

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNA VENTURA HOFFMANN

ANÁLISE DA INSERÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM  
CONSUMIDORES RESIDENCIAIS, CIRCUITO SECUNDÁRIO BT E  
ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO MT

CURITIBA

2018

BRUNA VENTURA HOFFMANN

ANÁLISE DA INSERÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM  
CONSUMIDORES RESIDENCIAIS, CIRCUITO SECUNDÁRIO BT E  
ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO MT

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Eletrotécnica, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Mateus Duarte  
Teixeira

Coorientador: MSc. Pedro Augustho  
Biasuz Block

CURITIBA

2018

## TERMO DE APROVAÇÃO

BRUNA VENTURA HOFFMANN

ANÁLISE DA INSERÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM  
CONSUMIDORES RESIDENCIAIS, CIRCUITO SECUNDÁRIO BT E  
ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO MT

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro eletricista no Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Mateus Duarte Teixeira  
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. M.Sc. Ademar Luiz Pastro  
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. Dr. Gustavo Oliveira  
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba, 16 de Junho de 2018.

"Ser derrotado é frequentemente somente uma condição temporária. Desistir é o que a torna permanente." - Marilyn vos Savant

## **AGRADECIMENTOS**

Dedico este trabalho aos meus pais, Adriane e Bertholdo, que sempre se empenharam arduamente em prol da minha educação e formação como pessoa, e estiveram ao meu lado nos momentos das conquistas, mas também nas horas difíceis. A vocês, minha eterna gratidão.

Agradeço a Deus por iluminar meus pensamentos me mostrando o melhor caminho a ser seguido.

Agradeço ao meu irmão Lucas pelo companheirismo nas horas de lazer e pela paciência nos momentos em que estive ausente.

Agradeço ao Prof. Mateus Duarte Teixeira por me orientar de maneira tão sábia, com conselhos e ensinamentos que levarei para toda a vida.

Agradeço também ao Pedro Augustho Biasuz Block pela coorientação no presente trabalho, pelo conhecimento passado e pela confiança.

Agradeço aos colegas do Lactec pela paciência, pelo incentivo e pela confiança depositada em mim, e por tornarem o ambiente de trabalho muito agradável e produtivo.

Meus agradecimentos ao meu namorado Roni Lisecki por compreender minha ausência durante os momentos dedicados aos estudos e por me incentivar a seguir os meus sonhos.

Meus agradecimentos também aos meus amigos que me proporcionaram momentos de lazer inesquecíveis ao longo desses anos, além dos conhecimentos compartilhados que foram essenciais para a minha formação.

Por fim agradeço a todos os mestres que realmente contribuíram para a minha formação acadêmica com sabedoria e dedicação.

## RESUMO

Tendo em vista o crescente desenvolvimento e o aumento da utilização de sistemas de armazenamento de energia (SAE), a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) lançou a Chamada 21, Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro. Este trabalho, fazendo parte de um projeto de P&D vinculado à chamada, tem como objetivo modelar três sistemas elétricos de distribuição (consumidor residencial, secundário de um transformador de distribuição e alimentador de subestação) onde serão inseridos SAEs com baterias, bem como os próprios equipamentos para analisar o impacto que causam na rede elétrica. O desenvolvimento desses modelos é realizado através da ferramenta computacional DIgSILENT *PowerFactory*. Foram utilizados dois modelos de bateria genéricos para que fosse possível realizar uma análise nos casos em que a bateria funciona no modo de operação de *peak-shaving*, e para regulação da tensão em eventos de afundamento de tensão. Então realizaram-se simulações de fluxo de potência, curto-circuito, quase-dinâmicas, transitórios e proteção, obtendo-se resultados que demonstram a forma como uma bateria pode impactar eletricamente no sistema elétrico onde é inserida. A análise quase-dinâmica mostrou ser eficiente para realizar a estratégia de corte do pico da carga que foi proposta inicialmente, enquanto a dinâmica não atingiu o resultado que se esperava obter, por conta da tecnologia de armazenamento de energia utilizada. Com isso, são propostas algumas alternativas para conseguir atingir o objetivo inicial da análise dinâmica, além de novas análises modificando alguns aspectos dos modelos de bateria utilizados em um primeiro momento.

Palavras-chave: Sistema de Armazenamento de Energia com Bateria. Rede elétrica de distribuição. DIgSILENT *PowerFactory*.

## ABSTRACT

In view of the development and the crescent use of energy storage systems (ESS), ANEEL (National Agency of Electric power) threw the Call 21, Technical and Commercial Arrangements for the Insertion of Energy Storage Systems in the Brazilian Electric Power Sector. This undergraduate thesis, making part of one of the R&D call projects, intends to model three power distribution systems where a BESS (Battery Energy Storage System) technology will be inserted (a residential consumer, secondary winding of a distribution transformer and a substation feeder), as well as the own equipment to analyze the impact that it causes in the network. The development of those models is accomplished through the computational tool DIgSILENT PowerFactory. Two generic battery models are used to make it possible to accomplish an analysis in the cases that the battery works for a peak-shaving operation, and for regulation of the tension during sags events. Then simulations of load flow, short-circuit, quasi-dynamics, transitory and protection took place, reaching results that demonstrate the way as a battery can electrically impact in the electric system where is inserted. The quasi-dynamics analysis showed to be efficient to accomplish the strategy of peak-shaving that was proposed initially, while the dynamic analysis didn't reach the result that was hoped to obtain, due to the energy storage technology used. Consequently, some alternatives are proposed to reach the initial objective of the dynamic analysis, besides new analyses modifying some aspects of the battery models used in a first moment.

