evolução demandada pela sociedade em aspectos a cada dia mais valorizados. As vantagens que caracterizam essa evolução são muitas, dentre elas:

- a) **Confiabilidade e segurança no fornecimento de energia:** a microrrede se mostra resiliente, podendo operar de forma desconectada da rede da concessionária no caso de interrupção de fornecimento de energia e distúrbios externos. Sua geração distribuída e sistemas de armazenamento garantem o suprimento de cargas de forma independente da concessionária (BORGES, 2016).
- b) **Sustentabilidade:** as microrredes possuem muitos recursos de geração distribuída de pequeno porte proveniente, majoritariamente, de fontes renováveis o que favorece a questão ambiental e contribui para redução de poluentes. Além disso, o gerenciamento de geração e demanda é capaz de fazer com que as fontes geradoras mais poluentes só sejam acionadas em casos de demanda crítica (BORGES, 2016).
- c) **Redução de Perdas:** a utilização de fontes de energia centralizadas em redes de energia convencionais implica em elevados custos associados às perdas nas linhas de transmissão, além de sua construção. As microrredes localizadas junto a carga solucionam o problema desses custos, além de diminuir as perdas (BORGES, 2016).

- d) Alívio da rede de distribuição: o fluxo de potência excedente contribui para o alívio da rede de distribuição externa à microrrede.
- e) Benefícios econômicos e sociais: a geração de empregos, a redução de custos associados à construção de grandes usinas geradoras de energia, venda de energia por parte das unidades consumidoras com geração distribuída e necessidade menor de investimentos com reforços nas redes de distribuição e transmissão devido à elevação da demanda de energia são alguns exemplos desses benefícios.

2.10 Desafios à utilização de microrredes

Apesar de muitas vantagens, a utilização de microrredes ainda enfrenta alguns desafios para sua implantação em larga escala, dentre eles (HATZIARGYRIOU, 2014):

- a) Elevado custo dos equipamentos RED.
- b) Falta de regulamentação: não existem normas específicas para estabelecer questões de operação, proteção, critérios de qualidade e integração de microfuentes no mercado de energia em vários países.
- c) Mercado monopolizado.
- d) Dificuldades técnicas: escolhas de fontes apropriadas ao local, dimensionamento dos sistemas das fontes e definição da sua posição otimizada, desenvolvimento de infraestrutura de telecomunicação e chaveamento entre os modos de operação sem interrupção de fornecimento.
- e) Maior complexidade de operação da rede.
- f) A aleatoriedade das gerações distribuídas integrantes que dificultam a previsão de despacho.
- g) Aumento na complexidade de previsão da demanda de energia elétrica.
- h) A necessidade de reformulação dos procedimentos de operação, de controle e da proteção das redes das distribuidoras devido à interferência dos recursos energéticos distribuídos em níveis de corrente de carga e de curto-circuito, sentido do fluxo de potência, níveis de tensão, equilíbrio de carga entre as fases e outros parâmetros importantes.

2.11 Aspectos normativos de qualidade de energia elétrica

A exigência da sociedade por um fornecimento de energia de qualidade justifica a importância da análise da influência de novas tecnologias como a geração distribuída e microrredes nos níveis de corrente, tensão e nos parâmetros de qualidade a fim de verificar o cumprimento dos parâmetros normativos.

O Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) tem como objetivo estabelecer os procedimentos relativos à Qualidade de Energia Elétrica (QEE), abrangendo a qualidade do produto, do serviço prestado e do tratamento de reclamações.

Tratando-se de qualidade do produto, considerando o regime permanente e transitório, os aspectos adotados pelo módulo em questão são:

- a) Tensão em regime permanente;
- b) Fator de potência;
- c) Harmônicos;
- d) Desequilíbrio de tensão;
- e) Flutuação de tensão;
- f) Variação de frequência;
- g) Variações de tensão de curta duração.

Dentre os indicadores de qualidade de energia, o estudo desse trabalho faz análise dos níveis de tensão, baseando-se nos limites estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST que estabelece faixas de níveis de tensão classificando-o como adequado, precário e crítico. As Tabelas 1 e 2 apresentam as faixas de valores citadas para pontos de conexões em que as tensões nominais estão entre 1 kV e 69 kV e inferiores a 1 kV, respectivamente.

Tabela 1 – Faixas de tensão de leitura em pontos de conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,9TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: ANEEL (2017)

Tabela 2 – Faixas de tensão de leitura em pontos de conexão em tensão nominal inferior a 1 kV (380/220)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403) / (191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: ANEEL (2017).

O desequilíbrio de tensão, outro aspecto que será analisado nesse trabalho, é definido no módulo 8 do PRODIST como qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema.

Uma das metodologias de cálculo de Fator de desequilíbrio de tensão a partir da tensão de linha entre as fases (a, b e c) de uma rede de distribuição segue o procedimento:

- a) Cálculo do parâmetro β , explicitado na Equação 2.1, a ser utilizado na equação de cálculo do fator de desequilíbrio

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}, \quad (2.1)$$

Em que:

- V_{ab} é a tensão eficaz de linha entre as fases a e b;
- V_{bc} é a tensão eficaz de linha entre as fases b e c;
- V_{ca} é a tensão eficaz de linha entre as fases c e a.

- b) Cálculo do fator de desequilíbrio percentual através da Equação 2.2:

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}. \quad (2.2)$$

Os valores limites de fator de desequilíbrio em uma situação ideal são representados na Tabela 3. O indicador FD95% representa o maior valor excedido por 5% das medições consideraras ao se verificar o desequilíbrio de tensão em um ponto da rede elétrica.

Tabela 3 – Limites para os desequilíbrios de tensão

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n < 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Fonte: ANEEL (2017).

2.12 Considerações finais

Este capítulo apresentou as tendências das redes de distribuição, a configuração da arquitetura básica de uma microrrede com as suas principais tecnologias constituintes, os tipos de sistema de controle existentes, formas de operação, vantagens e desafios e a parte normativa vigente relacionada aos níveis de tensão em regime permanente e o desequilíbrio de tensão.

3 TOPOLOGIA E FERRAMENTA DE MODELAGEM DA MICRORREDE DO CONDOMÍNIO RESIDENCIAL ALPHAVILLE-FORTALEZA

3.1 Introdução

Nesse capítulo são apresentadas as atividades desenvolvidas na etapa de coleta de informações relativas ao objeto de estudo, a microrrede do condomínio Alphaville, e a definição do programa utilizado para sua modelagem, que inclui:

- a) Escolha do ATPDraw como ferramenta para modelagem da microrrede;
- b) Apresentação da microrrede em estudo;
- c) Levantamento dos dados necessários à modelagem da microrrede: fontes de geração distribuída, sistemas de armazenamento, sistema de controle, impedância dos condutores que alimentam a rede de distribuição interna, transformadores internos ao condomínio e formas de operação.

3.2 ATPDraw

A utilização de softwares para modelagem de microrrede operando em modo ilhado e conectado tem sido aplicado para vários estudos (AWAD E. A.; BADRAN, 2017) (ZHANG F.; ZHAO, 2015). Nesse trabalho, os estudos do comportamento da microrrede foram abordados utilizando o ATP.

O ATPDraw é um pré-processador gráfico e orientado por mouse para a versão *Alternative Transient Program (ATP)* do *Electromagnetic Transient Program/Programa de Transitórios Eletromagnéticos (EMTP)*. O software permite ao usuário a construção e simulação de sistemas elétricos utilizando modelos de componentes pré-definidos. A biblioteca de componentes do ATPDraw conta com grupos de abrangência nos quais cada um dos pré-modulados componentes elétricos se encontram, são eles:

- a) Medidores e Splitters;
- b) Ramos Lineares;
- c) Ramos Não Lineares;
- d) Modelos de Linhas e Cabos;
- e) Chaves;
- f) Fontes de Tensão e Corrente;
- g) Motores Elétricos;

- h) Transformadores;
- i) Componentes no Domínio da Frequência.

Além dos componentes pré-definidos, existem alguns *Transient Analysis of Control Systems*/Análise de Transiente em Sistemas de Controle (TACS) padrão (fontes TACS, acoplamento de circuitos, funções de transferência, portas Lógicas) e o usuário também pode fazer uso da linguagem MODELS para criação de novos componentes, aumentando as possibilidades de simulação.

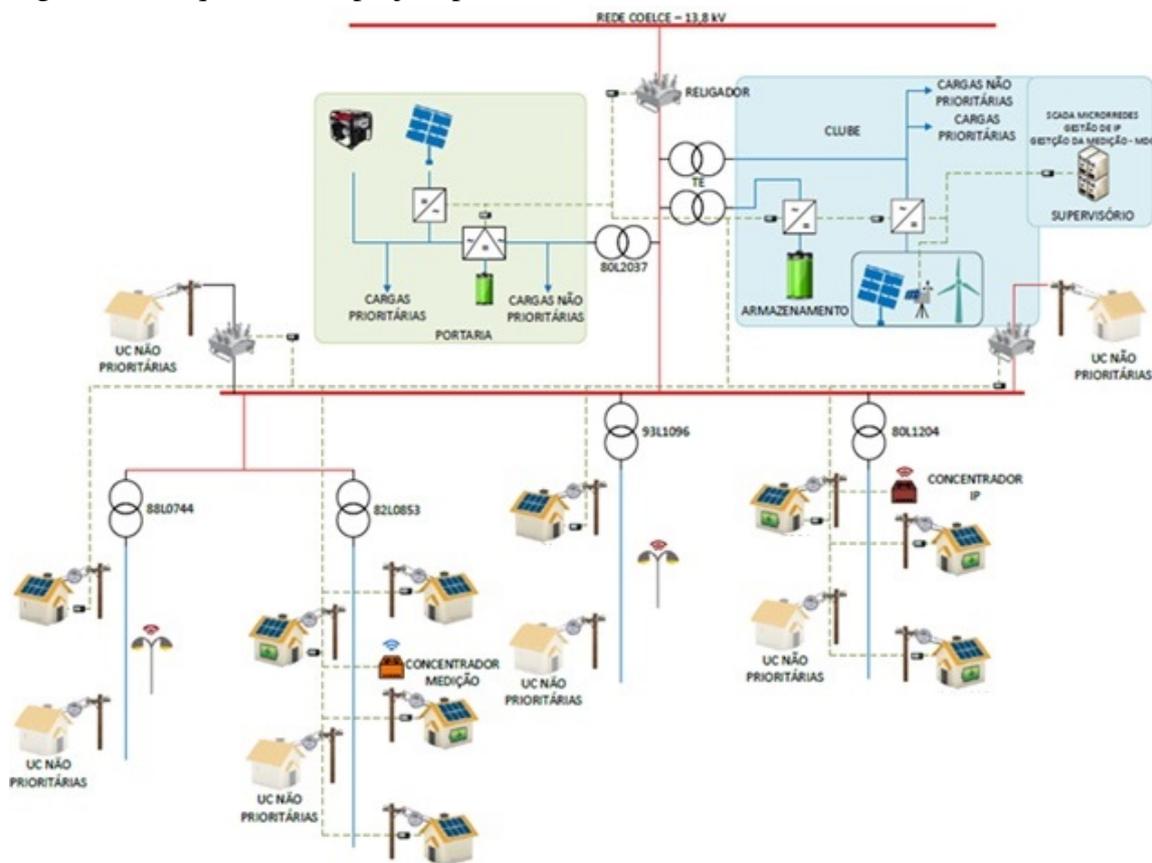
Nesse trabalho o ATPDraw foi utilizado na modelagem do projeto da microrrede do condomínio residencial Alphaville, cujos dados serão apresentados nas próximas seções do capítulo.

3.3 Apresentação da microrrede

As microrredes normalmente são instaladas em vilas, condomínios e em pequenas cidades. Nessa seção é apresentada a descrição geral da microrrede, objeto de estudo deste trabalho, que está sendo implantada no condomínio residencial Alphaville Fortaleza, localizado no município Aquiraz – Ceará, cujo fornecimento de energia é feito em média tensão (13,8 kV) através dos alimentadores da Subestação (SE) Água Fria (AGF) AGF01I2 ou AGF01I8 (para situações de contingência). A microrrede faz parte de um projeto de P&D intitulado “Desenvolvimento de Aplicação Piloto de Microrrede de Distribuição de Energia com Geração Distribuída e Modelo de Operação Comercial”, código ANEEL PD-0039-0073/2014, financiado pela concessionária Enel Distribuição Ceará.

Na Figura 3 é apresentada a arquitetura da microrrede Alphaville-Fortaleza em estudo e seus principais componentes, a saber: religador, transformador, sistema supervisorio, geração eólica, geração solar fotovoltaica, baterias, cargas prioritárias e não prioritárias, controladores, medidores e concentrador de medição.

Figura 3 – Arquitetura do projeto piloto



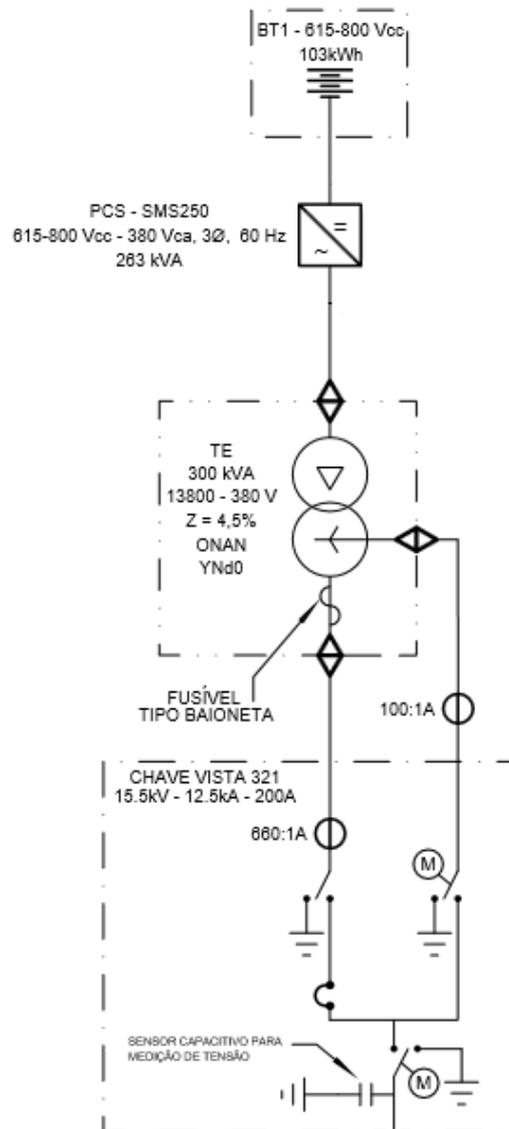
Fonte: Disponibilizado pela concessionária Enel.

As unidades contempladas pela microrrede são: Unidade de conexão com a rede principal, o religador instalado no ponto de conexão comum (PCC); Unidade da Central de Armazenamento de Energia; Unidade do Clube do Condomínio; Unidade da Portaria do Condomínio; Unidades Residenciais e Unidade de medição controle e supervisão. Essas unidades serão detalhadas nas seções seguintes.

3.3.1 Unidade Central de Armazenamento de Energia

A Unidade Central de Armazenamento de Energia, apresentada na Figura 4, é composta por um conjunto de baterias íon-lítio com potência nominal de 250 kW / 103 kWh, interfaceadas por um conversor destinado à conversão de tensão CA/CC e controle de carga e descarga das baterias. A saída do conversor é de 380 V trifásico entre as fases, passando por um transformador 380-13800 V com potência nominal de 300 kVA para adequação ao nível de tensão da rede.

Figura 4 – Unidade de armazenamento central



Fonte: Disponibilizado pela concessionária Enel.

Na entrada da unidade de armazenamento há uma Chave Vista de 200 A comandada por dois relés digitais SEL-351A, para a proteção e controle da referida unidade.

A unidade de armazenamento central permanece em stand-by enquanto a microrrede do condomínio estiver operando em modo conectado à rede externa principal. Na ocorrência de faltas na rede externa ao condomínio, que impeçam o fornecimento de energia, havendo a detecção e desconexão da rede principal através do PCC da microrrede, a rede de distribuição interna ao condomínio passará a ter como fonte de alimentação principal a Unidade de Armazenamento Central. As baterias do sistema de armazenamento, na situação de modo ilhado, irão fornecer energia às cargas consideradas prioritárias que incluem as unidades residenciais com geração, o clube e a portaria.

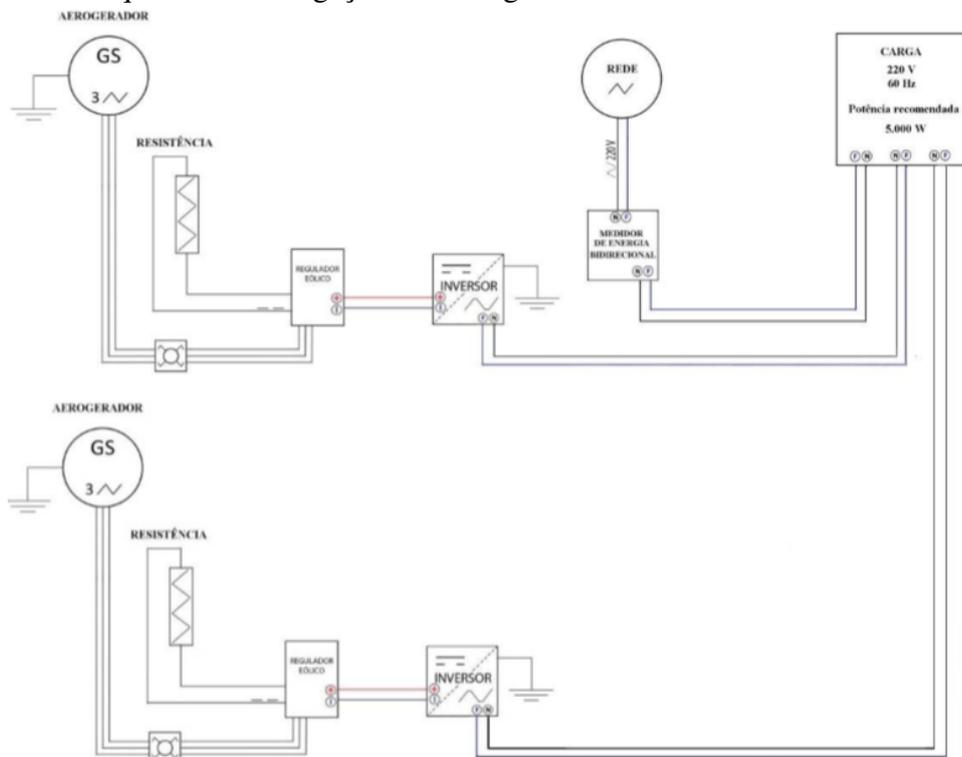
e interruptores diferenciais residuais existentes nos quadros de conexão.

Além da microgeração fotovoltaica, o clube conta com outra fonte de geração distribuída que consiste em dois aerogeradores. A microgeração se conecta ao sistema de baixa tensão, após a medição de energia da Enel, com o objetivo de suprir uma pequena parte das cargas do clube.

Os aerogeradores adotados para compor a geração suplementar do local são os de modelo ENAIR 3.5, geradores trifásicos que se conectam a uma ponte de retificação trifásica que é conectada a um inversor de frequência monofásico. Desta forma a saída disponível é em tensão monofásica de 220 V. O modelo escolhido possui uma potência nominal de 3,5 kW, entretanto, considerando a velocidade média de vento para o local de 7 m/s, a curva de potência fornece uma potência média disponível de 1,15 kW por aerogerador.

Na Figura 6 é apresentado o esquema básico de ligação dos aerogeradores da Unidade do Clube. Esses aerogeradores estão conectados a uma parcela de carga de uma das fases do clube, sendo estimado, baseado na potência média disponível, que o sistema suprirá cerca de 11,81% da energia demanda por esse carga. Assim, conclui-se que dificilmente essa fonte de geração irá injetar algum excedente na rede.

Figura 6 – Esquemático de ligação dos aerogeradores



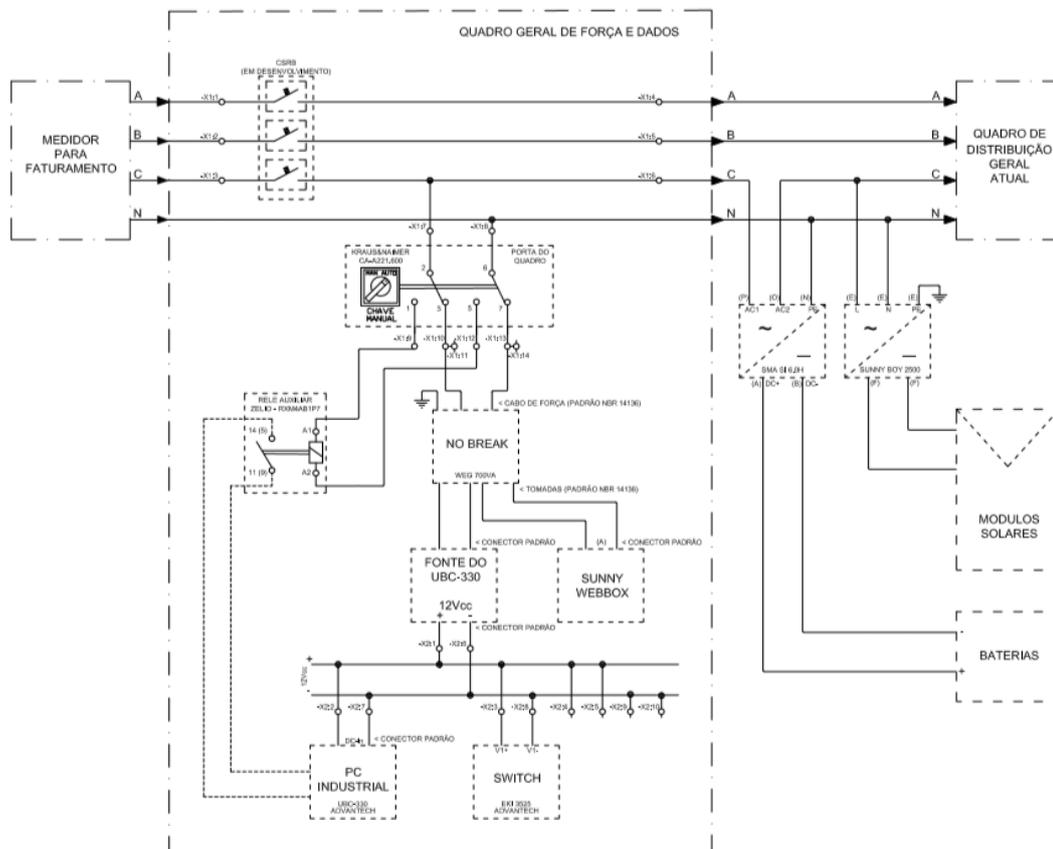
Fonte: Disponibilizado pela concessionária Enel.

3.3.3 Unidades Residenciais

O projeto da microrrede contempla dez unidades residenciais trifásicas com geração fotovoltaica monofásica conectada à fase C dentre as mais de 300 unidades instaladas no condomínio. Dentre as dez unidades consumidoras, cinco possuem um banco de baterias *off-grid* local instalado para operação em modo ilhado, no caso de se esgotar a capacidade do sistema de armazenamento central.

Na Figura 7 é apresentado o esquemático de geração existente nas casas com sistema de armazenamento local. A geração tem potência máxima de 2160 W e corrente de injeção na rede de 9,82 A. A conexão com a rede em tensão monofásica é interfaceada através do inversor para conexão das placas com o sistema elétrico, modelo SUNNYBOY SB2500. O sistema com 4 baterias de 220 Ah está em paralelo à geração. O Inversor para conexão da energia das baterias com o sistema elétrico da unidade consumidora é um inversor do modelo SUNNY ISLAND 3.0M.

Figura 7 – Unidade residencial com sistema de armazenamento local



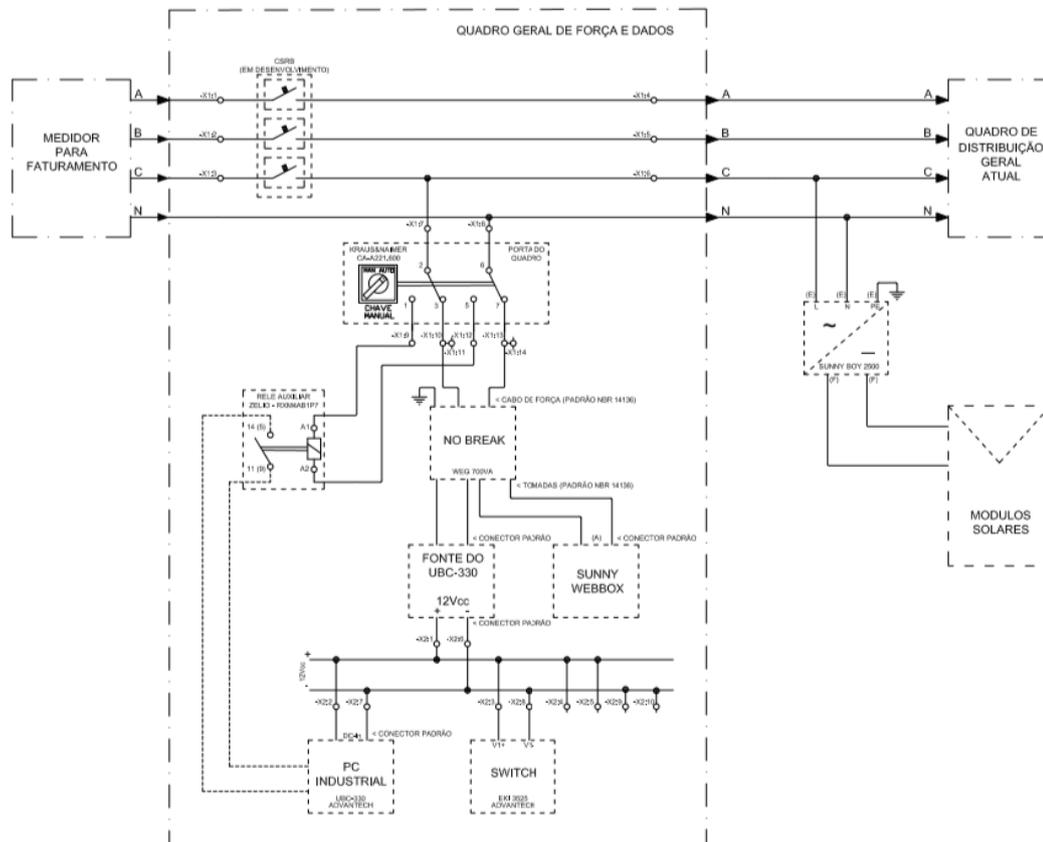
Fonte: Disponibilizado pela concessionária Enel.

O Quadro Geral de Força e Dados (*Smart Quadro*) instalado nas unidades residenciais-

ais com geração, compõe parte do sistema de controle da microrrede, interferindo na atuação das respectivas unidades de armazenamento e geração locais e controle. Além disso, existe um nobreak que garante o suprimento do quadro geral de força e dados em casos de desenergização da fase C. A proteção dos sistemas da UC é realizada através de um disjuntor termomagnético instalado entre o medidor e os inversores modelo SUNNYBOY SB2500, que, por sua vez, possuem as proteções de anti-ilhamento, sobre tensão, subtensão, sobrefrequência e subfrequência. Outra característica importante desses inversores consiste na injeção de apenas potência ativa na rede. Na saída do inversor conectado à microgeração, existe um disjuntor monofásico de 20 A sequenciado do disjuntor geral trifásico da UC. Além dos dispositivos citados, há um Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) ligado ao inversor.

O esquemático de microgeração instalada nas unidades residenciais que não possuem banco de baterias é apresentado na Figura 8. Essas UC têm potência de geração instalada de 2040 W. O inversor utilizado é do modelo INGECON SUNLITE 2.5TL, cujas características e funções de proteções são similares às do modelo SUNNYBOY SB2500. Os demais equipamentos são correspondentes aos das unidades com banco de bateria.

Figura 8 – Unidade residencial sem sistema de armazenamento local

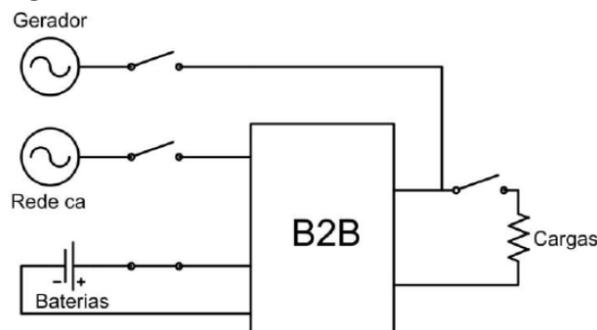


Fonte: Disponibilizado pela concessionária Enel.

3.3.4 Unidade da portaria

A portaria consiste em uma UC trifásica atendida em baixa tensão. O local possui geração fotovoltaica conectada à fase C, com as mesmas características de projeto das unidades residenciais sem bateria, um gerador à combustão (diesel) operando como unidade de *backup* e um conversor *back-to-back* utilizado como interface sempre que a microrrede estiver operando em modo ilhado e um banco de baterias. Essa unidade contém cargas críticas que devem ser mantidas energizadas mesmo em condição de emergência para garantir a segurança e controle do condomínio. Em caso de falta, a rede CA é desconectada e o banco de baterias passa a suprir as cargas críticas da portaria, passando essa bateria a ser a única fonte de fornecimento das cargas da portaria, sendo criado um subsistema que não interfere na rede do condomínio. Para o caso de se atingir um estado de carga muito baixo das baterias, o gerador a diesel é comandado automaticamente e o conversor sincroniza a fase e a amplitude com a medição de tensão proveniente do gerador e fecha o contato. Quando é detectada rede nos terminais do conversor, este alterna novamente o modo de operação, passando a rede externa a ser a fonte principal de fornecimento de energia das cargas da portaria. O esquemático de conexões do conversor é apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Conexões conversor *back-to-back*



Fonte: Disponibilizado pela concessionária Enel.

3.3.5 Unidade de medição, controle e supervisão

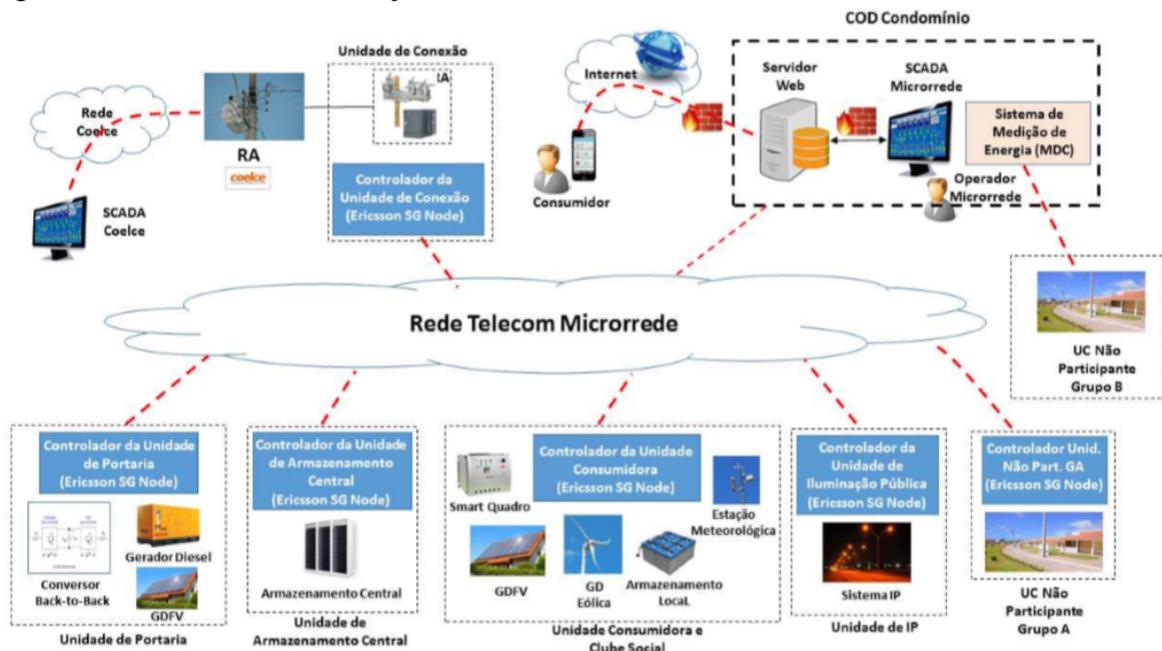
O sistema de controle foi projetado de forma a garantir que a microrrede opere no modo ilhado, isolada da rede de distribuição da concessionária, mantendo a qualidade do fornecimento de energia aos consumidores conectados, que também são selecionados através do sistema de controle. Para garantir o fornecimento de energia em modo ilhado, a microrrede se desconecta automaticamente da rede elétrica, passando a Central de Armazenamento, projetada

para operar em modo *off-grid*, a ser a principal fonte de alimentação, operando como um conversor de energia. No modo conectado, a rede elétrica juntamente com as fontes de geração distribuída suprem as cargas de toda a microrrede.

O projeto Microrrede conta com alguns sistemas para medição, controle e supervisão como sistema de medição de energia, para gestão dos medidores das unidades participantes e não participantes do projeto, sistema de controle para a Iluminação Pública (IP) dentro da área do condomínio e controladores locais para as unidades residenciais participantes e não participantes, unidade de armazenamento central, unidade da portaria e unidade do clube.

Para a integração dos sistemas existe um sistema *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)*, cuja atuação corresponde a de controlador central da microrrede. Como parte da infraestrutura de comunicação das microrredes, verificam-se soluções de vários tipos como fibra óptica, wireless ou cabeamento de rede. Os sistemas de controle locais e sua integração com o controlador central estão representados na Figura 10.

Figura 10 – Rede de comunicação da microrrede



Fonte: Disponibilizado pela concessionária Enel.

3.4 Possibilidades de operação da microrrede

A MR do condomínio possui dois modos de operação principais, os modos conectado e ilhado. Na condição normal de operação da rede externa ao condomínio, verifica-se o fornecimento de energia a todas as cargas do condomínio, sendo a fonte principal de energia

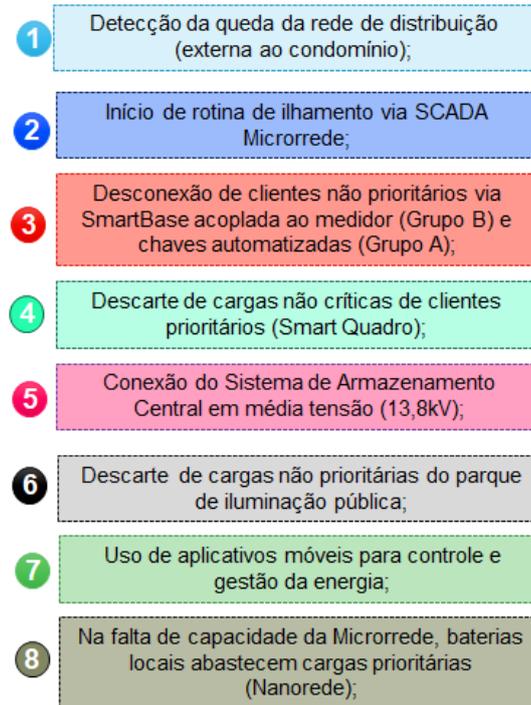
a rede de distribuição externa, havendo a influência dos recursos de geração distribuída eólica e fotovoltaica, cujo excedente é injetado na rede. Nesse modo de operação, não se verifica a operação dos sistemas de armazenamento.

Na ocorrência de alguma falta na rede de distribuição, que impeça o fornecimento para o condomínio, deve ocorrer a detecção da queda no fornecimento por parte do controlador da unidade de conexão, que irá estabelecer comunicação com o sistema SCADA para iniciar a rotina de ilhamento. Assim, ocorre a desconexão com a rede externa de distribuição, as cargas prioritárias são colocadas em modo ilhado, ocorre a desconexão dos usuários que não fazem parte da microrrede e o sistema de armazenamento central é colocado em modo ilhado, passando a ser a fonte principal de energia de todas as cargas prioritárias. As cargas prioritárias compreendem a fase C das unidades residenciais com geração e o clube. Na ocorrência de esgotamento da capacidade do sistema de armazenamento central, as unidades com geração fotovoltaica e sistema de armazenamento local são desconectadas do sistema de armazenamento central, passando a ser suprida pelo sistema de armazenamento local.

Para o caso em que a microrrede estiver operando em modo ilhado e for detectado o retorno da rede de distribuição, verifica-se a sincronização do sistema de armazenamento local com a tensão da rede para comandar o fechamento do religador de entrada. Em seguida, a unidade do sistema de armazenamento central e as unidades consumidoras prioritárias retornam ao modo conectado de operação e as cargas não prioritárias são reconectadas.

Na Figura 11 é apresentada, de forma resumida, a sequência de ações que ocorrem em uma situação de operação em modo ilhado.

Figura 11 – Rotina de operações na ocorrência de ilhamento



Fonte: Elaborado pela autora.

3.5 Considerações finais

Este capítulo apresentou a microrrede estudada nesse trabalho, mostrando as características dos RED, PCC, inversores e sistema de controle que compõem a arquitetura básica de uma microrrede. Além disso, foram apresentadas as possibilidades de operação da microrrede, mostrando a rotina de operação em situações de ilhamento. Na Tabela 4 é apresentado um resumo das principais características dos principais RED.

Tabela 4 – Resumo dos recursos energéticos distribuídos da microrrede do Alphaville

Recursos Energéticos Distribuídos	Potência Nominal	Número de Fases	Operação
Sistema de armazenamento central	250 kW	3	Modo ilhado
Sistema de armazenamento local residências	3 kW	1	Modo ilhado
Geração fotovoltaica residências sem banco de bateria	2,04 kW	1	Modo conectado e ilhado
Geração fotovoltaica residências com banco de bateria	2,16 kW	1	Modo conectado e ilhado
Geração fotovoltaica clube	24,96 kW	3	Modo conectado e ilhado
Geração eólica clube	3,5 kW	1	Modo conectado e ilhado

Fonte: Elaborado pela autora.

4 MODELAGEM DA MICRORREDE

4.1 Introdução

Apresentada a microrrede e seus principais dados, além da ferramenta que será utilizada para modelagem, nesse capítulo, os dados obtidos serão aplicados na modelagem da microrrede no ATP. As unidades modeladas neste trabalho são:

- a) Transformadores e alimentadores da rede de distribuição;
- b) Cargas;
- c) Unidades geradoras;
- d) Sistema de armazenamento.