Key words: Battery Energy Storage System. Power distribution system. DIgSILENT *PowerFactory*.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Quantidade de Instalações de projetos globais ao longo dos anos.....	13
FIGURA 2 - Distribuição de Projetos de Armazenamento de Energia diferenciados pelo tipo de tecnologia no mundo.....	14
FIGURA 3 - Esquemático simplificado de uma subestação .....	18
FIGURA 4 - Estrutura básica de um Sistema de Armazenamento de Energia .....	20
FIGURA 5 - Esquema demonstrativo do funcionamento da bateria de Fluxo reverso de Vanádio .....	23
FIGURA 6 - Tecnologias de Armazenamento Eletroquímica <i>versus</i> Projetos em operação para Pequeno Porte .....	25
FIGURA 7 - Tecnologias de Armazenamento Eletroquímicas <i>versus</i> Projetos em operação para Médio Porte .....	26
FIGURA 8 - Tecnologias de Armazenamento Eletroquímicas <i>versus</i> Projetos em operação para Grande Porte.....	28
FIGURA 9 - Ilustração do Método de Cálculo de Curto-Circuito IEC 60909/VDE 0102 .....	36
FIGURA 10 - Gráfico das funções de tempo da corrente de curto-circuito para cada uma das fontes.....	37
FIGURA 11 - Exemplo do fluxo de potência de dois geradores e um sistema fotovoltaico durante uma semana utilizando a simulação quase-dinâmica .....	39
FIGURA 12 - Esquemático mostrando a integração do <i>QDSL models</i> em um projeto do <i>PowerFactory</i> .....	40
FIGURA 13 - <i>QDSL models</i> : Procedimentos de simulação.....	41
FIGURA 14 - Esquemático mostrando os principais elementos que compõem a modelagem de um sistema para simulações dinâmicas .....	42
FIGURA 15 - Circuito equivalente da bateria como fonte de tensão CC .....	44
FIGURA 16 - Estrutura do sistema de armazenamento de energia com bateria como fonte de tensão CC utilizando um VSC .....	45
FIGURA 17 - Esquema de medição das características de consumo da residência.47	
FIGURA 18 - Curva característica da potência ativa na residência durante os dias úteis do período especificado .....	48
FIGURA 19 - Curva característica da potência ativa na residência durante os sábados do período especificado .....	48

FIGURA 20 - Curva característica da potência ativa na residência durante os domingos do período especificado.....	49
FIGURA 21 - Esquema de medição das características de consumo do condomínio .....	50
FIGURA 22 - Curva característica da potência ativa para o Condomínio Ipê durante os dias úteis do período especificado .....	51
FIGURA 23 - Curva característica da potência ativa para o Condomínio Ipê durante os sábados do período especificado.....	51
FIGURA 24 - Curva característica da potência ativa para o Condomínio Ipê durante os domingos e feriados do período especificado .....	52
FIGURA 25 - Esquema de medição das características da carga do alimentador BGE09.....	53
FIGURA 26 - Curva característica da potência ativa para o alimentador BGE09 durante os dias úteis do período especificado .....	54
FIGURA 27 - Curva característica da potência ativa para o alimentador BGE09 durante os sábados do período especificado .....	54
FIGURA 28 - Curva característica da potência ativa para o alimentador BGE09 durante os domingos e feriados do período especificado .....	55
FIGURA 29 - Sistema Elétrico de Pequeno Porte modelado no <i>software PowerFactory</i> .....	56
FIGURA 30 - Sistema Elétrico de Médio Porte modelado no <i>software PowerFactory</i> .....	57
FIGURA 31 - Sistema Elétrico de Grande Porte modelado no <i>software PowerFactory</i> .....	57
FIGURA 32 - Fluxograma do <i>script Initalisation</i> .....	60
FIGURA 33 - Fluxograma do <i>script Load Flow Equations</i> .....	61
FIGURA 34 - Fluxograma do <i>script Load Flow Control</i> .....	62
FIGURA 35 - Fluxograma do <i>script Quaso-Dynamic Control</i> .....	63
FIGURA 36 - Estratégia de controle utilizada para o controle do modelo de bateria	64
FIGURA 37 - Diagrama de blocos do <i>Composite Model BESS-Control</i> .....	69
FIGURA 38 - Diagrama de blocos do <i>Composite Model Battery</i> .....	70
FIGURA 39 - Diagrama de blocos do Common model <i>PQ-Control</i> .....	71
FIGURA 40 - Diagrama de blocos do Common model <i>Charge Control</i> .....	71
FIGURA 41 - Diagrama de blocos do Common model <i>Battery_Model</i> .....	72

FIGURA 42 - Gráfico do funcionamento do controle da injeção de corrente reativa em função da variação da tensão ( $\Delta U$ ) .....	73
FIGURA 43 - Sistema de pequeno porte com a bateria carregando durante dias úteis .....	75
FIGURA 44 - Curvas do comportamento da potência ativa da carga da residência (azul) e da bateria (vermelha) ao longo de um dia útil .....	78
FIGURA 45 - Curva de potência ativa da carga para o sistema de pequeno porte demandada antes (azul) e após a implantação da bateria (vermelha) ao longo de dias úteis.....	78
FIGURA 46 - Estado de carga (SOC – <i>State of Charge</i> ) da bateria ao longo de dias úteis .....	79
FIGURA 47 - Curvas do comportamento da potência ativa da carga da residência (azul) e da bateria (vermelha) aos sábados .....	80
FIGURA 48 - Curva de potência ativa da carga para o sistema de pequeno porte demandada antes (azul) e após a implantação da bateria (vermelha) aos sábados.	80
FIGURA 49 - Estado de carga (SOC – <i>State of Charge</i> ) da bateria do sistema de pequeno porte aos sábados .....	81
FIGURA 50 - Curvas do comportamento da potência ativa da carga da residência (azul) e da bateria (vermelha) aos domingos .....	82
FIGURA 51 - Curva de potência ativa da carga para o sistema de pequeno porte demandada antes (azul) e após a implantação da bateria (vermelha) aos domingos .....	82
FIGURA 52 - Estado de carga (SOC – <i>State of Charge</i> ) da bateria do sistema de pequeno porte aos domingos .....	83
FIGURA 53 - Tensão no terminal "Residência" quando aplicado um curto-circuito no sistema com uma bateria de 5 kVA.....	85
FIGURA 54 - Tensão no terminal "Residência" quando aplicado um curto-circuito no sistema com uma bateria de 50 kVA.....	86
FIGURA 55 - Sistema de médio porte no Cenário 1 durante dias úteis .....	88
FIGURA 56 - Resultado do curto-circuito monofásico no sistema de médio porte sem armazenamento de energia.....	90
FIGURA 57 - Resultado do curto-circuito monofásico no sistema de médio porte com armazenamento de energia.....	90