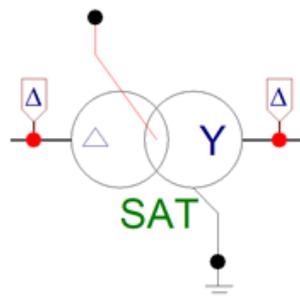
4.2 Modelagem dos transformadores e alimentadores da rede de distribuição

O condomínio residencial em que está sendo implantada a microrrede é alimentado em média tensão, através do alimentador AGF01I2 e, em situações de contingência, pelo AGF01I8, ambos oriundos da SE AGF. A rede de distribuição interna ao condomínio é constituída de 13 transformadores de distribuição. Nesse tópico será apresentada a modelagem da rede de distribuição interna ao condomínio juntamente com os seus transformadores e cabos integrantes.

4.2.1 Dados para modelagem de transformadores de distribuição

O modelo de transformador disponível no ATP é o denominado SATTRAFO, apresentado na Figura 12, que permite modelar um transformador de distribuição não ideal e pode simular ligações Delta-Estrela, Delta-Delta, Estrela-Delta e transformadores com três enrolamentos.

Figura 12 – Modelo de transformador no ATP



Fonte: ATPDraw (2017)

Para utilização desse modelo de transformador no ATP os dados necessários para o cálculo dos parâmetros requeridos são:

- a) Potência do transformador;
- b) Tensão de linha do primário e secundário;
- c) Frequência;
- d) Impedância;
- e) Corrente a vazio;
- f) Curva de saturação.

As tensões de linha nos lados primário e secundário do transformador são de, respectivamente, 13,8 kV e 380 V e a frequência de operação de 60 Hz. Na Tabela 5 são apresentados os dados dos transformadores de distribuição utilizados na modelagem da microrrede, entre os quais estão: tensão primária e secundária, impedância, corrente de excitação e relação entre reatância e resistência. Esses dados foram adotados baseando-se em modelos de transformadores de distribuição da WEG, cujas folhas de dados se encontram no Anexo D.

Tabela 5 – Dados dos transformadores da rede interna do condomínio

Tombamento	Potência	Impedância	X/R	Corrente de Excitação	Frequência	Tensão de Linha Primário	Tensão de Linha Secundário
80L0696	75 kVA	3,50%	3,6364	2,70%	60 Hz	13,8 kV	380V
TKS2002	112,5 kVA	3,50%	3,6364	2,50%	60 Hz	13,8 kV	380V
03L0934	112,5 kVA	3,50%	3,6364	2,50%	60 Hz	13,8 kV	380V
03L0798	112,5 kVA	3,50%	3,6364	2,50%	60 Hz	13,8 kV	380V
80L1204	112,5 kVA	3,50%	3,6364	2,50%	60 Hz	13,8 kV	380V
93L1238	112,5 kVA	3,50%	3,6364	2,50%	60 Hz	13,8 kV	380V
94L1195	75 kVA	3,50%	3,6364	2,70%	60 Hz	13,8 kV	380V
93L1096	112,5 kVA	3,50%	3,6364	2,50%	60 Hz	13,8 kV	380V
80L2000	150 kVA	3,50%	3,6364	2,30%	60 Hz	13,8 kV	380V
80L2037	45 kVA	3,50%	3,6364	3,20%	60 Hz	13,8 kV	380V
82L0853	112,5 kVA	3,50%	3,6364	2,50%	60 Hz	13,8 kV	380V
88L1181	112,5 kVA	3,50%	3,6364	2,50%	60 Hz	13,8 kV	380V
88L0744	112,5 kVA	3,50%	3,6364	2,50%	60 Hz	13,8 kV	380V

Fonte: Elaborado pela autora.

A curva de saturação de um transformador tem muitas variáveis associadas ao seu comportamento, sendo um fator muito importante para sua definição o material que compõe o núcleo. Na modelagem dos transformadores em ATP adotou-se os dados da curva da chapa de aço silício de grãos orientados da acesita, mostrados na Tabela 6, que será tomada como base para dimensionar a curva de corrente versus fluxo, que será utilizado no ATPDraw.

Tabela 6 – Curva de magnetização da chapa de aço silício de grãos orientados da ace-sita

H [A/m]	B [T]
6.684	0.2
11.099	0.4
17.729	0.8
23.805	1.2
31.495	1.4
64.166	1.6
136.311	1.7
946.842	1.85
7419.427	2
30000	2.1

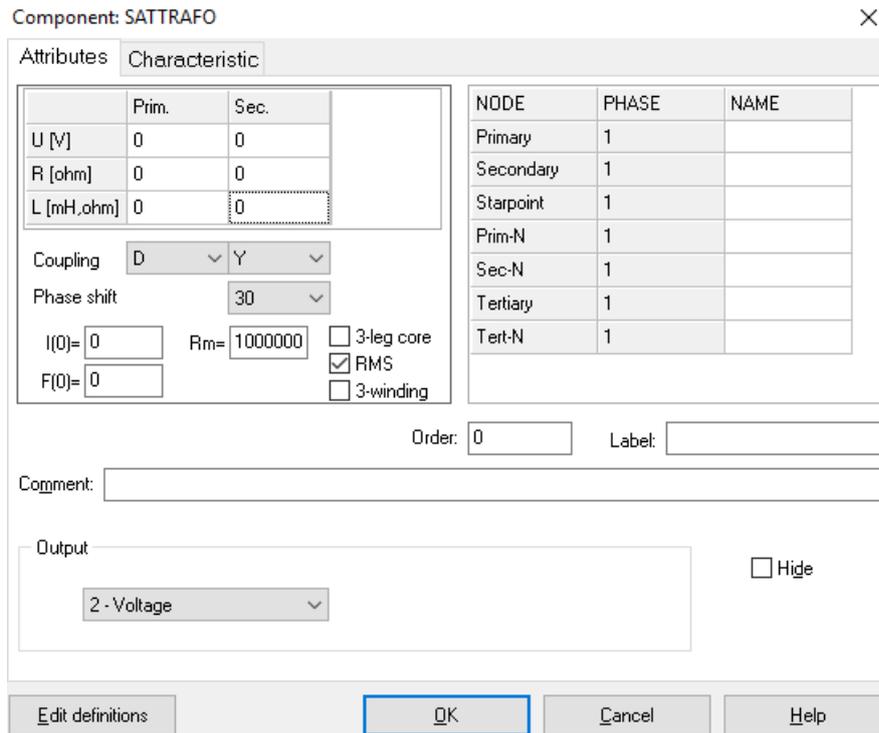
Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.2 Cálculo dos parâmetros de entrada dos transformadores de distribuição

Os dados coletados dos transformadores são utilizados para o cálculo dos parâmetros de entrada do modelo SATTRAFO do ATP. Na Tela de entrada de dados SATTRAFO, apresentada na Figura 13, foram cadastrado os seguintes dados:

- a) Corrente através do ramo magnetizante;
- b) Fluxo no ramo de magnetização em regime permanente;
- c) Resistência de magnetização no ramo magnetizante;
- d) Resistência no enrolamento primário;
- e) Indutância no enrolamento primário;
- f) Tensão aplicada sobre o enrolamento primário;
- g) Resistência no enrolamento secundário;
- h) Indutância no enrolamento secundário;
- i) Tensão no enrolamento secundário.

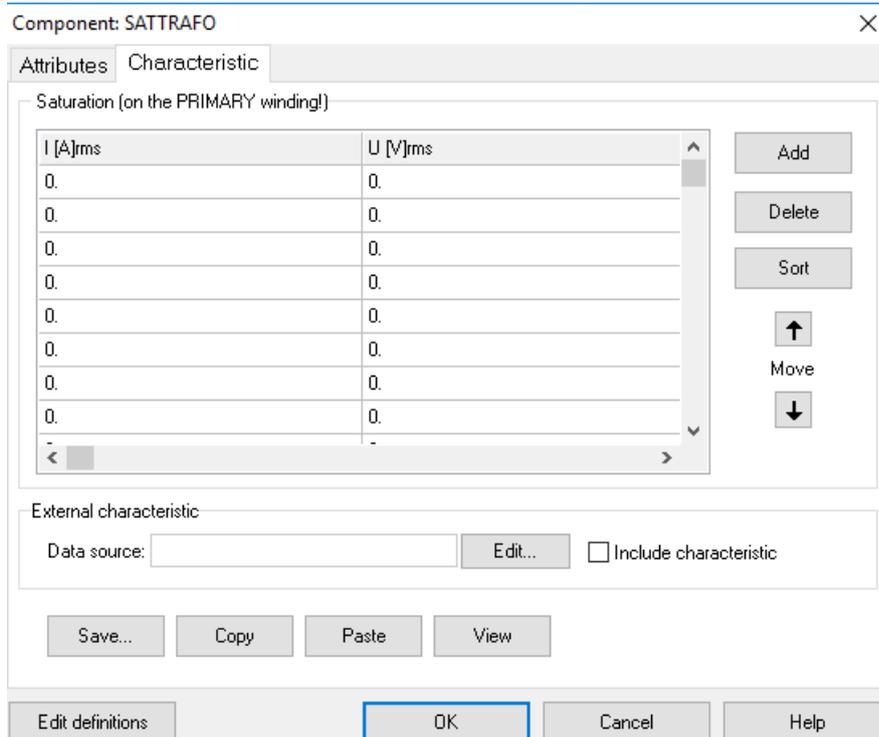
Figura 13 – Parâmetros de entrada do SATTRAFO



Fonte: ATPDraw (2017).

Para adição da curva de saturação do transformador, deve-se adicionar cada par de pontos da curva como verificado da Figura 14.

Figura 14 – Parâmetros da curva de saturação SATTRAFO



Fonte: ATPDraw (2017).

O cálculo dos parâmetros de entrada com os dados coletados é feito a partir da sequência:

- a) Cálculo da relação de transformação utilizada nos cálculos das correntes nas bobinas e das impedâncias primária e secundária.

$$\alpha = \frac{V_P}{V_S}. \quad (4.1)$$

Em que:

- α é a relação de transformação.

- b) Cálculo da corrente nominal no primário e no secundário através da potência nominal aparente e da tensão nominal no primário.

$$I_{np(f)} = \frac{S_{1\varnothing}}{V_p}. \quad (4.2)$$

Em que:

- $I_{np(f)}$ é a corrente na bobina.

Assim, tem-se:

$$I_{np(linha)} = \sqrt{3} \cdot I_{np(fase)}. \quad (4.3)$$

Além disso:

$$I_{ns} = \frac{S_{1\varnothing}}{V_s}. \quad (4.4)$$

Em que:

- $I_{np(fase)}$ é a corrente de fase no primário;
- $I_{np(linha)}$ é a corrente de linha no primário;
- $S_{1\varnothing}$ é a potência monofásica;
- V_p é a tensão de fase no primário;
- V_s é a tensão de fase no secundário.

- c) Cálculo do valor de pico da corrente a vazio.

$$I_{0RMS} = \frac{S_{1\varnothing}}{V_p} \cdot \frac{I_0\%}{100}. \quad (4.5)$$

Logo:

$$I_{0pico} = \sqrt{2} \cdot I_{0RMS}. \quad (4.6)$$

Em que:

- I_{0RMS} é o valor eficaz da corrente a vazio;
- I_{0pico} é o valor de pico da corrente a vazio.

d) Cálculo da impedância base do primário e secundário a partir da impedância de curto-circuito verificada para os transformadores de distribuição que é obtida através do ensaio de curto-circuito aplicando uma porcentagem da tensão nominal, o que deve ser convertido para os valores base da tensão e potência nominal do enrolamento.

No primário, tem-se:

$$Z_{base(p)} = \frac{V_p^2}{S_{1\varnothing}} \quad (4.7)$$

De onde se obtém:

$$Z_P = \frac{V_p^2}{S_{1\varnothing}} \cdot \frac{Z_{cc}[\%]}{2 \cdot 100} \quad (4.8)$$

Para o secundário:

$$Z_{base(s)} = \frac{V_s^2}{S_{1\varnothing}} \quad (4.9)$$

$$Z_S = \frac{V_s^2}{S_{1\varnothing}} \cdot \frac{Z_{cc}[\%]}{2 \cdot 100} \quad (4.10)$$

Em que:

- $Z_{base(p)}$ é a impedância base no primário;
- $Z_{base(s)}$ é a impedância base no secundário;
- Z_{cc} é a impedância no ensaio de curto-circuito;
- Z_P é a impedância no primário;
- Z_S é a impedância no secundário.

e) Cálculo da resistência no primário e no secundário.

Para o enrolamento primário:

$$R_P = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_{base(p)} \quad (4.11)$$

Para o enrolamento secundário:

$$R_S = \frac{R_P}{\alpha^2} \quad (4.12)$$

Em que:

- $R\%$ é a resistência percentual no primário;
- R_P é a resistência no primário;
- R_S é a resistência no secundário.

f) Cálculo da indutância no primário e no secundário.

Calcula-se primeiro a reatância a partir da relação:

$$Z^2 = R^2 + X^2. \quad (4.13)$$

Assim, a reatância no primário pode ser determinada por:

$$X_P = \sqrt{Z_P^2 - R_P^2}. \quad (4.14)$$

Para o secundário:

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_S^2}. \quad (4.15)$$

Em que:

- X_P é a reatância no primário;
- X_S é a reatância no secundário.

A indutância é calculada baseada nos valores de reatâncias através da relação:

$$X[mH] = L \cdot 2\pi f \cdot 1000. \quad (4.16)$$

Em que:

- f é a frequência;
- L é a indutância;
- X é a reatância.

g) Cálculo da resistência de magnetização.

O valor da potência a vazio é dado por:

$$P_0 = V_P I_{0(RMS)} \cos \varphi_0. \quad (4.17)$$

A resistência necessária para magnetizar o núcleo é:

$$R_{mag} = \frac{V_P^2}{P_0}. \quad (4.18)$$

Em que:

- R_{mag} é a resistência de magnetização;

- P_0 é a potência a vazio.
- h) Cálculo do fluxo de magnetização.

O fluxo é obtido da expressão:

$$\lambda_0 = \frac{V_p \sqrt{2}}{2\pi f}. \quad (4.19)$$

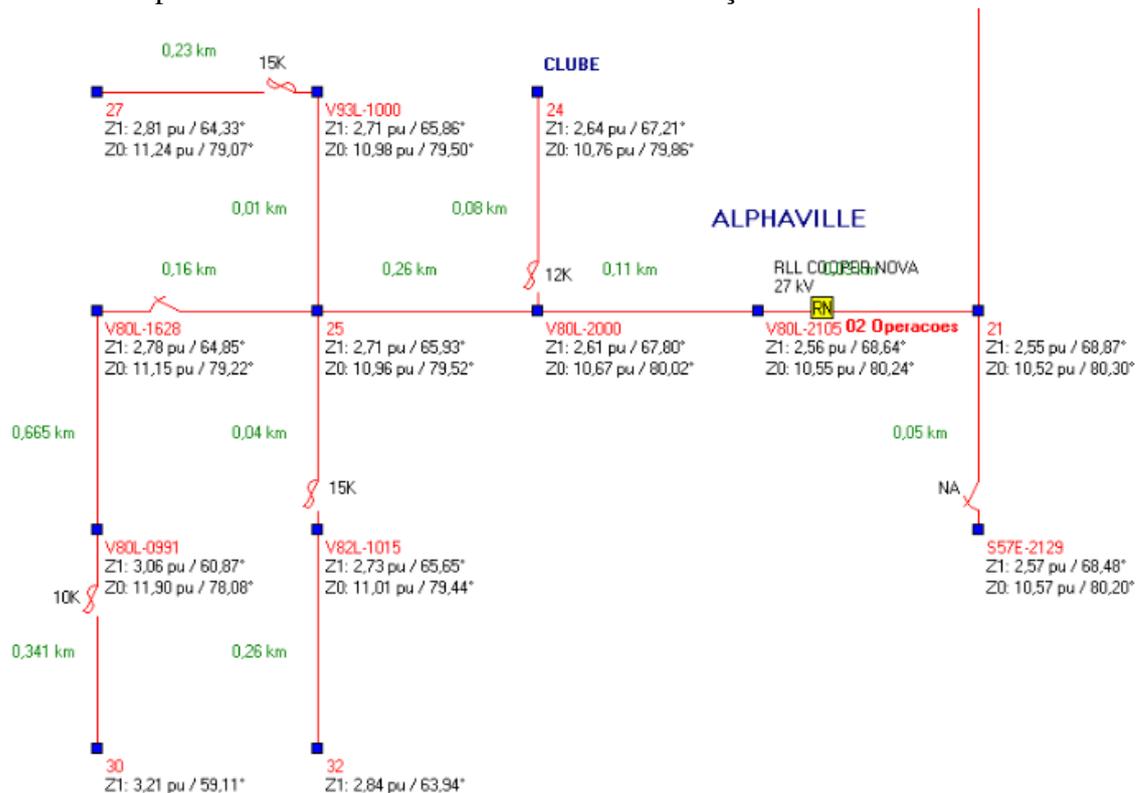
Em que:

- λ_0 é o fluxo de magnetização (pico).

4.2.3 Modelagem dos condutores de distribuição

Na Figura 15 é apresentado um diagrama do alimentador de distribuição AGF01I2 e da rede interna da microrrede mostrando os valores por unidade (pu) de impedância acumuladas de sequência positiva e sequência zero da rede de média tensão.

Figura 15 – Impedância dos condutores da rede de distribuição do condomínio



Fonte: Disponibilizado pela concessionária Enel.

Para modelagem dos alimentadores e da rede interna foi utilizado o modelo de linha disponibilizado no ATPDraw denominado LINEPI3S, no qual foram cadastrados os dados de resistência, indutância e capacitância de sequência positiva e sequência zero. Para rede de baixa tensão, devido à sua pequena extensão, a impedância foi considerada desprezível.

Os valores bases adotados na configuração apresentada para potência e tensão são, respectivamente:

$$S_B = 100MVA, \quad (4.20)$$

$$V_B = 13,8kV. \quad (4.21)$$

Os valores base definidos foram utilizados no cálculo da impedância base através da Equação 4.22.

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B}. \quad (4.22)$$

Em que:

- Z_B é a impedância base;
- V_B é a tensão de base;
- S_B é a potência de base.

O valor da impedância do trecho foi obtido através da Equação 4.23:

$$Z = Z_B \cdot Z_{pu}. \quad (4.23)$$

Em que:

- Z_B é a impedância base;
- Z_{pu} é a impedância por unidade;

Através do cálculo da impedância do trecho e do ângulo da impedância, calculou-se a resistência e a reatância através das Equações 4.24 e 4.25.

$$R = Z \cdot \cos(\theta), \quad (4.24)$$

$$X = Z \cdot \sin(\theta). \quad (4.25)$$

Em que:

- Z é a impedância do trecho;

- θ é o ângulo da impedância;
- R é a resistência do trecho;
- X é a reatância do trecho.

Posteriormente, calculou-se a indutância e a capacitância dos trechos a partir da reatância através das Equações 4.26 e 4.27.

$$L = \frac{X}{2\pi f}, \quad (4.26)$$

$$C = 2\pi fX. \quad (4.27)$$

Em que:

- L é a indutância do trecho;
- C é a capacitância do trecho;
- f é a frequência de operação do sistema;
- X é a reatância do trecho.