FIGURA 58 - Resultado do curto-circuito trifásico no sistema de médio porte sem armazenamento de energia.....	91
FIGURA 59 - Resultado do curto-circuito trifásico no sistema de médio porte com armazenamento de energia.....	91
FIGURA 60 - Curvas do comportamento da potência ativa da carga do condomínio (verde) e da bateria (vermelha) ao longo de um dia útil .....	93
FIGURA 61 - Curva de potência ativa da carga do sistema de médio porte demandada antes (verde) e após a implantação da bateria (azul) ao longo de dias úteis.....	94
FIGURA 62 - Curvas do comportamento da potência ativa da carga do condomínio (verde) e da bateria (vermelha) aos sábados.....	94
FIGURA 63 - Curva de potência ativa da carga do sistema de médio porte demandada antes (verde) e após a implantação da bateria (azul) aos sábados .....	95
FIGURA 64 - Curvas do comportamento da potência ativa da carga do condomínio (verde) e da bateria (vermelha) aos domingos.....	95
FIGURA 65 - Curva de potência ativa da carga do sistema de médio porte demandada antes (verde) e após a implantação da bateria (azul) aos domingos .....	96
FIGURA 66 - Tensão na barra do condomínio dos Ipês quando aplicado um curto-circuito no primário do transformador de distribuição com uma bateria de 50 kVA...98	
FIGURA 67 - Tensão na barra do condomínio dos Ipês quando aplicado um curto-circuito no primário do transformador de distribuição com uma bateria de 75 kVA...99	
FIGURA 68 - Sistema de grande porte no Cenário 1 durante dias úteis.....	100
FIGURA 69 - Sistema de grande porte no Cenário 2 durante dias úteis.....	101
FIGURA 70 - Sistema de grande porte no Cenário 1 aos sábados.....	101
FIGURA 71 - Sistema de grande porte no Cenário 2 aos sábados.....	102
FIGURA 72 - Sistema de grande porte no Cenário 1 aos domingos.....	102
FIGURA 73 - Sistema de grande porte no Cenário 2 aos domingos.....	103
FIGURA 74 - Resultado do curto-circuito trifásico no sistema de grande porte sem armazenamento de energia.....	105
FIGURA 75 - Resultado do curto-circuito trifásico no sistema de grande porte com armazenamento de energia.....	105
FIGURA 76 - Gráfico mostrando a curva de proteção 51/51N e a corrente nominal do alimentador BGE09 sem e com a presença bateria às 5h .....	107
FIGURA 77 - Gráfico mostrando a curva de proteção 51/51N e a corrente nominal do alimentador BGE09 sem e com a presença bateria às 16h .....	107

FIGURA 78 - Gráfico mostrando a curva de proteção 51/51N e 50/50N e a corrente nominal do alimentador BGE09 e da bateria às 5h e às 16h .....	108
FIGURA 79 - Gráfico mostrando a curva de proteção 51/51N e a corrente de curto-circuito trifásico do alimentador BGE09 antes da inserção da bateria para uma falta na "Barra 2 – 11,9 kV" .....	109
FIGURA 80 - Diagrama da subestação após a atuação da proteção para o curto-circuito trifásico antes da inserção da bateria para uma falta na "Barra 2 – 11,9 kV" .....	110
FIGURA 81 - Janela do programa mostrando o relé que atuou para o curto-circuito trifásico na "Barra 2 – 11,9 kV" sem a bateria .....	110
FIGURA 82 - Diagrama da subestação mostrando o momento do curto-circuito trifásico com a bateria inserida no sistema para uma falta na "Barra 2 – 11,9 kV" .	111
FIGURA 83 - Gráfico mostrando a curva de proteção 51/51N e a corrente de curto-circuito trifásico do alimentador BGE09 e da bateria para uma falta na "Barra 2 – 11,9 kV" .....	111
FIGURA 84 - Diagrama da subestação após a atuação da proteção para o curto-circuito trifásico com a bateria inserida no sistema para uma falta na "Barra 2 – 11,9 kV" .....	112
FIGURA 85 - Curvas do comportamento da potência ativa do alimentador BGE09 (verde) e da bateria (vermelha) ao longo de um dia útil .....	113
FIGURA 86 - Curva de potência ativa da carga para o sistema de grande porte demandada antes (verde) e após a implantação da bateria (vermelha) ao longo dos dias úteis .....	114
FIGURA 87 - Curvas do comportamento da potência ativa do alimentador BGE09 (verde) e da bateria (vermelha) aos sábados.....	115
FIGURA 88 - Curva de potência ativa da carga para o sistema de grande porte demandada antes (verde) e após a implantação da bateria (vermelha) aos sábados .....	115
FIGURA 89 - Curvas do comportamento da potência ativa do alimentador BGE09 (verde) e da bateria (vermelha) aos domingos.....	116
FIGURA 90 - Curva de potência ativa da carga para o sistema de grande porte demandada antes (verde) e após a implantação da bateria (vermelha) aos domingos .....	116

FIGURA 91 - Tensão na barra do alimentador BGE09 quando aplicado um curto-circuito trifásico na "Barra 2 – 11,9 kV" com uma bateria de 1 MVA .....	119
FIGURA 92 - Imagem aumentada da FIGURA 91 .....	119
FIGURA 93 - Tensão na barra do alimentador BGE09 quando aplicado um curto-circuito trifásico na "Barra 2 – 11,9 kV" com uma bateria de 10 MVA.....	120

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Aplicações de projetos de armazenamento de energia com tecnologia eletroquímica de pequeno porte (5 kW e 10 kW) .....	24
TABELA 2 - Aplicações de projetos de armazenamento de energia com tecnologia eletroquímica de Médio Porte (25kW até 75kW) .....	26
TABELA 3 - Aplicações de projetos de armazenamento de energia com tecnologia eletroquímica de Médio Porte (500 kW e 1 MW).....	27
TABELA 4 - Definição e Associação das palavras-chaves para a realização da revisão de literatura .....	29
TABELA 5 - Dados Elétricos do circuito do Consumidor residencial .....	47
TABELA 6 - Dados Elétricos do circuito do Condomínio dos Ipês .....	50
TABELA 7 - Dados Elétricos completos da subestação de Barão Geraldo.....	53
TABELA 8 - Variáveis parametrizáveis do modelo Quase-Dinâmico .....	59
TABELA 9 - Composição do <i>Composite Models BESS-Control</i> com a descrição de cada <i>Common model (slot)</i> que o compõe.....	66
TABELA 10 - Composição do <i>Composite Model Battery</i> com a descrição de cada <i>Common model</i> que o compõe .....	66
TABELA 11 - Variáveis do <i>Common model PQ-Control</i> .....	67
TABELA 12 - Variáveis para parametrizar o bloco <i>Charge Control</i> .....	68
TABELA 13 - Variáveis para parametrizar o bloco <i>Battery_Model</i> .....	68
TABELA 14 - Simulações realizadas para cada um dos sistemas analisados .....	74
TABELA 15 - Cenários utilizados para a análise de fluxo de potência do sistema de pequeno porte .....	75
TABELA 16 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de pequeno porte durante dias úteis .....	76
TABELA 17 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de pequeno porte aos sábados.....	76
TABELA 18 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de pequeno porte aos domingos.....	76
TABELA 19 - Valores dos parâmetros do modelo quase-dinâmico do sistema de pequeno porte para dias úteis.....	77
TABELA 20 - Valores dos parâmetros do modelo quase-dinâmico do sistema de pequeno porte para os sábados.....	79