Os valores de impedância em cada ponto foram utilizados no cálculo de indutância e resistência de cada trecho, que são apresentados na Tabela 7. Os valores de capacitância, por serem muito pequenos, foram considerados insignificantes para modelagem. Os barramentos e trechos citados na tabela podem ser verificados na Figura 19 em que é mostrada a representação completa da microrrede do condomínio.

Tabela 7 – Resistência e indutância dos trechos da rede de distribuição interna do condomínio

Trecho	Seq. Positiva		Seq. Zero	
	R[Ω]	L[mΩ]	R[Ω]	L[mΩ]
Saída do alimentador - Conexão do condomínio	1,750595691	12,01543	3,375564755	52,38284
Conexão - Religador	0,025105607	0,028309	0,030363167	0,139949
Religador - Ramificação portaria/clube	0,102350287	0,163508	0,115608563	0,56194
Ramificação - Clube	0,069419027	0,087771	0,086046514	0,421248
Ramificação - Barramento principal	0,226843889	0,29217	0,274960213	1,356983
Barramento principal - Barramento 1	0,271122375	0,388518	0,320719573	1,586632
Barramento principal - Barramento 2	0,213247032	0,294529	0,262182598	1,308011
Barramento principal - Barramento 3	0,731872158	1,003262	0,884317148	4,375825
Barramento principal - Barramento 4	0,301658167	0,412778	0,365029208	1,806419

Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 Modelagem de cargas

Para modelagem das cargas, primeiramente, foi feito o modelo de carga conectada aos transformadores que não possuem nenhuma unidade consumidora com geração conectada ao seu lado de baixa tensão. Posteriormente, para os transformadores com unidades geradoras conectadas, modelou-se a carga das UC com geração baseando-se na carga total instalada para fazer o cálculo de demanda, enquanto as demais cargas conectadas ao transformador foram representadas de forma similar às cargas conectadas aos transformadores sem geração conectada ao lado de baixa tensão. Todas essas cargas foram conectadas através de chaves para possibilitar o controle das cargas que continuam alimentadas no modo ilhado e quais cargas devem ser retiradas de serviço.

O componente adotado para modelagem das cargas de distribuição de cada fase foi o modelo de circuito RLC, no qual foram cadastrados os valores de resistência, indutância e capacitância. Esses valores foram calculados a partir dos valores de potência aparente, tensão na carga, frequência e fator de potência. Estando as cargas alimentadas em baixa tensão, o valor de tensão de fase é de 220 V e a frequência de 60 Hz. O fator de potência adotado, considerado compatível com o perfil de consumo residencial, foi de 0,95.

Para estimar a potência demandada pela carga conectada a cada transformador da rede interna do condomínio, foi adotado uma potência de 2,25 kVA por UC sem geração distribuída conectada, com base no critério de projetos de redes de distribuição aérea de média e baixa tensão da Enel (ENEL, 2017), a partir de uma análise do perfil de consumo das unidades consumidoras do condomínio, que superam 500 kWh. Os transformadores de código TKS2002, 94L1195 constituem parte de subestação de clientes atendidos em média tensão em que não há acesso aos dados das cargas instaladas, sendo adotado, portanto, um valor de 80% da potência nominal do transformador para modelar as cargas. O Clube também é uma unidade atendida em média tensão cuja demanda contratada, cuja demanda contratada, que foi adotada na modelagem, é de 84 kW. Os transformadores do condomínio com as respectivas quantidades de UC conectadas e a potência total adotada para modelagem da carga são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Potência de carga dos transformadores da rede de distribuição interna

Código do transformador	Número de clientes conectados	Potência para modelagem da carga [kVA]
80L0696	25	56,25
TKS2002	1	90
03L0934	41	92,25
03L0798	38	85,5
80L1204	47	105,75
93L1238	30	67,5
94L1195	1	60
93L1096	48	108
80L2000	1	88,42
80L2037	15	33,75
82L0853	30	67,5
88L1181	35	78,75
88L0744	46	103,5

Fonte: Elaborado pela autora.

O cálculo de demanda para definir a potência de modelagem das cargas das unidades residenciais com geração e da portaria foi baseado na carga instalada em uma unidade residencial modelo. A carga instalada utilizada para o cálculo de demanda dessas unidades consumidoras é apresentada no Anexo B.

O cálculo de demanda para essas unidades foi feito a partir da Equação 4.28 proposta por NISKIER e MACINTYRE (2008).

$$D = d_1 + d_2 + (1,5 \cdot d_3) + d_4 + d_5 + d_6. \quad (4.28)$$

Em que:

- D é a demanda da unidade consumidora;
- d_1 é a demanda de iluminação e tomadas;
- d_2 é a demanda dos aparelhos para aquecimento de água;
- d_3 é a demanda dos aparelhos de ar condicionado tipo janela;
- d_4 é a demanda das unidades centrais de condicionamento de ar;
- d_5 é a demanda dos motores elétricos e máquinas de solda;
- d_6 é a demanda das máquinas de solda a transformador.

As tabelas utilizadas nos cálculos de demanda estão no Anexo B. O valor de demanda obtido e utilizado na modelagem das cargas da portaria e das unidades residenciais com geração fotovoltaica foi de 6,998 kVA.

Estabelecidos os valores de potência para modelagem das cargas e determinados os demais dados a serem utilizados, determinou-se a potência ativa e reativa a partir da potência aparente e determinou-se a impedância em módulo e ângulo associada. Para determinação de resistência e indutância a partir da impedância adotou-se a mesma metodologia demonstrada na Seção 4.2.3.

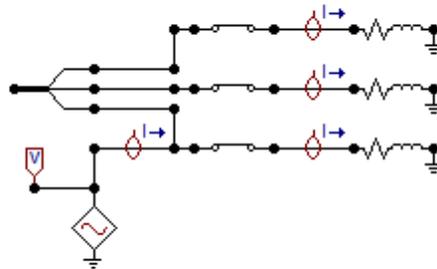
Para fins de simulação, foi adotado um caso de carga equilibrada entre as fases e outro caso de cargas desequilibradas entre as fases, sendo que a potência atribuída à fase A foi 40% da potência atribuída anteriormente, a fase B com 60 % do valor anterior e a fase C com 80% do primeiro valor de potência utilizado. Os valores de resistência e indutância adotados para modelagem estão disponíveis no Apêndice A.

4.4 Modelagem das unidades com geração

Nesse estudo as fontes de geração fotovoltaicas foram modeladas por uma fonte de corrente alternada representando o conjunto de geração juntamente com o inversor. O elemento do ATP utilizado para esses casos foi o ACSOURCE e os dados inseridos na modelagem foram valor de amplitude de corrente, frequência e ângulo de fase. O ângulo de fase foi ajustado para que a corrente injetada pela geração e a tensão na fase em que a mesma foi inserida estejam em fase, garantindo a injeção de apenas potência ativa, característica dos modelos de inversores utilizados. O valor de amplitude da fonte de corrente foi ajustado em 13,88 A para as unidades com sistema de armazenamento e 13,11 A para as unidades sem sistema de armazenamento, baseando-se na corrente de injeção na rede de projeto .

Na Figura 16 é apresentada a configuração das unidades residenciais com geração monofásica e da portaria. Nesses casos, a geração está conectada a fase C, as cargas modeladas por fase e chaveadas para estabelecer o controle de carga em modo ilhado. Não foi modelada a bateria e o gerador a diesel da portaria, pois os mesmos só operam em modo ilhado como um subsistema independente.

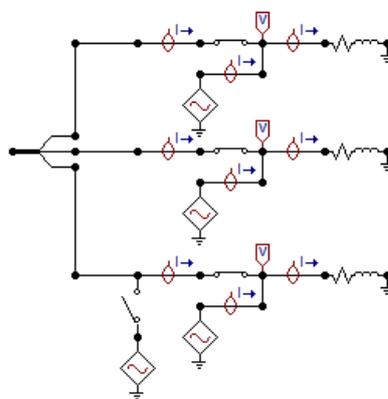
Figura 16 – Modelagem de unidade residencial com geração fotovoltaica



Fonte: Elaborado pela autora.

A modelagem do clube segue o mesmo tipo de configuração adotado nas unidades residenciais, sendo a geração fotovoltaica trifásica. Devido ao tempo de realização desse trabalho, não foi modelada a fonte eólica existente no clube. Foi verificado em projeto que a geração eólica dificilmente irá injetar algum excedente na rede, suprindo em média 2,3 kW da carga da fase em que está conectada, que foi considerada como a fase C. Assim, sendo a demanda total do clube de 84 kW, para verificar a influência da fonte eólica na rede, foi subtraída na modelagem da carga o valor de 2,3 kW de potência da fase C que passou de 28 kW para 25,7 kW na situação de carga equilibrada e de 22,4 kW para 20,1 kW na situação de carga desequilibrada. Para simulação de curtos-circuitos, foi estimado em projeto que essa fonte injeta uma corrente máxima de 15,09 A por aerogerador, sendo modelada uma fonte de corrente de 30 A chaveada na fase C do clube. A Figura 17 apresenta a configuração de modelagem do clube.

Figura 17 – Modelagem do clube

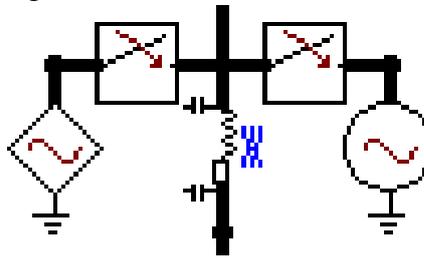


Fonte: Elaborado pela autora.

4.5 Modelagem do Sistema de Armazenamento Central

O Sistema de Armazenamento Central foi modelado através de fonte de tensão alternada com tensão de linha de 13,8 kV representando o conjunto bateria, inversor e transformador. Para modelagem também foi utilizada uma fonte de corrente alternada de 22 A chaveada para simulação de situações de curto-circuito em que o sistema de armazenamento central atua como uma fonte de corrente. A Figura 18 representa o modelo utilizado para o sistema de armazenamento.

Figura 18 – Modelagem do sistema de armazenamento central

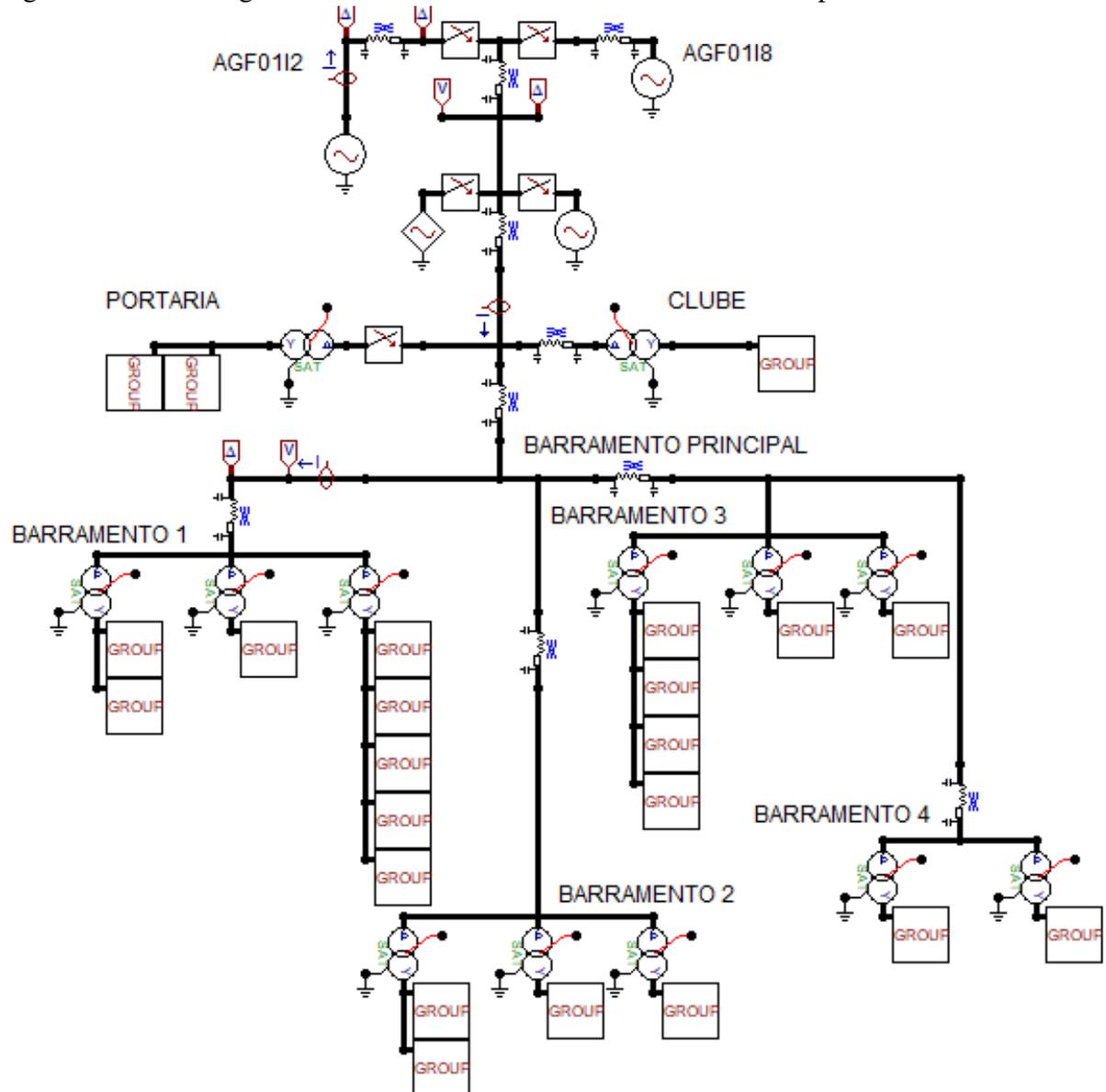


Fonte: Elaborado pela autora.

4.6 Modelagem da microrrede suprida pelos alimentadores da SE Água Fria

A modelagem da microrrede completa suprida pelos alimentadores da SE Água Fria é apresentada na Figura 19. Conforme pode ser observado, as UC com geração e as cargas, apresentadas em detalhes na seção anterior, estão representadas no modelo *GROUP* de forma simplificada, implementado através da ferramenta *Compress*.

Figura 19 – Modelagem da microrrede do condomínio residencial Alphaville



Fonte: Elaborado pela autora.

5 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA MICRORREDE

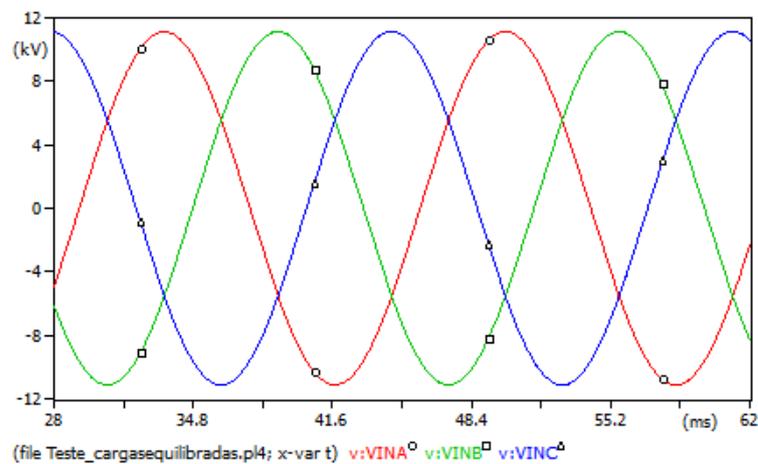
5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as simulações de situações de operação da microrrede com carga totalmente equilibrada, com certo nível de desequilíbrio e na ocorrência de curtos-circuitos monofásicos e trifásicos. A partir das simulações, são avaliados os níveis de tensão de linha e de fase na média tensão próximo ao ponto de entrada do condomínio e na baixa tensão na saída do transformador de código 82L0853, que possui 4 unidades residenciais com geração fotovoltaica conectadas. Nas simulações de curto-circuito são verificados os níveis de tensão e corrente com as fontes de geração distribuída conectadas e desconectadas da microrrede para verificar sua influência nos parâmetros em estudo.

5.2 Simulação da microrrede com cargas equilibradas

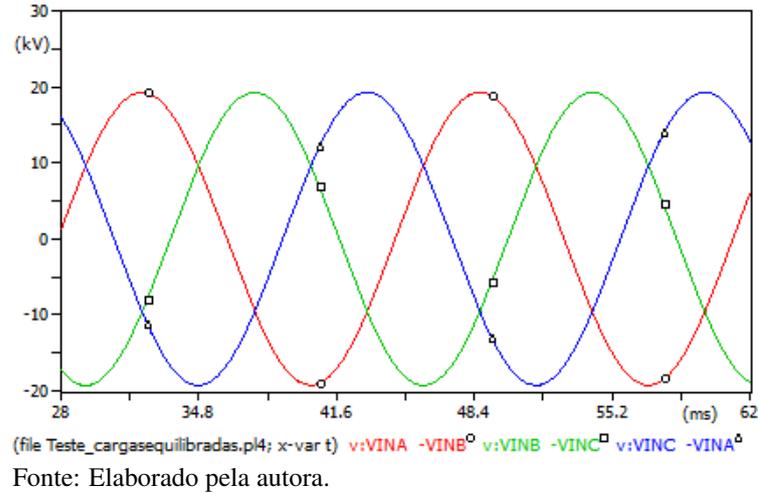
Foi simulado através do ATPDraw, primeiramente, uma situação de cargas totalmente equilibradas entre as fases no modo conectado, em que a rede de distribuição externa é a principal fonte e existe a influência dos recursos de GD. Nessa situação foram verificados os níveis de tensão de fase e tensão de linha na média tensão próximo à entrada do condomínio. As formas de onda de tensão são apresentadas nas Figuras 20 e 21.

Figura 20 – Tensão de fase na entrada do condomínio



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 21 – Tensão de linha na entrada do condomínio



A tensão da fase A está representada em vermelho, da fase B em verde e da fase C em azul. As tensões de linha entre as fases A e B, B e C, C e A estão representadas em vermelho, verde e azul, respectivamente. Esse método foi repetido nas demais simulações.

Para a mesma situação de simulação foram verificados os níveis de tensão no secundário do transformador de código 82L0853, que possui quatro unidades residenciais com geração conectadas. As formas de onda obtidas são apresentadas nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 – Tensão de fase no secundário de transformador de distribuição

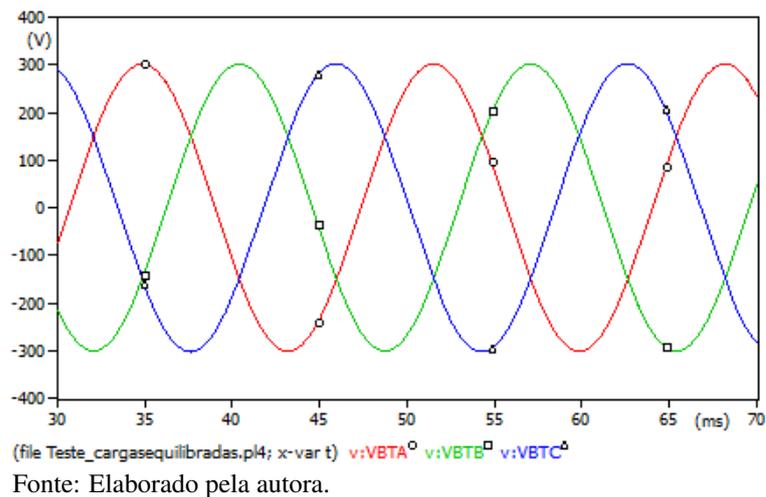
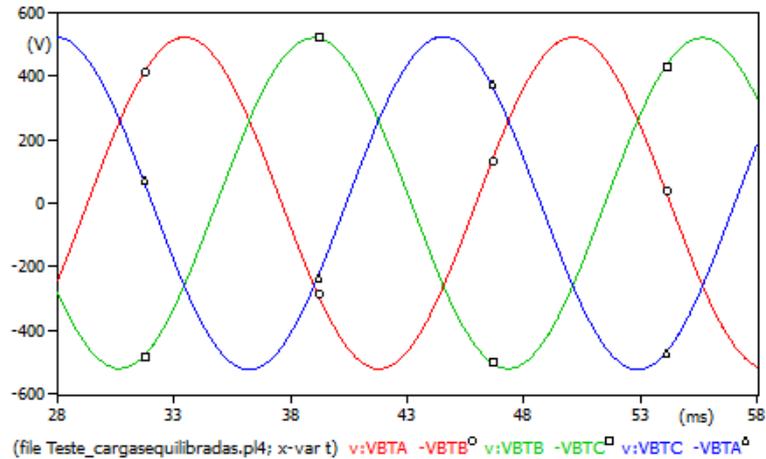


Figura 23 – Tensão de linha no secundário de transformador de distribuição



Fonte: Elaborado pela autora.

Nas Tabelas 9 e 10 são apresentados os valores eficazes de tensão de fase e de linha na média tensão e na baixa tensão em um comparativo com os respectivos valores nominais. Cabe ressaltar que o ajuste da fonte de tensão conectada ao alimentador modelado foi feito com um valor nominal de tensão de linha de 13,8 kV. Assim, a elevada impedância entre a fonte modelada e a entrada do condomínio justifica a notória queda de tensão no alimentador. Existem dois reguladores de tensão no alimentador AGF01I2 que certamente ajustam esses valores, entretanto, não foram coletados dados a respeito da posição e ajuste dos reguladores de tensão para que se possa inserir outro valor de tensão na fonte.

Tabela 9 – Tensão de fase para cargas equilibradas no modo conectado

Fase	Tensão de Fase Nominal [V]	Tensão de Fase Medida [V]	Tensão de Fase Medida [pu]	Avaliação
MT				
A	7967,434	7882,8264	0,98938082	Adequado
B	7967,434	7882,1193	0,98929207	Adequado
C	7967,434	7888,4832	0,99009081	Adequado
BT				
A	220	213,5533	0,97069682	Adequado
B	220	213,3836	0,96992545	Adequado
C	220	214,0483	0,97294682	Adequado

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 10 – Tensão de linha para cargas equilibradas no modo conectado

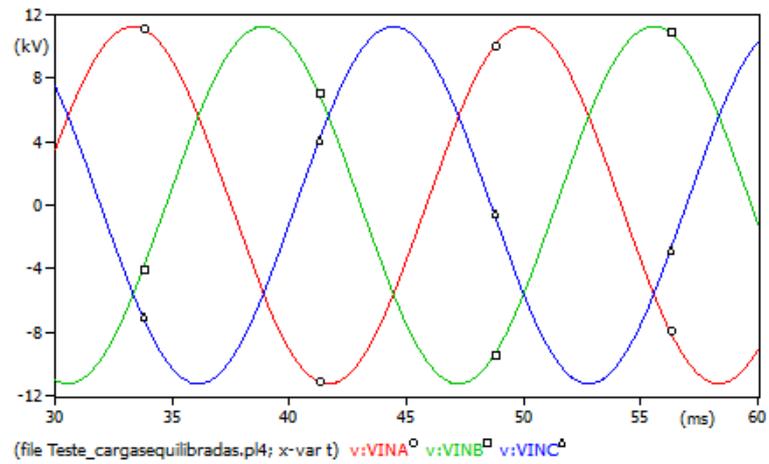
Linha	Tensão de Linha Nominal [V]	Tensão de Linha Medida [V]	Tensão de Linha Medida [pu]	Avaliação
MT				
AB	13800	13646,4538	0,988873	Adequado
BC	13800	13655,6461	0,98954	Adequado
CA	13800	13657,0604	0,989642	Adequado
BT				
AB	380	369,8381	0,973258	Adequado
BC	380	369,4209	0,97216	Adequado
CA	380	371,3866	0,977333	Adequado

Fonte: Elaborado pela autora.

Através das tabelas é verificado que os níveis de tensão de fase tanto na baixa tensão quando na média tensão apresentaram uma elevação na fase C, na qual se concentra a maior parte da geração. Entretanto, esse aumento não foi muito significativo. Apesar das quedas de tensão apresentadas desde a fonte até a entrada do condomínio, os níveis de tensão estão na faixa de valores adequados aos estabelecidos pelo PRODIST, conforme determinado nas Tabelas 1 e 2. Relacionado ao desequilíbrio de tensão, foi calculado o fator de desequilíbrio conforme descrito na Seção 2.11. O fator de desequilíbrio na baixa tensão para essa situação é de 0,323% e, para média tensão, 0,049%. Ambos estão dentro dos limites estabelecidos em norma.

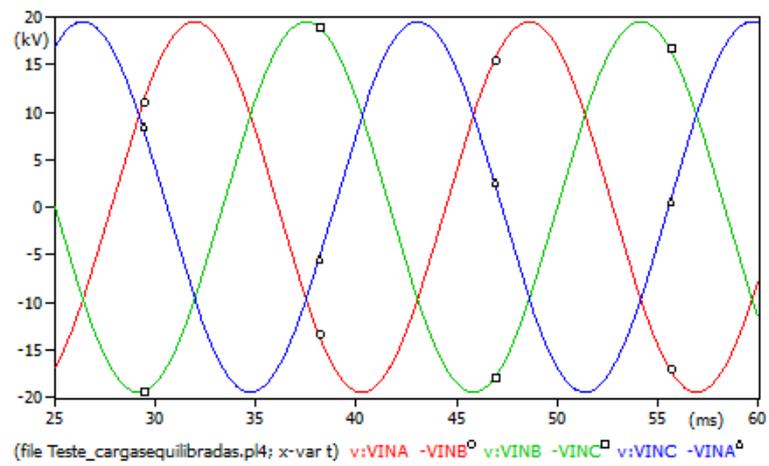
A outra situação simulada para cargas equilibradas, foi a operação em modo ilhado, desconectando as cargas não-prioritárias e colocando o banco de baterias modelado em operação. Nas Figuras 24, 25, 26 e 27 são apresentadas as formas de onda de tensão de linha e de fase na entrada do condomínio e no secundário do transformador 82L0853. As Tabelas 11 e 12 apresentam os valores eficazes obtidos.

Figura 24 – Tensão de fase entrada do condomínio com cargas equilibradas em modo ilhado



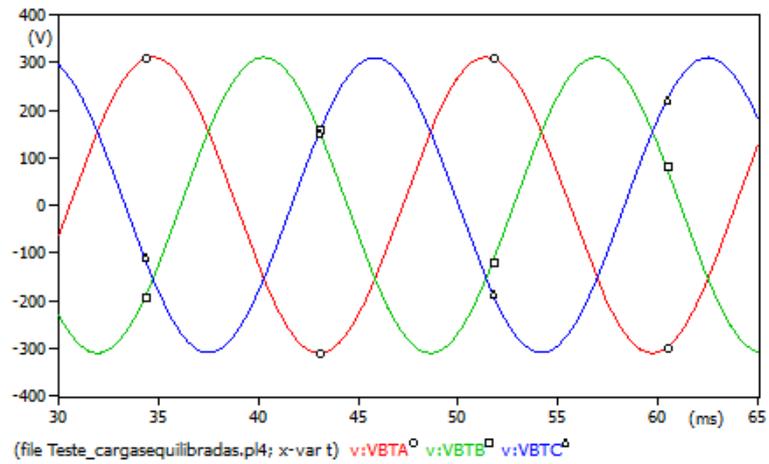
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 25 – Tensão de linha entrada do condomínio com cargas equilibradas em modo ilhado



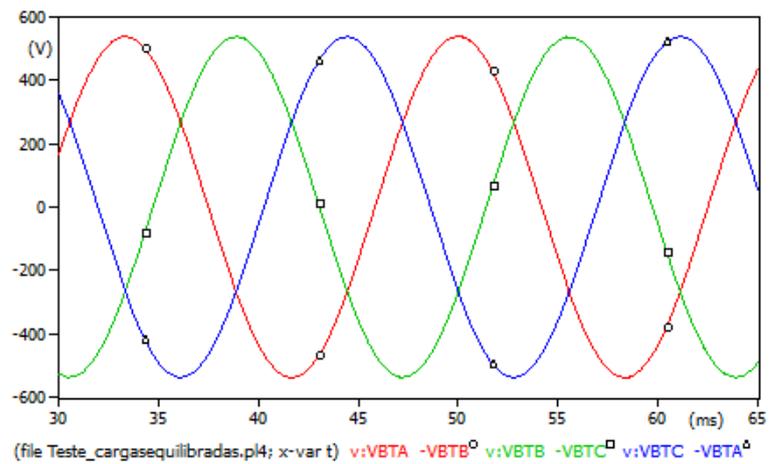
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 26 – Tensão de fase secundário do transformador com cargas equilibradas em modo ilhado



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 27 – Tensão de linha secundário do transformador com cargas equilibradas em modo ilhado



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 11 – Tensão de fase para cargas equilibradas no modo ilhado

Fase	Tensão de Fase Nominal [V]	Tensão de Fase Medida [V]	Tensão de Fase Medida [pu]	Avaliação
MT				
A	7967,434	7965,5579	0,99976453	Adequado
B	7967,434	7965,5579	0,99976453	Adequado
C	7967,434	7965,5579	0,99976453	Adequado
BT				
A	220	219,7971	0,99907773	Adequado
B	220	219,7971	0,99907773	Adequado
C	220	219,2738	0,99669909	Adequado

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 12 – Tensão de linha para cargas equilibradas no modo ilhado

Linha	Tensão de Linha Nominal [V]	Tensão de Linha Medida [V]	Tensão de Linha Medida [pu]	Avaliação
MT				
AB	13800	13797,0675	0,999788	Adequado
BC	13800	13797,0675	0,999788	Adequado
CA	13800	13797,0675	0,999788	Adequado
BT				
AB	380	378,8466	0,996965	Adequado
BC	380	378,8466	0,996965	Adequado
CA	380	380,3457	1,00091	Adequado

Fonte: Elaborado pela autora.

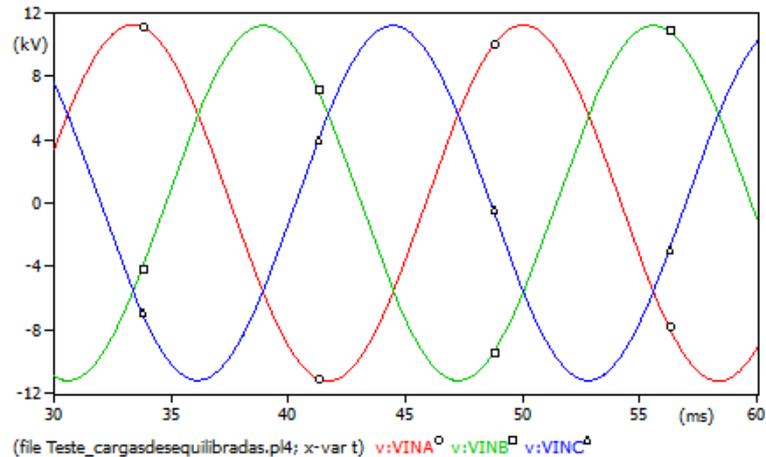
Para operação em modo ilhado com cargas equilibradas, os níveis de tensão fase estavam em valores próximos aos nominais, evidenciando a vantagem da localização da fonte principal de energia próximo à carga. Nessa situação, as tensões de linha possuem o mesmo valor na média tensão e, no secundário do transformador em estudo, o fator de desequilíbrio é de 0,264%.

5.3 Simulação da microrrede com cargas desequilibradas

A outra situação simulada consiste na operação da microrrede com cargas desequilibradas. A fase A de todas as cargas do condomínio foi modelada com 40% do valor anterior, a fase B com 60% e a fase C com 80%. As situações de operação e os pontos de verificação de tensão foram os mesmos da situação anterior.

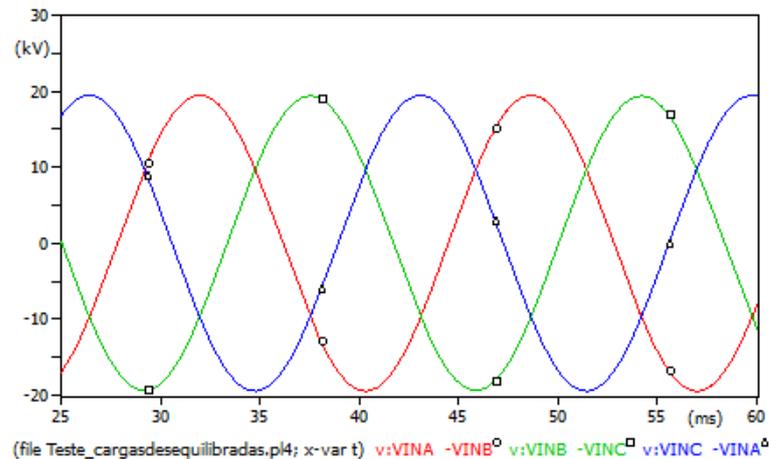
As Figuras 28, 29, 30 e 31 apresentam o comportamento das tensões de fase e de linha próximo à entrada do condomínio e no secundário do transformador utilizado para o estudo em uma operação em modo conectado. As Tabelas 13 e 14 apresentam os valores eficazes de tensão obtidos nessa situação.

Figura 28 – Tensão de fase entrada do condomínio com cargas desequilibradas em modo conectado



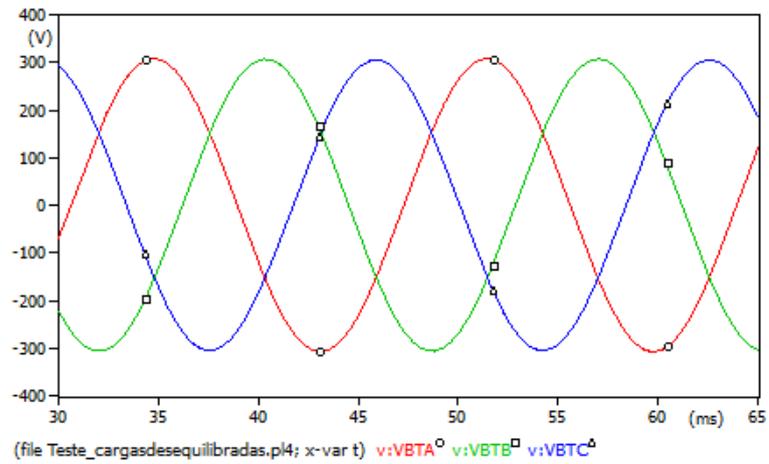
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 29 – Tensão de linha entrada do condomínio com cargas desequilibradas em modo conectado



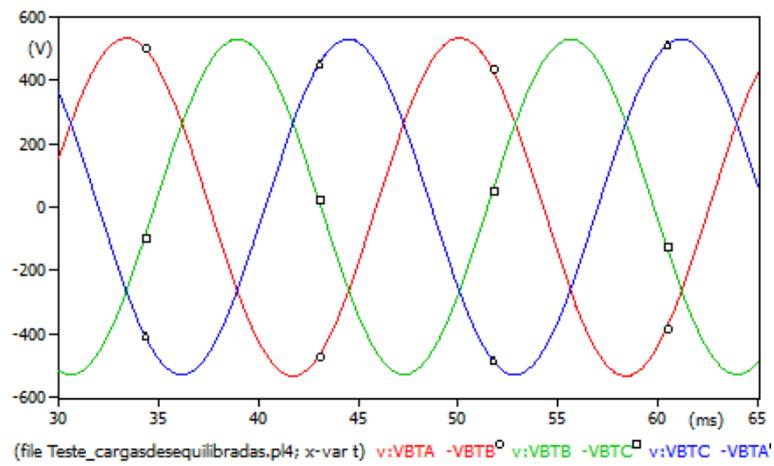
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 30 – Tensão de fase secundário do transformador com cargas desequilibradas em modo conectado



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 31 – Tensão de linha secundário do transformador com cargas desequilibradas em modo conectado



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 13 – Tensão de fase para cargas desequilibradas no modo conectado

Fase	Tensão de Fase Nominal [V]	Tensão de Fase Medida [V]	Tensão de Fase Medida [pu]	Avaliação
MT				
A	7967,434	7959,901	0,99905453	Adequado
B	7967,434	7930,2025	0,99532704	Adequado
C	7967,434	7923,8386	0,9945283	Adequado
BT				
A	220	217,612	0,98914545	Adequado
B	220	216,039	0,98199545	Adequado
C	220	215,816	0,98098182	Adequado

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 14 – Tensão de linha para cargas desequilibradas no modo conectado

Linha	Tensão de Linha Nominal [V]	Tensão de Linha Medida [V]	Tensão de Linha Medida [pu]	Avaliação
MT				
AB	13800	13769,4904	0,997789	Adequado
BC	13800	13706,5579	0,993229	Adequado
CA	13800	13758,1766	0,996969	Adequado
BT				
AB	380	377,6516	0,99382	Adequado
BC	380	374,4908	0,985502	Adequado
CA	380	374,9787	0,986786	Adequado

Fonte: Elaborado pela autora.

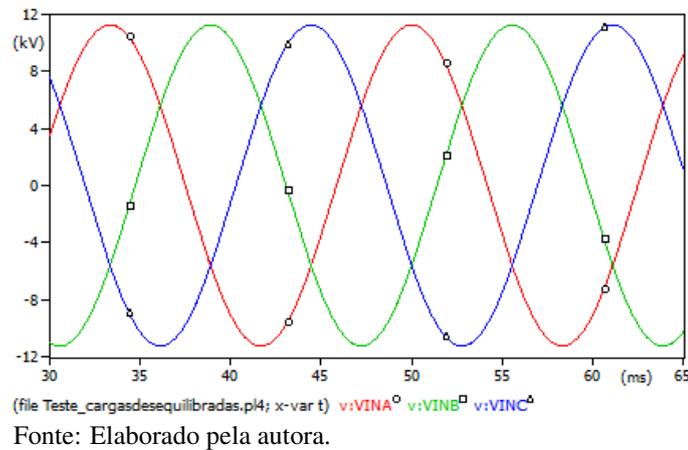
Nessa situação foi verificada uma maior diferença entre as tensões de fase, o que é justificado pelo elevado desequilíbrio de carga, sendo que as fases com menor carga apresentam tensões mais elevadas e próximas do valor nominal. A diferença entre a tensão da fase A e a fase B é maior que entre a fase B e a C. Assim, verifica-se que a geração, mais concentrada na fase C, contribui para elevar um pouco o nível de tensão na fase com maior carregamento. O fator de desequilíbrio verificado na média tensão é de 0,282% e, na baixa tensão, 0,524%. Esses valores estão dentro dos limites estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST, mas mostram um grande aumento no desequilíbrio de tensão.

Para as cargas desequilibradas, foram verificados os mesmos valores de tensão dada uma situação de modo ilhado. As figuras 32, 33, 34 e 35 apresentam as tensões de fase e de linha nos mesmos pontos estudados anteriormente e as Tabelas 15 e 16 os valores eficazes de tensão

nesses pontos.