TABELA 21 - Valores dos parâmetros do modelo quase-dinâmico do sistema de pequeno porte para os domingos.....	81
TABELA 22 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o <i>Common model PQ-Control-P</i> .....	84
TABELA 23 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o <i>Common model Charge Control-P</i> .....	84
TABELA 24 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o <i>Common model Simple Battery-P</i> .....	84
TABELA 25 - Cenários utilizados para a análise de fluxo de potência do sistema de médio porte.....	87
TABELA 26 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de médio porte durante dias úteis.....	88
TABELA 27 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de médio porte aos sábados.....	88
TABELA 28 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de médio porte aos domingos.....	89
TABELA 29 - Resultados do cálculo de curto-circuito monofásico para o sistema de médio porte.....	92
TABELA 30 - Resultados do cálculo de curto-circuito trifásico para o sistema de médio porte.....	92
TABELA 31 - Valores dos parâmetros do modelo quase-dinâmico do sistema de médio porte.....	93
TABELA 32 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o <i>Common model PQ-Control-M</i> .....	97
TABELA 33 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o <i>Common model Charge Control-M</i> .....	97
TABELA 34 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o <i>Common model Simple Battery-M</i> .....	97
TABELA 35 - Cenários utilizados para a análise de fluxo de potência do sistema de grande porte.....	100
TABELA 36 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de grande porte durante dias úteis.....	103
TABELA 37 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de grande porte aos sábados.....	103

TABELA 38 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de grande porte aos domingos.....	104
TABELA 39 - Resultados do cálculo de curto-circuito trifásico para o sistema de grande porte.....	106
TABELA 40 - Valores dos parâmetros do modelo quase-dinâmico do sistema de grande porte para dias úteis.....	113
TABELA 41 - Valores dos parâmetros do modelo quase-dinâmico do sistema de grande porte para os sábados.....	114
TABELA 42 - Valores dos parâmetros do modelo quase-dinâmico do sistema de grande porte para os domingos.....	116
TABELA 43 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o <i>Common model PQ-Control-G</i> .....	118
TABELA 44 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o <i>Common model Charge Control-G</i> .....	118
TABELA 45 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o <i>Common model Simple Battery-G</i> .....	118

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEST	<i>Chemical Energy Storage Technology</i>
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
DOE	<i>Department of Energy – United States of America</i>
DPF	<i>DlgSILENT PowerFactory</i>
DPL	<i>DlgSILENT Programming Language</i>
EEST	<i>Electrical Energy Storage Technology</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
Li-Ion	<i>Lithium-Ion</i>
MEST	<i>Mechanical Energy Storage Technology</i>
MT	Média Tensão
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QDSL	<i>Quase-Dynamic</i>
SAE	Sistema de Armazenamento de Energia
SE	Subestação
SFV	Sistema Fotovoltaico
SOC	<i>State of Charge</i>
TC	Transformador de Corrente
TEST	<i>Thermal Energy Storage Technology</i>
VSC	<i>Voltage Sourced Converter</i>

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	CONTEXTO .....	12
1.2	OBJETIVOS .....	15
1.2.1	Objetivo geral .....	15
1.2.2	Objetivos específicos .....	15
1.3	JUSTIFICATIVA .....	16
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO .....	17
2	REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO COM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA .....	18
2.1	REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	18
2.2	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM REDES ELÉTRICAS.....	20
2.2.1	Tecnologias de Armazenamento de Energia .....	21
2.2.1.1	Tecnologias de Armazenamento de Energia Química .....	22
2.2.1.1.1	Baterias de Íon de Lítio (Lithium-Ion).....	22
2.2.1.1.2	Baterias de Chumbo-Ácido.....	22
2.2.1.1.3	Baterias de Fluxo Reverso de Vanádio .....	23
2.2.2	Aplicações de Armazenadores de Energia com a tecnologia de Baterias na Rede Elétrica .....	24
2.2.2.1	Aplicações de Armazenamento de Energia em projetos de pequeno porte	24
2.2.2.2	Aplicações de Armazenamento de Energia em projetos de médio porte	25
2.2.2.3	Aplicações de Armazenamento de Energia em projetos de grande porte	27
2.3	REVISÃO DA LITERATURA .....	28
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	32
3	FERRAMENTA DE ANÁLISE E MODELAGEM ELÉTRICA .....	32

3.1	VISÃO GERAL DA FERRAMENTA.....	32
3.2	SIMULAÇÕES.....	34
3.2.1	Fluxo de Potência .....	34
3.2.2	Cálculo de Curto-Circuito .....	35
3.2.3	Proteção.....	38
3.2.4	Quase-Dinâmica .....	38
3.2.5	Transitórias/RMT.....	42
3.3	MODELAGEM DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS.....	43
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	46
4.1	MATERIAIS.....	46
4.1.1	Dados elétricos das redes elétricas .....	46
4.1.1.1	Consumidor Residencial.....	46
4.1.1.2	Condomínio dos Ipês.....	49
4.1.1.3	Alimentador .....	52
4.1.2	Ferramenta Computacional.....	55
4.2	MÉTODOS.....	55
4.2.1	Modelagem das Redes Elétricas.....	56
4.2.2	Modelagem das Baterias .....	58
4.2.2.1	Modelo para Simulação Quase-Dinâmica .....	58
4.2.2.2	Modelo para Simulação Dinâmica .....	65
4.2.2.2.1	<i>Composite Models</i> .....	65
4.2.2.2.2	<i>Common Models</i> .....	67
4.2.2.2.3	<i>Composite Frame</i> .....	69
4.2.2.2.4	<i>Common Model/Block Definition</i> .....	70
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	73
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73

5.1	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO SISTEMA DE PEQUENO PORTE	74
5.1.1	Simulação de Fluxo de Potência do Sistema de Pequeno Porte ....	74
5.1.2	Simulação Quase-Dinâmica do Sistema de Pequeno Porte .....	77
5.1.3	Simulação RMS/Transitória do Sistema de Pequeno Porte .....	83
5.2	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO SISTEMA DE MÉDIO PORTE .....	87
5.2.1	Simulação Fluxo de Potência do Sistema de Médio Porte.....	87
5.2.2	Simulação de Curto-Circuito do Sistema de Médio Porte .....	89
5.2.3	Simulação Quase-Dinâmica do Sistema de Médio Porte.....	92
5.2.4	Simulação RMS/Transitória do Sistema de Médio Porte .....	97
5.3	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO SISTEMA DE GRANDE PORTE..	99
5.3.1	Simulação de Fluxo de Potência do Sistema de Grande Porte.....	99
5.3.2	Simulação de Curto-Circuito do Sistema de Grande Porte .....	104
5.3.3	Simulação do Esquema de Proteção do Sistema de Grande Porte	106
5.3.4	Simulação Quase-Dinâmica do Sistema de Grande Porte .....	112
5.3.5	Simulação RMS/Transitória do Sistema de Grande Porte .....	117
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	121

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO

Conforme descrito em Kersting (2002), por muitos anos a rede elétrica de distribuição foi considerada como uma preocupação secundária do sistema elétrico de potência. Na segunda metade do século XX, a geração e a transmissão de energia elétrica foram alvos de grandes estudos e análises por parte de pesquisadores, pois à medida que se expandiam com muita rapidez, surgiam diversos desafios relacionados a elas. Enquanto isso, a distribuição continuava entregando energia elétrica aos consumidores sem grandes mudanças e, portanto, sem grandes avanços tecnológicos. Esse fato fez com que ao longo dos anos esses sistemas acumulassem dispositivos simples, e muitas vezes obsoletos, com pouca possibilidade de automatizar a rede elétrica.

Nos últimos anos, muito tem-se falado das redes inteligentes, chamadas em inglês de *Smart Grids*. Elas exigem a implantação de equipamentos mais modernos que possibilitem o aumento da eficiência energética tanto para consumidores como para as concessionárias. Dentre esses novos equipamentos, estão os Sistema de Armazenamento de Energia (SAE), este novo paradigma das redes inteligentes e suas tecnologias trazem vários benefícios para o setor elétrico como redução de perdas comerciais e técnicas com identificação mais precisa de fraudes e furtos, redução de custos operacionais, melhor gestão de ativos e custos evitados em relação à infraestrutura das redes elétricas. Tendo em vista essas tecnologias e as suas aplicações no sistema de distribuição de energia elétrica, a introdução de sistemas de armazenamento de energia na rede elétrica traz novos avanços para a engenharia, mas também alguns desafios.

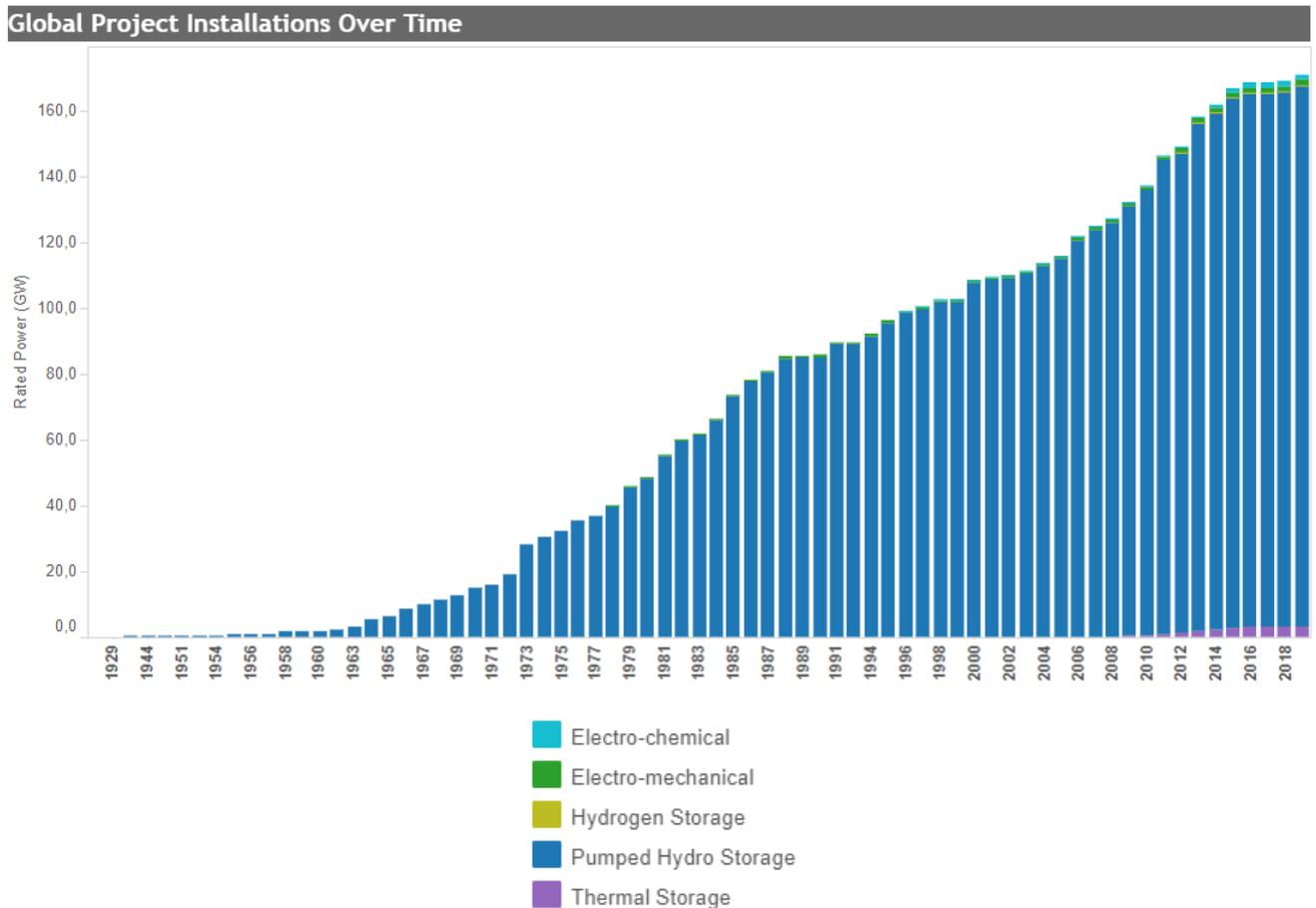
Existem diversos tipos de armazenamento de energia que podem ser divididos mediante suas capacidades de armazenamento, as tecnologias utilizadas e o modo como a energia é armazenada. Essas distinções serão tratadas com mais detalhes na seção 2.2.