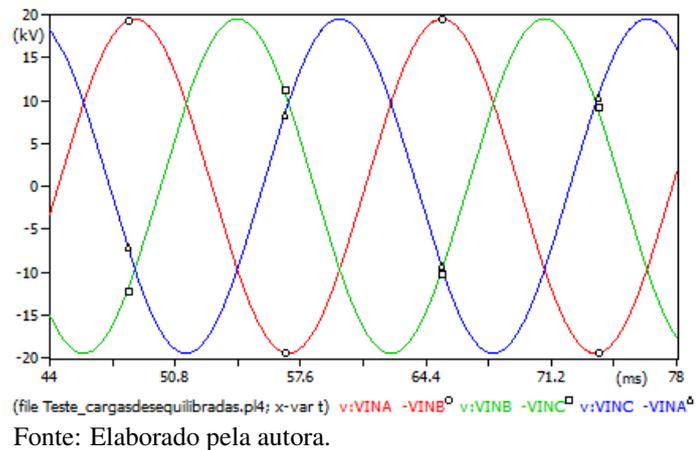
Nessa situação os valores de tensão de fase ficaram ainda mais próximos dos valores nominais com relação à situação de cargas equilibradas devido ao menor carregamento das fases. O fator de desequilíbrio no secundário do transformador é de 0,114%. Assim, os níveis de tensão continuam adequados e com fator de desequilíbrio dentro dos limites estabelecidos em norma.

Figura 32 – Tensão de fase entrada do condomínio com cargas desequilibradas em modo ilhado



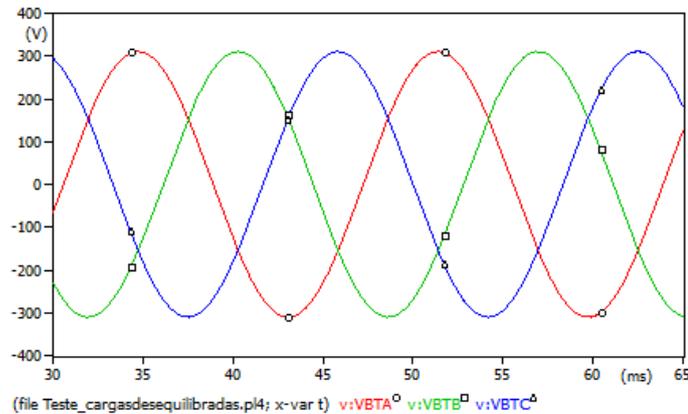
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33 – Tensão de fase entrada do condomínio com cargas desequilibradas em modo ilhado



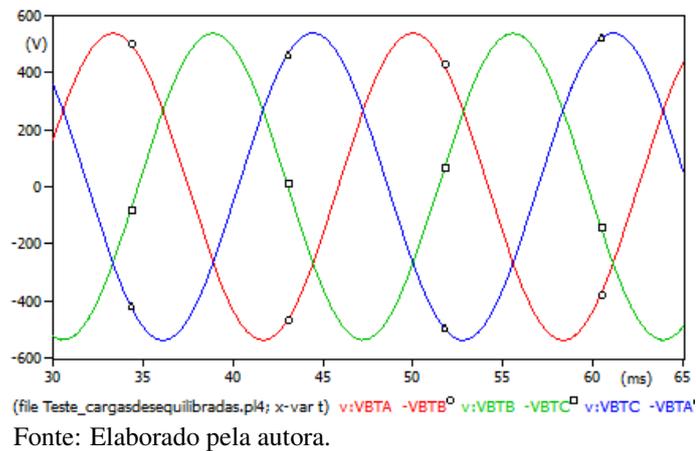
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 34 – Tensão de fase secundário do transformador com cargas desequilibradas em modo ilhado



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 35 – Tensão de linha secundário do transformador com cargas desequilibradas em modo ilhado



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 15 – Tensão de fase para cargas desequilibradas no modo ilhado

Fase	Tensão de Fase Nominal [V]	Tensão de Fase Medida [V]	Tensão de Fase Medida [pu]	Avaliação
MT				
A	7967,434	7966,9721	0,99994203	Adequado
B	7967,434	7966,9721	0,99994203	Adequado
C	7967,434	7966,9721	0,99994203	Adequado
BT				
A	220	219,6344	0,99833818	Adequado
B	220	219,6344	0,99833818	Adequado
C	220	219,5354	0,99788818	Adequado

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 16 – Tensão de linha para cargas desequilibradas no modo ilhado

Linha	Tensão de Linha Nominal [V]	Tensão de Linha Medida [V]	Tensão de Linha Medida [pu]	Avaliação
MT				
AB	13800	13799,1889	0,999941	Adequado
BC	13800	13799,1889	0,999941	Adequado
CA	13800	13799,1889	0,999941	Adequado
BT				
AB	380	380,4659	1,001226	Adequado
BC	380	380,0062	1,000016	Adequado
CA	380	380,7487	1,00197	Adequado

Fonte: Elaborado pela autora.

5.4 Simulação de curto-circuitos na microrrede

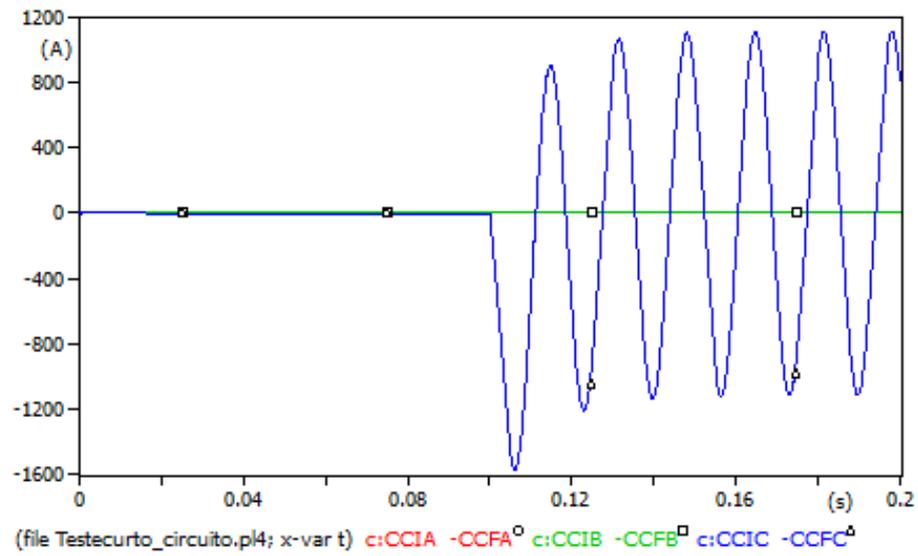
Foram simuladas a ocorrência de curtos-circuitos monofásico na fase C e trifásico próximo ao barramento principal, cuja localização é apresentada na Figura 18. Para verificar a influência das gerações distribuídas nos níveis de curto-circuito, foram simuladas essas situações com as fontes de geração da microrrede, primeiramente, conectadas e, posteriormente, desconectadas. A Tabela 17 apresenta os valores de corrente e tensão de fase nas situações descritas e as Figuras 36 a 43 demonstram o comportamento da tensão e corrente nessas situações.

Tabela 17 – Tensão e corrente de fase de circuitos monofásicos e trifásicos

Curto-Circuito	GD	Tensão de fase barramento principal [V]			Corrente de curto-circuito [A]		
		A (Pico)	B (Pico)	C (Pico)	A	B	C
Monofásico fase C	Com	15416	14331	0	0	0	1114
	Sem	15405	14321	0	0	0	112,4
Trifásico	Com	0	0	0	2284	2285,3	2284,7
	Sem	0	0	0	2283,4	2284,9	2281,9

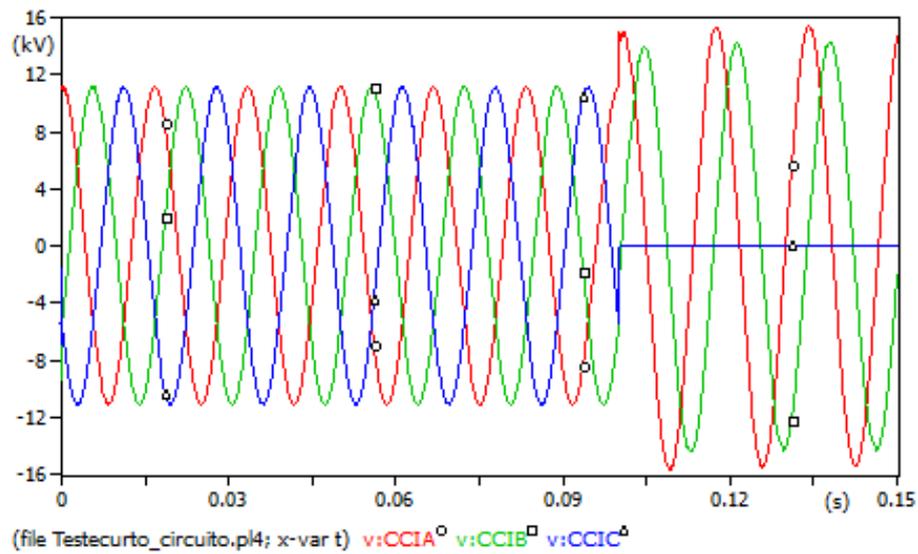
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 36 – Corrente curto-circuito monofásico no barramento principal em rede sem geração



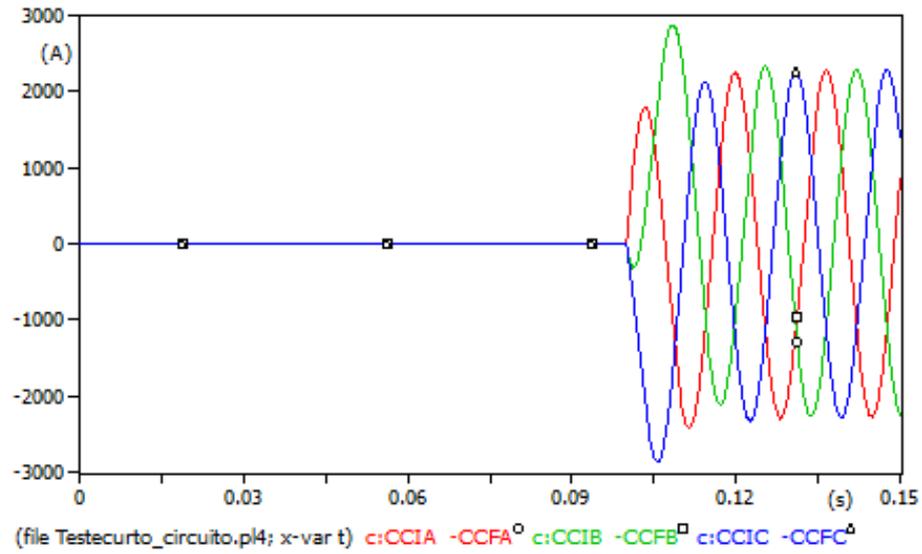
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 37 – Tensão curto-circuito monofásico no barramento principal em rede sem geração



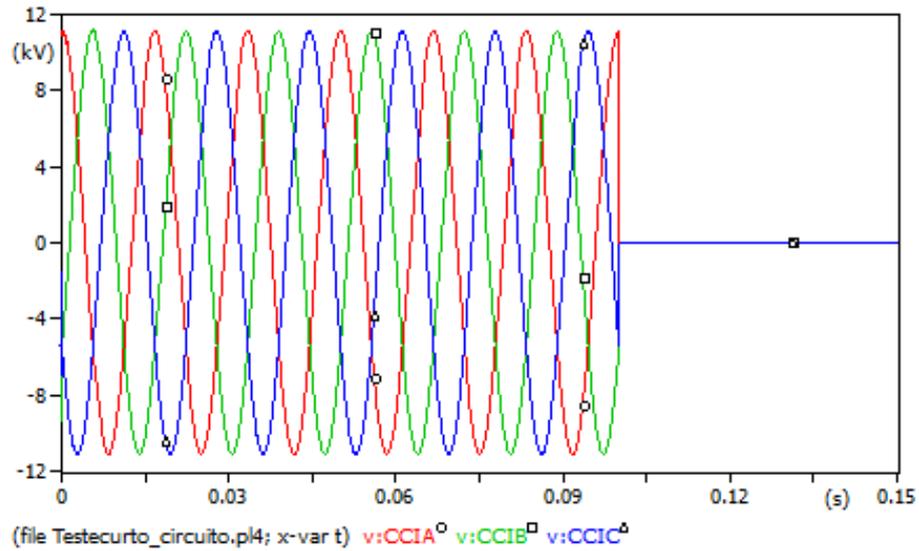
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 38 – Corrente curto-circuito trifásico no barramento principal em rede sem geração



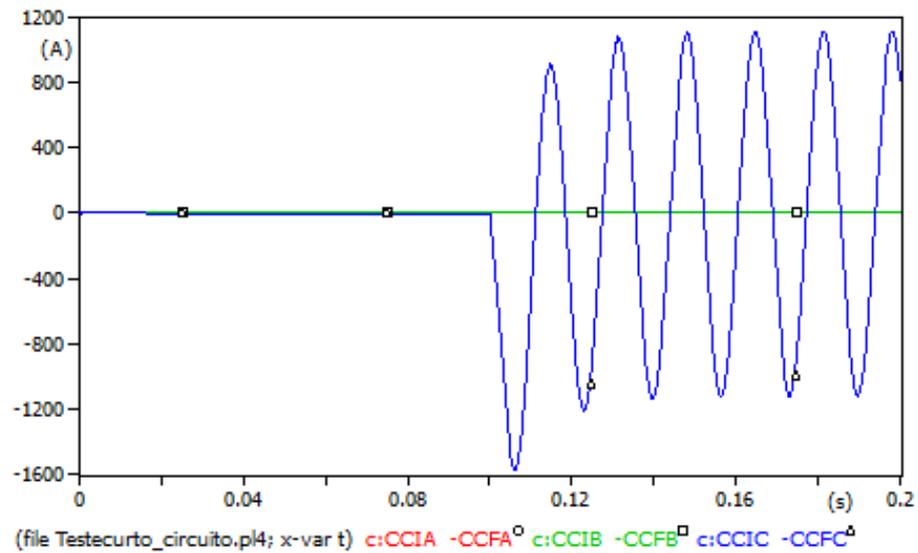
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 39 – Tensão curto-circuito trifásico no barramento principal em rede sem geração



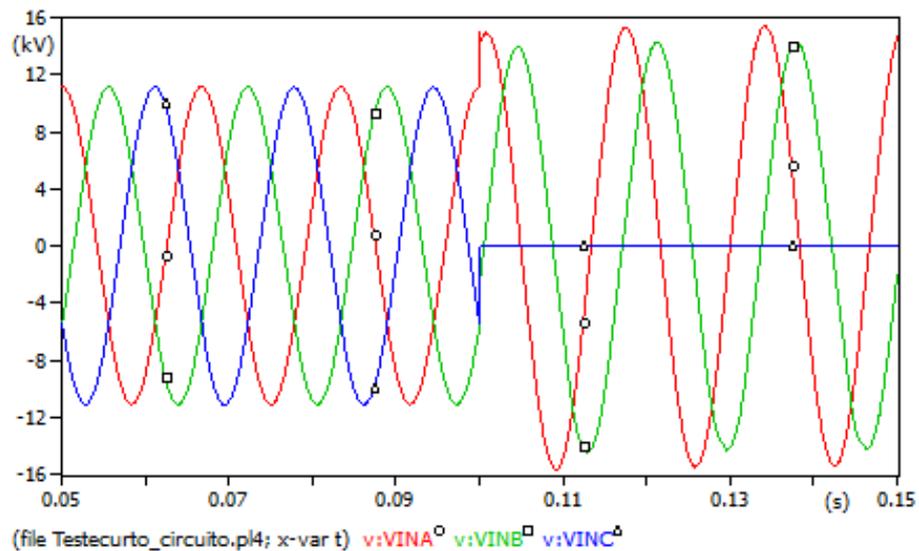
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 40 – Corrente curto-circuito monofásico no barramento principal em rede com geração



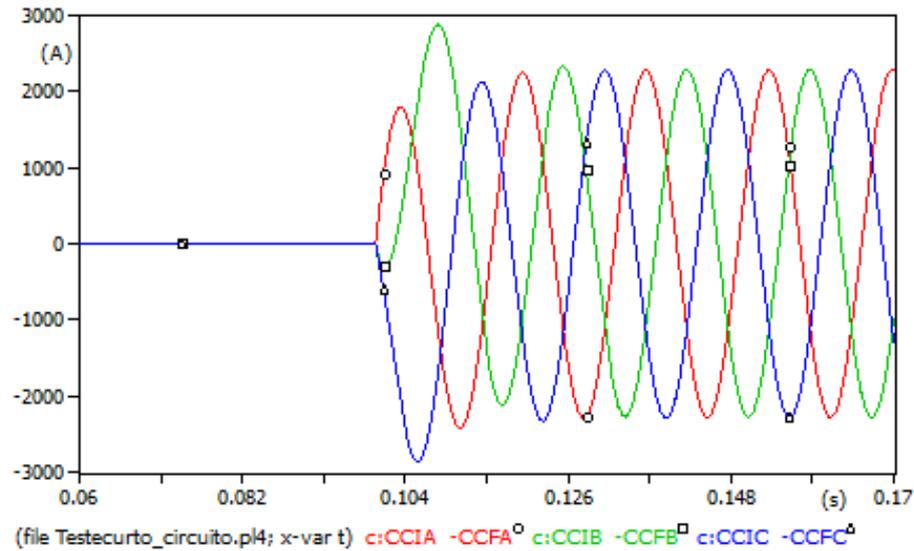
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 41 – Tensão curto-circuito monofásico no barramento principal em rede com geração



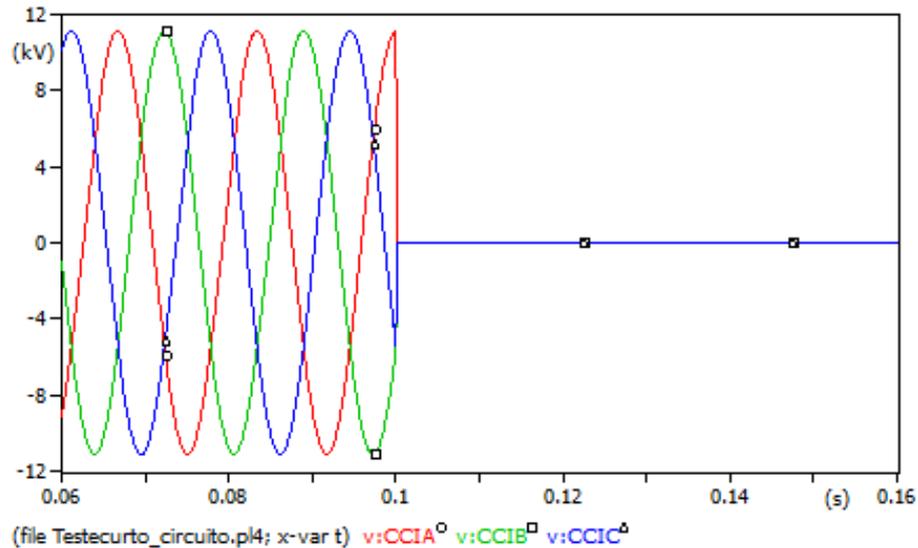
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 42 – Corrente curto-circuito trifásico no barramento principal em rede com geração



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 43 – Tensão curto-circuito trifásico no barramento principal em rede com geração



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados para simulação de curto-circuito monofásico verificados nas Figuras 36 e 37 mostram que não houve grande interferência das gerações integrantes da microrrede nos níveis de corrente de curto-circuito e que houve uma elevação um pouco maior do pico de tensão de fase nas fases A e B na ocorrência de curtos-circuitos monofásicos na fase C com a contribuição dos pontos de geração. Entretanto, de forma geral, por estarem situadas na baixa tensão e serem de pequeno porte, as GD não ocasionaram grandes impactos nos níveis de tensão e corrente na rede de média tensão durante a ocorrência de curtos-circuitos.