Ao longo dos próximos anos, considera-se que a rede elétrica de baixa tensão irá receber uma quantidade expressiva de sistemas de armazenamento de energia por bateria devido a inserção de fontes de geração intermitentes na rede de distribuição como painéis fotovoltaicos, geradores eólicos, entre outras. Esses

sistemas têm características específicas, como atenuar picos de tensão e evitar a sobrecarga das linhas. Esses fatores ainda ajudam os operadores do sistema de distribuição a prorrogarem investimentos para adequar as linhas e os transformadores às novas necessidades. Fortenbacher et al. (2017).

O DOE<sup>1</sup>, Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, possui uma base de dados que disponibiliza informações sobre projetos de instalações mundiais de armazenadores de energia. Através dessa plataforma teve-se acesso ao gráfico que pode ser visualizado na FIGURA 1, mostrando o crescimento da quantidade de projetos já instalados de SAEs no mundo durante os últimos vinte e dois anos.

FIGURA 1 - Quantidade de Instalações de projetos globais ao longo dos anos



FONTE: Adaptado de DOE (2018)

<sup>1</sup> Para acessar a base de dados do DOE, acesse o website <[https://www.energystorageexchange.org/projects/advanced\\_search](https://www.energystorageexchange.org/projects/advanced_search)>”.

Percebe-se uma predominância do armazenamento de energia através da tecnologia de bombeamento hidroelétrico (cor azul escura), mas vê-se também um aumento da utilização de equipamentos eletroquímicos (cor azul clara) durante os seis anos que se passaram.

Entretanto um crescimento bem exponencial de instalações com SAEs foi visto a partir do ano 2000. Isso ocorreu devido ao fato de um grande avanço relacionado ao desenvolvimento das tecnologias para armazenamento de energia nos anos anteriores, diminuindo os seus custos, além das novas regulamentações ambientais e da utilização de fontes de energia renováveis. Chen et al. (2009)

Outra informação que pode ser retirada do banco de dados do DOE é a distribuição de cada tipo de tecnologia de armazenamento de energia pelo mundo, conforme pode ser visto na FIGURA 2.

FIGURA 2 - Distribuição de Projetos de Armazenamento de Energia diferenciados pelo tipo de tecnologia no mundo



FONTE: DOE (2018)

Percebe-se que a maior concentração de SAEs no mundo está na Europa, na América do Norte e em países Asiáticos. Sendo que no Brasil pode ser visualizado

apenas um ponto azul escuro representando a presença de um sistema de bombeamento hidroelétrico no Estado de São Paulo.

Após realizar a análise dos dados apresentados na FIGURA 1 e na FIGURA 2, pode-se perceber a relevância que o SAE já está tendo no sistema elétrico mundial e brasileiro, e continuará tendo de forma significativa nos próximos anos. Assim, um estudo em cima dessas tecnologias mostra-se importante para ter o conhecimento dos impactos positivos e negativos para a rede elétrica, e poder criar métodos e estratégias para que elas desempenhem suas funções da maneira mais benéfica possível ao setor elétrico.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o impacto elétrico causado com a implantação de sistemas de armazenamento de energia em redes elétricas de pequeno porte para consumidores residenciais finais; médio porte para um circuito secundário BT (Baixa Tensão); e de grande porte para um alimentador de subestação em MT (Media Tensão) através da modelagem e simulações computacionais.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Já os objetivos específicos são discriminados entre:

- Analisar o comportamento dos três sistemas que serão utilizados para inserir os sistemas de armazenamento de energia;
- Estudar e compreender o funcionamento do *software* DigSILENT PowerFactory;
- Obter medições referentes ao consumidor residencial, o circuito secundário BT e ao alimentador da subestação;
- Modelar os sistemas elétricos que irão receber o sistema de armazenamento de energia de pequeno porte, o de médio porte e o de grande porte utilizando a ferramenta computacional estudada;

- Utilizar um modelo de bateria para análises quase-dinâmicas e outra para análises dinâmicas utilizando a ferramenta computacional estudada;
- Realizar simulações de fluxo de potência e de eventos transitórios para diversas situações de carregamentos e distúrbios das redes elétricas utilizadas sem a bateria e depois com ela;
- Obter gráficos e curvas que mostrem o comportamento dos sistemas modelados através do *software*;
- Comparar e avaliar o impacto dos modelos de SAEs no sistema elétrico de distribuição.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Como pode ser concluído com a FIGURA 1, os projetos envolvendo sistemas de armazenamento de energia cresceram muito principalmente em países como Estados Unidos, China e países europeus. No Brasil essas tecnologias ainda não foram utilizadas, mas com a entrada intensiva de energias renováveis e modernização da rede elétrica de distribuição brasileira, os órgãos nacionais estão incentivando investimentos em projetos de pesquisa com armazenamento de energia.

Com isso, a Agência Nacional de Energia Elétrica lançou uma chamada pública para P&Ds estratégicos, chamada 21, intitulado "Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro", podendo ser encontrada em ANEEL (2016)<sup>2</sup>. Esta chamada é voltada a concessionárias de serviços públicos de distribuição, transmissão ou geração de energia elétrica, as permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica e as autorizadas à produção independente de energia elétrica, e tem como objetivo o desenvolvimento tecnológico de sistemas de armazenamento de energia de forma a desenvolver um método de análise dos impactos elétricos causados por esse tipo de sistema.

Um dos projetos de P&D a serem desenvolvidos ao longo desses quatro anos de duração da chamada será realizado pela CPFL em conjunto com o Lactec e a Unicamp, cujo título é "ANÁLISE DE SOLUÇÕES DE TECNOLOGIA DE

---

<sup>2</sup> Para acessar a divulgação sobre a chamada, assim como sua minuta acesse [http://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d/-/asset\\_publisher/ahiml6B12kVf/content/temas-para-investimentos-em-p-d/656831?inheritRedirect=false](http://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d/-/asset_publisher/ahiml6B12kVf/content/temas-para-investimentos-em-p-d/656831?inheritRedirect=false)

ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA DE PEQUENO, MÉDIO E GRANDE PORTE ". Assim, este trabalho de conclusão de curso (TCC) fará parte de três etapas desse projeto voltadas à análise de soluções com tecnologia de armazenamento de energia. Portanto este trabalho traz contribuições não somente acadêmicas, mas também práticas para a concessionária envolvida.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

A divisão deste documento foi realizada em seis capítulos. No capítulo de número 1, INTRODUÇÃO, é feita uma apresentação do tema de pesquisa abordando o contexto no qual ele é inserido, apresentando os objetivos que serão atingidos e justificando o desenvolvimento do trabalho. O capítulo 2, REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO COM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA, realiza uma fundamentação teórica do projeto, definindo as redes elétrica de distribuição, os sistemas de armazenamento de energia, descrevendo os tipos de sistema de armazenamento existentes, mas dando uma ênfase aos SAEs eletroquímicos, mostrando as tecnologias com baterias mais utilizadas em cada um dos portes que foram analisados, e por fim, a revisão da literatura sobre o tema do trabalho.

No capítulo 3, FERRAMENTA DE ANÁLISE E MODELAGEM ELÉTRICA, é apresentada uma visão geral da ferramenta computacional utilizada para modelar e simular os sistemas do projeto, além de uma descrição sobre as análises possíveis de serem realizadas com a ferramenta e que serão utilizadas com o modelo desenvolvido no trabalho. Já o capítulo 4, MATERIAIS E MÉTODOS, apresenta e descreve os dados elétricos das redes elétricas do consumidor residencial, do secundário do transformador de distribuição e do alimentador da subestação, além de fazer uma explicação detalhada dos dois modelos de bateria utilizados.

O capítulo 5, ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO, apresenta as simulações realizadas e os resultados alcançados com elas para os sistemas modelados. Para encerrar, as conclusões sobre os resultados e as possibilidades de trabalhos futuros são abordadas no capítulo 6, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.

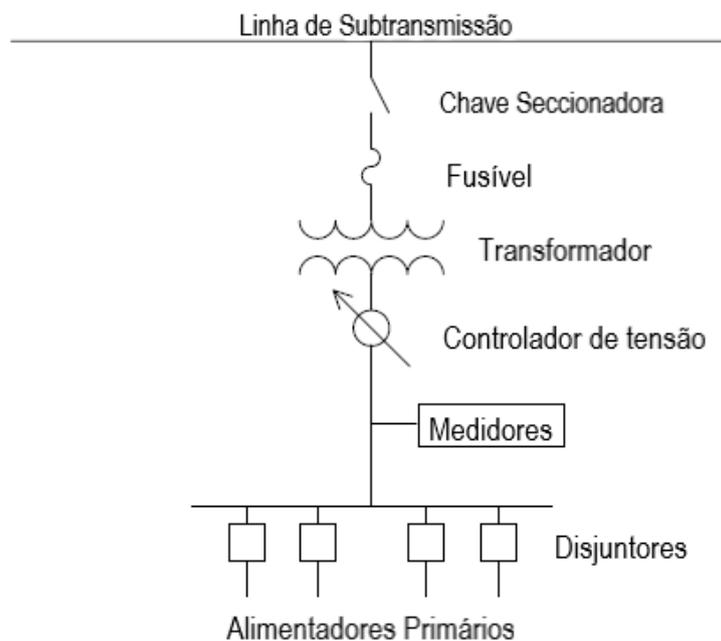
## 2 REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO COM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

### 2.1 REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO

Em um sistema elétrico de potência tradicional, a produção de energia elétrica se concentra em usinas distantes. Então os sistemas de transmissão e distribuição são os responsáveis por levar a energia do seu local de geração até os consumidores. A rede elétrica de distribuição é a responsável por levar a energia elétrica desde as subestações até os centros de consumo.

Um esquema apresentando os principais componentes de uma rede de distribuição pode ser visto na FIGURA 3.

FIGURA 3 - Esquemático simplificado de uma subestação



FONTE: Adaptado Kersting (2002)

O começo da rede de distribuição é definido em uma subestação de distribuição que pode ser alimentada por uma ou mais linhas de subtransmissão. Dessa subestação podem derivar um ou mais alimentadores. Nas situações mais comuns, os alimentadores são radiais, ou seja, o fluxo de potência percorre as linhas de distribuição desde a subestação de distribuição até o consumidor. Kersting (2002)

Sendo assim, a estrutura da distribuição de um sistema elétrico de potência pode ser dividida entre:

- **Subestação de Distribuição:** responsável por realizar o abaixamento da tensão que chega das linhas de distribuição para a tensão que percorrerá as linhas de distribuição. Para isso existem transformadores e chaves nos lados de alta e baixa tensão. Além disso, considerando que as cargas conectadas aos alimentadores estão sempre variando, existem também controladores de tensão para mantê-la sempre dentro dos padrões de fornecimento da concessionária. Por fim, também existem equipamentos responsáveis pela proteção, relés e disjuntores, e medidores para monitorar e gravar em tempo real os valores de tensão, corrente, potência, fator de potência, entre outros.
- **Alimentadores:** os principais componentes de um alimentador são reguladores de tensão, bancos de capacitores, transformadores de distribuição e as diversas cargas do sistema.
- **Linhas de distribuição:** são responsáveis por determinar as condições de operação do alimentador, e é fundamental para a modelagem deste. Ela é a responsável por criar o mapa que determina a posição dos postes de distribuição, as distâncias de cada segmento de linha, e detalhes como a quantidade de fases das linhas e o tamanho dos cabos.

Os sistemas de distribuição de energia elétrica foram durante anos do tipo radial, ou seja, uma rede em que o fluxo de energia só ocorre em uma direção, saindo das subestações e percorrendo as linhas de distribuição até os consumidores. Entretanto, no século XX, um novo conceito de rede elétrica surgiu no setor elétrico mundial: a *smart grid*, ou em português, redes inteligentes, conforme já citado. Esse tipo de sistema trouxe em suas configurações equipamentos e estratégias de gerenciamento da energia que fariam o sistema não ser mais apenas radial. As *smart grids* permitem um fluxo de potência em mão dupla, tanto do centro de geração até o consumidor, como do consumidor para a rede elétrica.