6 CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTO FUTURO

6.1 Conclusão

Este trabalho apresentou uma proposta de modelagem e análise da microrrede implantada no condomínio residencial Alphaville. O modelo da microrrede foi desenvolvido para fins de verificação da influência dos recursos de energia distribuídos nos níveis de tensão e no fator de desequilíbrio de tensão na rede de distribuição em situações de carga equilibrada e desequilibrada e de curto-circuito. O trabalho apresentou a modelagem das cargas, das fontes fotovoltaicas, dos alimentadores, dos transformadores e do sistema de armazenamento central que compõe a microrrede. Por fim, foram simuladas as situações descritas e analisados os resultados obtidos.

A modelagem das fontes, cargas, transformadores e alimentadores da microrrede foi feita no software ATPDraw utilizando os seus componentes disponíveis e tomando como base as informações obtidas nos projetos dessas tecnologias integrantes da microrrede na fase de coleta de dados.

Através do modelo construído foi simulada uma situação de cargas equilibradas entre as fases. Posteriormente, foi simulada uma situação de cargas desequilibradas em que a fase A tinha o menor carregamento e a fase C o maior carregamento. Por fim, foi simulada a ocorrência de curto-circuito monofásico na fase C e curto-circuito trifásico no barramento principal da rede de distribuição interna ao condomínio.

As situações simuladas permitiram constatar que microrredes como essa apresentam várias características favoráveis à evolução das redes de distribuição, garantindo maior confiabilidade, continuidade no fornecimento de energia e utilização de fontes de energia renováveis. Essas vantagens não impactaram de forma significativa os níveis de tensão e o fator de desequilíbrio de tensão, que são importantes parâmetros de qualidade, e, que permaneceram dentro dos limites estabelecidos em norma para a microrrede em estudo. Além disso, nas situações simuladas de curto-circuito, a elevação das correntes de curto-circuito foi muito pequena quando comparada à rede sem a influência das gerações distribuídas, vistas serem pequenas, e a diferença na elevação nos níveis de tensão das fases A e B na ocorrência de curto-circuito monofásico na fase C, também foi mínima.

O trabalho possibilitou constatar que as microrredes têm características favoráveis às tendências de evolução das redes de distribuição, mostrando alternativas e avanços em relação

às redes com geração centralizada e às gerações distribuídas de grande porte.

A principal contribuição do trabalho é o desenvolvimento de um modelo inicial da microrrede que pode ser evoluído para a análise da influência da sua operação em outros parâmetros de qualidade e que pode ser aplicado de forma similar no estudo de outras microrredes.

6.2 Trabalhos futuros

Como propostas para desenvolvimento futuro, tem-se:

- a) Desenvolvimento do modelo da microrrede com a modelagem de aerogeradores e de equipamentos importantes como os inversores;
- b) Avaliação da atuação dos equipamentos de proteção;
- c) Análise da influência da microrrede em outros parâmetros de qualidade;
- d) Verificação da influência das tecnologias integrantes da microrrede na diminuição das perdas nos alimentadores.
- e) Modelagem da microrrede em um *software* com a função de análise de fluxo de carga para fins de comparação com o modelo desenvolvido.
- f) Modelagem da microrrede considerando as cargas conectadas ao longo do alimentador até o ponto de conexão com o condomínio;
- g) Desenvolvimento da microrrede com modelos aprimorados de fontes de tensão;
- h) Modelagem das fontes fotovoltaicas considerando a influência de parâmetros importantes como a temperatura e a irradiância.

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. **Electric Power Systems Research**, v. 57, n. 3, p. 195–204, 2001.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 qualidade da energia elétrica**. Brasília-DF, 2017.
- ATPDRAW: THE GRAPHICAL PROCESSOR TO ATP ELECTROMAGNETICS TRANSIENT PROGRAM. 2017. Página oficial: <<https://www.atpdraw.net/>>.
- AWAD E. A.; BADRAN, E. A. Y. F. M. H. A proposed supercapacitor-based mitigation of microgrid switching overvoltage. **Int Trans Electr Energ Syst**, 2017.
- BORGES, P. V. S. **Análise Regulatória e econômica de microrredes elétricas no Brasil**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2016.
- CARNEIRO, A. V. **Projeto, desenvolvimento e implementação de microrrede em campus universitário com tecnologia solar fotovoltaica e de armazenamento**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Ceará - UFC, 2017.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica: Evolução tecnológica nacional no segmento de distribuição de energia elétrica**. Brasília-DF, 2017. v. 5.
- ENEL DISTRIBUIÇÃO CEARÁ. **Critério de Projeto CP-C 001/2017 R-04: Rede de distribuição aérea de média e baixa tensão**. Fortaleza-CE, 2017.
- FARHANGI, H. The path of the smart grid. **IEEE Power & Energy Magazine**, 2010.
- HATZIARGYRIOU, N. **Microgrids: Architectures and Control**. [S. l.]: Wiley-IEEE Press, 2014.
- HUANG, J.; GUPTA, V.; HUANG, Y. Electric grid state estimators for distribution systems with microgrids. In: **Proceedings of the 46th Annual Conference IEEE Information Sciences and Systems (CISS)**. [S. l.]: [s.n.], 2016. p. 16.
- LASSETER, R.; AKHIL, A.; MARNAY, C.; STEPHENS J. AND DAGLE, J.; GUTTROMSON, R.; MELIOPOULOUS, A.; YINGER, R.; ETO, J. **The CERTS microgrid concept**. 2002.
- NISKIER, J.; MACINTYRE, A. J. **Instalações Elétricas**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- QUEZADA, V.; ABBAD, J.; ROMAN, T. Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 2, p. 533–540, 2006.
- SIOHANSI, F. P. **Smart Grid: Integrating Renewable, Distributed and Efficient Energy**. Waltham, MA: Elsevier, 2012.
- STRZELECKI, R. M. **Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks**. Londres: Springer-Verlag London, 2008.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Basic Research Needs for Electrical Energy Storage**. [S. l.], 2007.

VICENTIM, C. A. **Análise Estática de Microrredes: Modelagem de sistemas armazenadores de energia e monitoração em tempo real via estimação de estados**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2015.

ZAMORA, R.; SRIVASTAVA, A. K. Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 14, n. 7, p. 2009–2018, 2010.

ZHANG F.; ZHAO, H. H. M. Operation of networked microgrids in a distribution system. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, v. 1, n. 4, p. 12–21, 2015.

APÊNDICE A – MODELAGEM DAS CARGAS

MODELAGEM DAS CARGAS EQUILBRADAS

MODELAGEM CARGAS EQUILBRADAS						
CÓDIGO DO TRANSFORMADOR	NÚMERO DE CLIENTES	POTÊNCIA DE CARGA (kVA)	POTÊNCIA POR FASE (kVA)	R MODELAGEM ATP	L MODELAGEM ATP	
80L0696	25	56,25	18,75	2,45226667	2,13803731	
TKS2002	1	90	30	1,53266667	1,33627332	
03L0934	41	92,25	30,75	1,49528455	1,30368128	
03L0798	38	85,5	28,5	1,61333333	1,40660349	
80L1204	47	105,75	35,25	1,30439716	1,13725389	
93L1238	30	67,5	22,5	2,06651685	1,80171683	
94L1195	1	60	20	2,299	2,00440997	
93L1096	48	108	36	1,27722222	1,1135611	
80L2000	1	88,421	29,47366667	1,56003664	1,36013615	
80L2037	15	33,75	11,25	4,08711111	3,56339551	
82L0853	30	67,5	22,5	2,04355556	1,78169775	
88L1181	35	78,75	26,25	1,73509434	1,51276224	
88L0744	46	103,5	34,5	1,33275362	1,1619768	

MODELAGEM DAS CARGAS DESEQUILBRADAS

MODELAGEM CARGAS DESEQUILBRADAS									
TOMBAMENTO	POTÊNCIA FASE A	R FASE A	L FASE A	POTÊNCIA FASE B	R FASE B	L FASE B	POTÊNCIA FASE C	R FASE C	L FASE C
80L0696	7,5	6,1307	5,34509	11,25	4,08711	3,5634	15	3,0653	2,67255
TKS2002	12	3,8317	3,34068	18	2,55444	2,2271	24	1,9158	1,67034
03L0934	12,3	3,7382	3,2592	18,45	2,49214	2,1728	24,6	1,8691	1,6296
03L0798	11,4	4,0333	3,51651	17,1	2,68889	2,3443	22,8	2,0167	1,75825
80L1204	14,1	3,261	2,84313	21,15	2,174	1,8954	28,2	1,6305	1,42157
93L1238	9	5,1089	4,45424	13,5	3,40593	2,9695	18	2,5544	2,22712
94L1195	8	5,7475	5,01102	12	3,83167	3,3407	16	2,8738	2,50551
93L1096	14,4	3,1931	2,7839	21,6	2,1287	1,8559	28,8	1,5965	1,39195
80L2000	11,789467	3,9	3,40034	17,6842	2,60006	2,2669	23,57893333	1,95	1,70017
80L2037	4,5	10,218	8,90849	6,75	6,81185	5,939	9	5,1089	4,45424
82L0853	9	5,1089	4,45424	13,5	3,40593	2,9695	18	2,5544	2,22712
88L1181	10,5	4,379	3,81792	15,75	2,91937	2,5453	21	2,1895	1,90896
88L0744	13,8	3,3319	2,90494	20,7	2,29098	1,9974	27,6	1,6659	1,45247

ANEXO A - DADOS DOS EQUIPAMENTOS DA GERAÇÃO RESIDENCIAL

INVERSOR - INGECON SUNLITE 2.5TL

INGECON

SUN

Lite
Transformerless

AN INVERTER FAMILY WITH A WIDE RANGE OF OUTPUTS FROM 2.5 TO 10 KW

2.5TL / 3TL / 3.3TL / 3.68TL / 4.6TL / 5TL / 6TL / 7.5TL / 8.2TL / 8.6TL / 10TL

Single phase transformerless inverters, intended for the residential sector and for larger, decentralised projects.

Wide range of AC power outputs

The INGECON® SUN Lite TL single phase inverters offer an extensive range of power outputs from 2.5 to 10 kW. As a new addition, this range of inverters can now be supplied for 7.5 kW, 8.2 kW, 8.6 kW and 10 kW.

Simple installation and maintenance

Fast-on connectors on the DC side (type 4) and the AC side and RS-485 serial communications. The country-specific configuration and language can be easily selected from the inverter screen.

The INGECON® SUN Lite TL inverters feature an internal datalogger for three months' data storage with control from either a remote PC or on-site from the inverter front keypad through its LCD screen. Status and alarm LED indicators. Fans are easily replaceable by the user. Configurable for self-consumption mode.

Software included

Included at no extra cost are the INGECON® SUN Manager, INGECON® SUN Monitor and its iSun Monitor smartphone version for monitoring and recording the inverter data over the internet.

Standard 5 year warranty, extendable for up to 25 years

PROTECTIONS

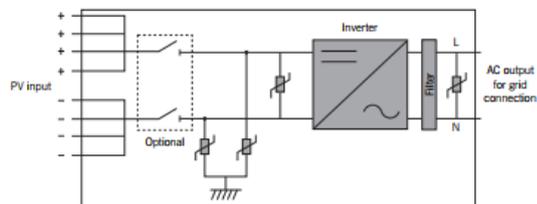
- Reverse polarity.
- Overvoltages at the AC output with type 3 surge arresters.
- Output short circuits and overloads.
- Insulation failures.
- Anti-islanding with automatic disconnection.

OPTIONAL ACCESSORIES

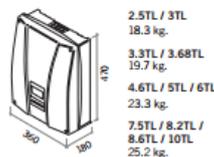
- DC breaker.
- Inter-inverter communication via Bluetooth or Ethernet.
- GSM / GPRS remote communication.
- Potential free contact for insulation fault indication (by default) or inverter connected to the grid (optional).



Lite TL

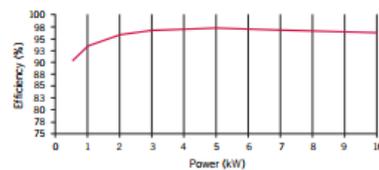


Size and weight (mm)



EFFICIENCY

INGECON®SUN 10TL
V_{dc} = 330 V



www.ingeteam.com
solar.energy@ingeteam.com

Ingeteam

	2.5TL	3TL	3.3TL	3.68TL	4.6TL	5TL
Input (DC)						
Recommended PV array power range ¹⁾	2.8 - 3.3 kWp	3.2 - 4 kWp	3.8 - 4.3 kWp	3.9 - 4.8 kWp	5.2 - 6 kWp	5.7 - 6.5 kWp
Voltage range MPP	100 - 450 V					
Minimum voltage for rated	160 V	195 V	155 V	175 V	145 V	160 V
Maximum voltage ²⁾	550 V					
Maximum current	17 A	17 A	22 A	22 A	33 A	33 A
Inputs	3	3	3	3	4	4
MPPT	1	1	1	1	1	1
Output (AC)						
Rated power ³⁾	2.7 kW	3 kW	3.63 kW	3.68 kW	5 kW	5.5 kW
Maximum current	13 A	13.5 A	17 A	17 A	24.2 A	26.2 A
Rated voltage	230 / 240 V					
Frequency	50 / 60 Hz					
Phi Cosine	1	1	1	1	1	1
Phi Cosine adjustable	Yes. Smax=2.7 kVA	Yes. Smax=3 kVA	Yes. Smax=3.63 kVA	Yes. Smax=3.68 kVA	Yes. Smax=5 kVA	Yes. Smax=5.5 kVA
THD	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%
Efficiency						
Maximum efficiency	96.6%	96.6%	96.8%	96.8%	97%	97%
Euroefficiency	95%	95.1%	95.2%	95.2%	96%	96.1%
General Information						
Air cooling	30 m ³ /h	30 m ³ /h	45 m ³ /h	45 m ³ /h	90 m ³ /h	90 m ³ /h
Stand-by consumption ⁴⁾	<10 W					
Consumption at night	0 W	0 W	0 W	0 W	0 W	0 W
Ambient temperature	-20°C to +70°C					
Relative humidity (non-condensing)	0 - 100%	0 - 100%	0 - 100%	0 - 100%	0 - 100%	0 - 100%
Protection class	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65

	6TL	7.5TL	8.2TL	8.6TL	10TL
Input (DC)					
Recommended PV array power range ¹⁾	6.3 - 7 kWp	8.7 - 10.3 kWp	9.5 - 11.2 kWp	10 - 11.8 kWp	11.6 - 13.7 kWp
Voltage range MPP	100 - 450 V	100 - 450 V	100 - 450 V	100 - 450 V	100 - 450 V
Minimum voltage for Pnom	190 V	215 V	235 V	245 V	300 V
Maximum voltage ²⁾	550 V	550 V	550 V	550 V	550 V
Maximum current	33 A	35 A	35 A	35 A	35 A
Inputs	4	4	4	4	4
MPPT	1	1	1	1	1
Output (AC)					
Rated power ³⁾	6 kW	7.5 kW	8.2 kW	8.6 kW	10 kW
Maximum current	26.2 A	36.1 A	36.1 A	36.1 A	36.1 A
Rated voltage	230 / 240 V	208 / 230 / 240 / 277 V ⁴⁾	230 / 240 / 277 V ⁴⁾	240 / 277 V ⁴⁾	277 V
Frequency	50 / 60 Hz	50 / 60 Hz	50 / 60 Hz	50 / 60 Hz	50 / 60 Hz
Phi Cosine	1	1	1	1	1
Phi Cosine adjustable	Yes. Smax=6 kVA	Yes. Smax=7.5 kVA	Yes. Smax=8.2 kVA	Yes. Smax=8.6 kVA	Yes. Smax=10 kVA
THD	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%
Efficiency					
Maximum efficiency	97%	97.5%	97.6%	97.7%	98%
Euroefficiency	96.1%	96.5%	96.6%	96.6%	96.8%
General Information					
Air cooling	90 m ³ /h	90 m ³ /h	90 m ³ /h	90 m ³ /h	90 m ³ /h
Stand-by consumption ⁴⁾	<10 W	<10 W	<10 W	<10 W	<10 W
Consumption at night	0 W	0 W	0 W	0 W	0 W
Ambient temperature	-20°C to +70°C	-20°C to +70°C	-20°C to +70°C	-20°C to +70°C	-20°C to +70°C
Relative humidity (non-condensing)	0 - 100%	0 - 100%	0 - 100%	0 - 100%	0 - 100%
Protection class	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65

Notes: ¹⁾ Depending on the type of installation and geographical location. ²⁾ Must not be exceeded under any circumstances. Consider the voltage increase of the "Voc" at low temperatures. ³⁾ AC Power for 45°C ambient temperature. ⁴⁾ Voltage configurable through the display. ⁵⁾ Consumption from PV field.
 Compliance with standards: CE, EN 61000-6-1, EN 61000-6-2, EN 61000-6-3, EN 61000-6-4, EN 61000-3-2, EN 61000-3-3, EN 61000-3-11, EN 61000-3-12, EN 62109-1, EN 62109-2, IEC62103, EN 50178, FCC Part 15, AS 3100, RD1699/2011, DIN V VDE V 0126-1-1, EN 50438, CEI 0-21, VDE-AR-N 4105:2011-08, G59/2, PG.12.3, AS4777.2, AS4777.3, IEC 62116, IEC 61727, UNE 206007-1, ABNT NBR 16149, ABNT NBR 16150, South African Grid code (ver2.6), Chilean Grid Code, Romanian Grid Code, Ecuadorian Grid Code, Peruvian Grid code, IEEE 929, Thailand MEA & PEA requirements.

PLACAS - YL255P-29b

DC Electrical Characteristics	
STC Power Rating	255W
PTC Power Rating	230.9W ¹
STC Power per unit of area	156.1W/m ² (14.5W/ft ²)
Peak Efficiency	15.61%
Power Tolerances	0%/+2%
Number of Cells	60
Nominal Voltage	not applicable
I _{mp}	8.32A
V _{mp}	30.6V
I _{sc}	8.88A
V _{oc}	38.7V
NOCT	46°C
Temp. Coefficient of I _{sc}	0.06%/K
Temp. Coefficient of Power	-0.45%/K
Temp. Coefficient of Voltage	-0,128V/K
Series Fuse Rating	15A
Maximum System Voltage	600V

**ANEXO B – POTÊNCIA INSTALADA POR UC E TABELAS PARA CÁLCULO DE
DEMANDA**

CARGA INSTALADA POR UNIDADE CONSUMIDORA

Aparelhos Elétricos	Quant. (un.)	Potência Média (W)	Potência Total (W)
AMPLIFICADOR DE SOM	2	50	100
ARCONDICIONADO 10000 BTUS	2	850	1700
ARCONDICIONADO 12000 BTUS	2	1050	2100
ARCONDICIONADO 18000 BTUS	1	1650	1650
ASPIRADOR DE PÓ RESIDENCIAL	1	750	750
BATEDEIRA DE BOLO	1	100	100
BOMBA D'ÁGUA 1/2 CV	1	368	368
BOMBA D'ÁGUA 3/4 CV	1	550	550
EXAUSTOR PARA FOGAO	1	100	100
FERRO ELÉTRICO	1	1000	1000
FOGÃO COMUM COM ACENDEDOR	1	90	90
FORNO ELÉTRICO	1	100	100
FORNO DE MICRO ONDAS	1	1000	1000
FREEZER VERTICAL 280L	1	150	150
FRIGOBAR	1	2500	2500
GELADEIRA	1	150	150
GRILL	1	100	100
IMPRESSORA COMUM	1	90	90
IMPRESSORA LASER	1	550	550
LÂMPADA FLUORESCENTE	5	100	500
LÂMPADA COMPACTA	3	60	180
LÂMPADA FLUORESCENTE	11	23	253
LÂMPADA FLUORESCENTE	8	15	120
LÂMPADA FLUORESCENTE	13	11	143
LIQUIDIFICADOR	1	200	200
MAQ LAVAR PRATOS	1	1200	1200
MAQ LAVAR ROUPAS	1	1000	1000
MICRO COMPUTADOR	1	250	250
MULTI CORTE	1	180	180
NEBULIZADOR	1	30	30
RADIO RELOGIO DIGITAL	1	40	40
RADIO TRANSISTORIZADO	1	30	30
SECADOR DE CABELOS PEQUENO	1	450	450
TELEVISOR 12 A 20 POLEGADAS	2	100	200
TELEVISOR ACIMA 30 POLEGADAS	4	200	800
VENTILADOR PEQUENO 20 CM	4	40	160
TOTAL			18,884

**FATOR DE DEMANDA APARELHOS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA
(NISKIER, 2008)**

Número de Aparelhos	Fator de Demanda	Número de Aparelhos	Fator de Demanda	Número de Aparelhos	Fator de Demanda
1	100	10	49	19	36
2	75	11	47	20	35
3	70	12	45	21	34
4	66	13	43	22	33
5	62	14	41	23	32
6	59	15	40	24	31
7	56	16	39	25 ou mais	30
8	53	17	38		
9	51	18	37		

**FATOR DE DEMANDA PARA CONDICIONADORES DE AR TIPO JANELA
INSTALADOS EM RESIDÊNCIAS (NISKIER, 2008)**

N.º de Aparelhos	Fator de Demanda (%)
1 a 4	100
5 a 10	70
11 a 20	65
21 a 30	62
31 a 40	58
41 a 50	55
51 a 80	53
Acima de 80	50

CARGA MÍNIMA E FATOR DE DEMANDA PARA ILUMINAÇÃO E TOMADAS DE USO GERAL (NISKIER, 2008)

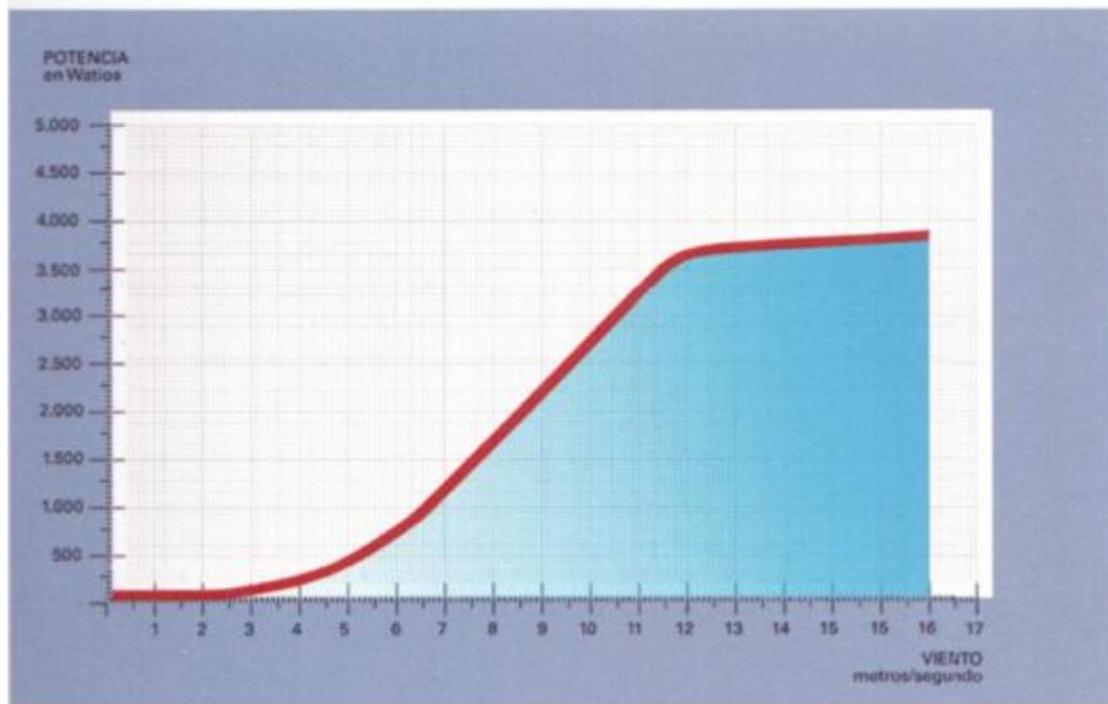
Descrição	Carga Mínima (W/m ²)	Fator de Demanda %	
Auditórios, salões para exposições, salas de vídeo e semelhantes	15	80	
Bancos, postos de serviços públicos e semelhantes	50	80	
Barbearias, salões de beleza e semelhantes	20	80	
Clubes e semelhantes	20	80	
Escolas e semelhantes	30	80 para os primeiros 12 kW 60 p/ o que exceder de 20 kW	
Escritórios	50	80 para os primeiros 20 kW 60 p/ o que exceder de 20 kW	
Garagens, áreas de serviço e semelhantes	5	80	
Hospitais, centros de saúde e semelhantes	20	40 para os primeiros 50 kW 20 p/ o que exceder de 50 kW	
Hotéis, motéis e semelhantes	20	50 para os primeiros 20 kW 40 para os seguintes 80 kW 30 p/ o que exceder de 100 kW	
Igrejas, salões religiosos e semelhantes	15	80	
Lojas e semelhantes	20	80	
Unidades consumidoras residenciais (casas, apartamentos etc.)	30	$0 < P(\text{kW}) \leq 1$ (80) $1 < P(\text{kW}) \leq 2$ (75) $2 < P(\text{kW}) \leq 3$ (65) $3 < P(\text{kW}) \leq 4$ (60) $4 < P(\text{kW}) \leq 5$ (50) $5 < P(\text{kW}) \leq 6$ (45)	$6 < P(\text{kW}) \leq 7$ (40) $7 < P(\text{kW}) \leq 8$ (35) $8 < P(\text{kW}) \leq 9$ (30) $9 < P(\text{kW}) \leq 10$ (27) $10 < P(\text{kW})$ (24)
Restaurantes, bares, lanchonetes e semelhantes	20	80	

ANEXO C – DADOS DOS EQUIPAMENTOS DA GERAÇÃO DO CLUBE

AEROGERADOR UTILIZADO – Enair 3.5

Aplicações	Conexões isoladas e baterias Conexões à rede elétrica
Número de hélices	3
Material das hélices	Fibra de vidro com resina epóxi
Tensão de saída	24V, 48V, 220V e 380V
Vento mínimo de partida	2,5m/s
Velocidade nominal	12m/s
Velocidade de regulação do passo variável	14m/s
Tipo	Rotor horizontal a barlavento
Orientação	Sistema passivo de timão de orientação
Controle de potência	Sistema de passo variável passivo, centrífugo e amortecido
Transmissão	Direta
Freio	Elétrico
Controlador	Opção de conexão à rede e carga de baterias
Inversor	Eficiência 95%; algoritmo MPPT
Ruído	Reduzido ao mínimo: devido ao desenho das pás e às baixas rotações de trabalho
Proteção anti-corrosão	Desenho totalmente selado, com pintura por cataforese nas partes metálicas, e cobertura resistente a UV
Torre	12m, 15m e 18 m, rebatível, estaiada ou de treliça
Máxima velocidade de vento suportada, com funcionamento ótimo: 165 km/hora	

ENAIR 3.5 3500 W



INVERSOR UTILIZADO COM O AEROGERADOR - Sunny Tripower 5000 TL

Technical data	Sunny Tripower 5000TL
Input (DC)	
Max. DC power (@ $\cos \phi = 1$)	5100 W
Max. input voltage	1000 V
MPP voltage range / rated input voltage	245 V ... 800 V / 580 V
Min. input voltage / initial input voltage	150 V / 188 V
Max. input current input A / input B	11 A / 10 A
Max. input current per string input A / input B	11 A / 10 A
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input	2 / A:2; B:2
Output (AC)	
Rated power (@ 230 V, 50 Hz)	5000 W
Max. apparent AC power	5000 VA
AC nominal voltage	3 / N / PE; 220 / 380 V 3 / N / PE; 230 / 400 V 3 / N / PE; 240 / 415 V
Nominal AC voltage range	160 V - 280 V
AC power frequency / range	50 Hz, 60 Hz / -5 Hz ... +5 Hz
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V
Max. output current	7.3 A
Power factor at rated power	1
Adjustable displacement power factor	0.8 overexcited ... 0.8 underexcited
Feed-in phases / connection phases	3 / 3
Efficiency	
Max. efficiency / European Efficiency	98% / 97.1%
Protective devices	
DC disconnect device	●
Ground fault monitoring / grid monitoring	● / ●
DC reverse polarity protection / AC short-circuit current capability / galvanically isolated	● / ● / -
All-pole-sensitive residual-current monitoring unit	●
Protection class (according to IEC 62103) / overvoltage category (according to IEC 60664-1)	I / III
General data	
Dimensions (W/H/D)	470 / 730 / 240 mm (18.5 / 28.7 / 9.5 inches)
Weight	37 kg (81.6 lb)
Operating temperature range	-25 °C...+60 °C (-13 °F...+140 °F)
Noise emission (typical)	40 dB(A)
Self-consumption (night)	1 W
Topology / cooling concept	Transformerless / OptiCool
Degree of protection (according to IEC 60529)	IP65
Climatic category (according to IEC 60721-3-4)	4K4H
Maximum permissible value for relative humidity (non-condensing)	100%

PLACA FOTOVOLTAICA - JKM265P-60

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM245P		JKM250P		JKM255P		JKM260P		JKM265P	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	245Wp	181Wp	250Wp	184Wp	255Wp	189 Wp	260Wp	193Wp	265Wp	197Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	30.1V	27.8V	30.5V	28.0V	30.8V	28.5V	31.1V	28.7V	31.4V	29.0V
Maximum Power Current (Imp)	8.14A	6.50A	8.20A	6.56A	8.28A	6.63A	8.37A	6.71A	8.44A	6.78A
Open-circuit Voltage (Voc)	37.5V	34.8V	37.7V	34.9V	38.0V	35.2V	38.1V	35.2V	38.6V	35.3V
Short-circuit Current (Isc)	8.76A	7.16A	8.85A	7.21A	8.92A	7.26A	8.98A	7.31A	9.03A	7.36A
Module Efficiency STC (%)	14.97%		15.27%		15.58%		15.89%		16.19%	
Operating Temperature(°C)	-40°C--+85°C									
Maximum system voltage	1000VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	15A									
Power tolerance	0--+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.41%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.31%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.06%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

INVERSOR (FOTOVOLTAICO)

/ Perfect Welding / Solar Energy / Perfect Charging



SHIFTING THE LIMITS

FRONIUS IG PLUS

/ The allrounder with maximum yield.



/ Fronius MIX[™] technology



/ HF transformer switchover



/ WLAN interface



/ Smart Grid Ready



/ The Fronius IG Plus generation of inverters represents an evolution of the proven Fronius IG product family. Power categories from 3.5 to 12 kW promise suitability for every possible system size. With a maximum efficiency of 95.9 %, the Fronius IG Plus range achieves one of the highest values for transformer inverters.

TECHNICAL DATA FRONIUS IG PLUS (35 V-1, 50 V-1, 55 V-1, 60 V-1, 55 V-2)

INPUT DATA	35 V-1	50 V-1	55 V-1	60 V-1	55 V-2
DC maximum power at $\cos \phi = 1$	3,710 W	4,260 W	5,260 W	6,320 W	5,260 W
Max. input current ($I_{dc,max}$)	16.2 A	18.6 A	22.9 A	27.5 A	22.9 A
Max. array short circuit current	24.3 A	27.9 A	34.4 A	41.3 A	34.4 A
Min. input voltage ($U_{dc,min}$)			230 V		
Feed-in start voltage ($U_{dc,start}$)			260 V		
Nominal input voltage ($U_{dc,r}$)			370 V		
Max. input voltage ($U_{dc,max}$)			600 V		
MPP voltage range ($U_{mpp,min} - U_{mpp,max}$)			230 - 500 V		
Number of DC inputs			6		
OUTPUT DATA	35 V-1	50 V-1	55 V-1	60 V-1	55 V-2
AC nominal output ($P_{ac,r}$)	3,500 W	4,000 W	5,000 W	6,000 W	5,000 W
Max. output power	3,500 VA	4,000 VA	5,000 VA	6,000 VA	5,000 VA
Max. output current ($I_{ac,max}$)	15.2 A	17.4 A	21.7 A	26.1 A	10.9 A
Grid connection ($U_{gr,r}$)			1-NPE 230 V		2-NPE 400 V / 230 V
Min. output voltage ($U_{ac,min}$)			180 V		
Max. output voltage ($U_{ac,max}$)			270 V		
Frequency (f_r)			50 Hz / 60 Hz		
Frequency range ($f_{min} - f_{max}$)			46 - 65 Hz		
Distortion factor			< 3 %		
Power factor ($\cos \phi_{ac,r}$)			0.75 - 1 ind. / cap.*		
GENERAL DATA	35 V-1	50 V-1	55 V-1	60 V-1	55 V-2
Dimensions (height x width x depth)	673 x 434 x 250 mm		968 x 434 x 250 mm		
Weight	23.8 kg		36.9 kg		
Degree of protection			IP 54 [‡]		
Protection class			1		
Overvoltage category (DC / AC)			2 / 3		
Night-time consumption			ca. 1 W		
Inverter concept			HF transformer		
Cooling			Regulated air cooling		
Installation			Indoor and outdoor installation		
Ambient temperature range			from -20°C to +55°C		
Permitted humidity			0 % to 95 %		
DC connection technology			Screw terminal connection 1.5 mm ² - 16 mm ²		
AC connection technology			Screw terminal connection 2.5 mm ² - 35 mm ²		
Certificates and compliance with standards	DIN V VDE V 0126-1-1, ÖVE / ONORM E 8001-4-712, UTE C15-712-1, EN 50438, G83, G59, C10 / 11, CER 06-190, CEI 0-21, AS 4777-1, AS 4777-2, AS 4777-3, VDE AR N 4105, Generating systems on the medium-voltage network (BDEW)				

Fronius IG Plus 55 V-1, Fronius IG Plus 55 V-2 and Fronius IG Plus 60 V-1 devices do not comply with the German medium-voltage directive. Fronius IG Plus 55 V-1 and Fronius IG Plus 60 V-1 are not certified in accordance with the German low-voltage directive. Further information regarding the availability of the inverters in your country can be found at www.fronius.com.
[‡]country-specific ^{*}Please refer to the information in the operating instructions regarding correct installation of the inverter (e.g. IP 44 applies to Australia).

**ANEXO D – FOLHAS DE DADOS DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIAS DE 45
KVA, 75 KVA E 150 KVA**

	FOLHA DE DADOS	Data : 10 / jun / 2018
Linha de Produto: Transformadores de Distribuição		
Características		
<p> Potência: 45 kVA Norma de Fabricação: NBR 5440 Refrigeração: ONAN - Óleo Natural, Ar Natural - Imerso em óleo isolante mineral Classe de Tensão (kV): 15 kV Tensão Primária: 13,8/13,2/12,6 kV Tensão Secundária: 380/220 V </p> <p> Primário: Triângulo (delta) Secundário: Estrela com neutro acessível Deslocamento Angular: 30° </p>	<p> Frequência nominal: 60 Hz Elevação de Temperatura: 65° C no ponto médio dos enrolamentos 60° C no topo do óleo Pintura externa anticorrosiva com acabamento na cor cinza claro Munsell N6.5 Perdas em vazio (perdas no ferro): 195 W Perdas totais: 945 W Corrente de excitação: 3,2 % Impedância a 75° C: 3,5 % Comprimento (C) : Consultar Vendas T&D Largura (L) : Consultar Vendas T&D Altura (A) : Consultar Vendas T&D Peso: Consultar Vendas T&D </p> <p> Valores garantidos potência nominal no tap de maior tensão </p>	



FOLHA DE DADOS

Data : 9 / jun / 2018

Linha de Produto: **Transformadores de Distribuição**

Características

Potência: **75 kVA**
 Norma de Fabricação: **NBR 5440**
 Refrigeração: **ONAN - Óleo Natural, Ar Natural - Imerso em óleo isolante mineral**
 Classe de Tensão (kV): **15 kV**
 Tensão Primária: **13,8/13,2/12,6 kV**
 Tensão Secundária: **380/220 V**

Primário: **Triângulo (delta)**
 Secundário: **Estrela com neutro acessível**
 Deslocamento Angular: **30°**

Frequência nominal: **60 Hz**
 Elevação de Temperatura:
65° C no ponto médio dos enrolamentos
60° C no topo do óleo
Pintura externa anticorrosiva com acabamento na cor cinza claro Munsell N6.5
 Perdas em vazio (perdas no ferro): **295 W**
 Perdas totais: **1395 W**
 Corrente de excitação: **2,7 %**
 Impedância a 75° C: **3,5 %**
 Comprimento (C) : **Consultar Vendas T&D**
 Largura (L) : **Consultar Vendas T&D**
 Altura (A) : **Consultar Vendas T&D**
 Peso: **Consultar Vendas T&D**

Valores garantidos potência nominal no tap de maior tensão

	FOLHA DE DADOS	Data : 10 / jun / 2018
Linha de Produto: Transformadores de Distribuição		
Características		
<p> Potência: 150 kVA Norma de Fabricação: NBR 5440 Refrigeração: ONAN - Óleo Natural, Ar Natural - Imerso em óleo isolante mineral Classe de Tensão (kV): 15 kV Tensão Primária: 13,8/13,2/12,6 kV Tensão Secundária: 380/220 V </p> <p> Primário: Triângulo (delta) Secundário: Estrela com neutro acessível Deslocamento Angular: 30° </p>	<p> Frequência nominal: 60 Hz Elevação de Temperatura: 65° C no ponto médio dos enrolamentos 60° C no topo do óleo Pintura externa anticorrosiva com acabamento na cor cinza claro Munsell N6.5 Perdas em vazio (perdas no ferro): 485 W Perdas totais: 2335 W Corrente de excitação: 2,3 % Impedância a 75° C: 4,0 % Comprimento (C) : Consultar Vendas T&D Largura (L) : Consultar Vendas T&D Altura (A) : Consultar Vendas T&D Peso: Consultar Vendas T&D </p> <p> Valores garantidos potência nominal no tap de maior tensão </p>	