Em Fang et al. (2012), os autores definem que uma *smart grid* tem a capacidade de fornecer energia através de táticas mais eficientes e responde a uma gama muito grande de condições e eventos, utilizando tecnologias de comunicação modernas. Sendo assim, eventos que venham a ocorrer em qualquer lugar dessa rede podem ser enxergados e decisões efetivas podem ser tomadas para atender às

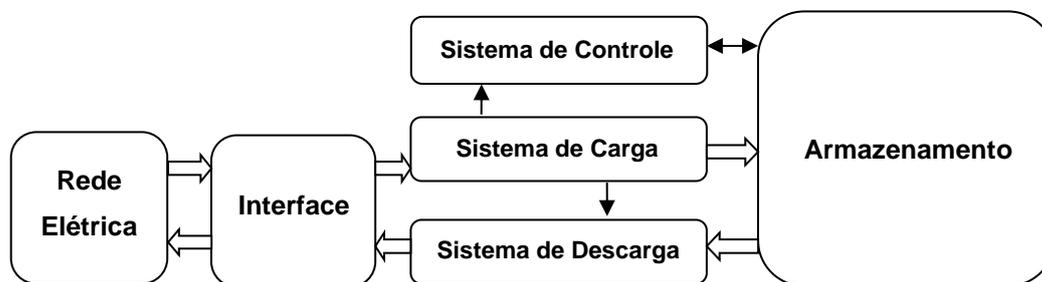
necessidades do sistema. Pode-se então dizer que um sistema elétrico inteligente busca ser limpo, seguro, confiável, resiliente, eficiente e sustentável.

O uso de armazenamento de energia e de geração fotovoltaica, tal como utiliza-se em dois dos sistemas elétricos em estudo no presente trabalho de conclusão de curso, é uma medida que faz parte da composição de uma rede elétrica inteligente, por exemplo, já que tornam o sistema mais dinâmico e conectado.

## 2.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM REDES ELÉTRICAS

A aplicação de armazenamento de energia em Sistemas Elétricos de Potência requer um sistema que permita importar a energia da rede elétrica e adaptá-la para que possa ser armazenada conforme o método da tecnologia de armazenamento empregada. Esse sistema é composto basicamente de quatro partes, conforme é possível visualizar na FIGURA 4.

FIGURA 4 - Estrutura básica de um Sistema de Armazenamento de Energia



FONTE: Adaptado de Akinyele; Rayudu (2014)

Através do esquemático da FIGURA 4 é possível explicar genericamente como funciona um sistema de armazenamento de energia. No Armazenamento, a energia elétrica será armazenada em outra forma de energia para que possa ser novamente convertida em elétrica e utilizada no futuro. Já o sistema de carga permite o fluxo da energia vinda da rede elétrica para a unidade de armazenamento. Existe ainda uma parte responsável por garantir a entrega da energia armazenada quando demandada, chamado de sistema de descarga. E ainda, há a parte mais importante desse conjunto, que é o sistema controle que tem como função controlar todos esses processos citados anteriormente. Akinyele; Rayudu (2014)

Como mencionado no capítulo 1, os sistemas de armazenamento de energia podem trazer diversos benefícios ao sistema elétrico de potência. Em Luo, X et al. (2015), são citadas as seguintes funções e modos de operação desses sistema para a rede elétrica:

- Ajuda no atendimento dos picos de demanda das cargas de um sistema;
- Prover o gerenciamento da energia que varia ao longo do tempo;
- Alívio da intermitência de fontes renováveis de geração de energia elétrica;
- Melhora na qualidade e confiabilidade da energia;
- Ajuda com necessidades ligadas a cargas remotas e de veículos elétricos;
- Suporte à implantação de *smart grids*;
- Ajuda com o gerenciamento da energia de geração distribuída;
- Redução da importação de energia elétrica durante os períodos de pico da demanda.

### 2.2.1 Tecnologias de Armazenamento de Energia

As tecnologias de armazenamento utilizadas em Sistemas de Potência podem ser classificadas conforme o tipo de conversão de energia utilizada, e segundo Chen et al. (2009) podem ser divididas em quatro tipos:

- Elétricas, em inglês EEST (Electrical Energy Storage Technologies) – exemplos dos principais equipamentos utilizados: capacitores, supercapacitores e supercondutores;
- Mecânicas, em inglês MEST (Mechanical Energy Storage Technologies) - exemplos das principais tecnologias utilizadas: *Pumped Hydro-Power* (PHS) /Usina Hidrelétrica Reversível, *Flywheel* e Ar comprimido;
- Térmicas, em inglês TEST (Thermal Energy Storage Technologies) - exemplos das principais tecnologias utilizadas: armazenamento térmico em baixas (resfriamento de água e fervura de nitrogênio líquido ou criogênio) ou altas (fluidos térmicos) temperaturas;
- Químicas, em inglês CEST (Chemical Energy Storage Technologies) - exemplos das principais tecnologias utilizadas: baterias de Íon de Lítio, baterias de Chumbo-Ácido e baterias de Fluxo Reverso de Vanádio.

Como neste trabalho de conclusão de curso a tecnologia de armazenamento escolhida para ser utilizada foi a eletroquímica com íon de lítio, na sequência serão apresentados os principais equipamentos de armazenamento de energia eletroquímicos utilizados em redes elétricas com mais detalhes.

#### 2.2.1.1 Tecnologias de Armazenamento de Energia Química

O armazenamento químico é composto pelos diversos tipos de bateria existentes. A seguir essas tecnologias serão especificadas.

##### 2.2.1.1.1 Baterias de Íon de Lítio (Lithium-Ion)

O termo “lithium-ion” não se refere apenas ao par eletrolítico, mas também a uma larga gama de diferentes interações químicas, todas caracterizadas pela transferência de íons de lítio entre os eletrodos durante as cargas e descargas da bateria. As células de baterias de íon de lítio não contêm o metal lítio em si, os íons são inseridos na estrutura de outros materiais como óxidos de metal e fosfato no eletrodo positivo (catodo), e carbono ou lítio com titânio no anodo. ESA (2018)

Esse tipo de bateria tem uma vida de aproximadamente 10.000 ciclos e uma eficiência de 100% quando comparada com outras tecnologias. Elas são conhecidas por não serem baterias “viciáveis”. Sendo assim, elas têm sido muito utilizadas em veículos puramente elétricos e híbridos. Além disso, elas requerem um sistema de controle interno para operarem. Akinyele; Rayudu (2014)

Nos sistemas elétricos, essas baterias entram como soluções para amenizar intermitências na geração e entrega de energia.

##### 2.2.1.1.2 Baterias de Chumbo-Ácido

Pode-se dizer que elas são o tipo mais antigo e comum de baterias recarregáveis. Essas baterias consistes em uma série de células conectadas, um eletrólito, um catodo e um anodo. O catodo é de óxido de chumbo e o anodo de chumbo, sendo o eletrólito ácido sulfúrico. Durante os ciclos de carga e descarga, as reações químicas transformam o meio eletrolítico em água, e ambos o catodo e o anodo liberam sulfato de chumbo. Chen et al. (2009)

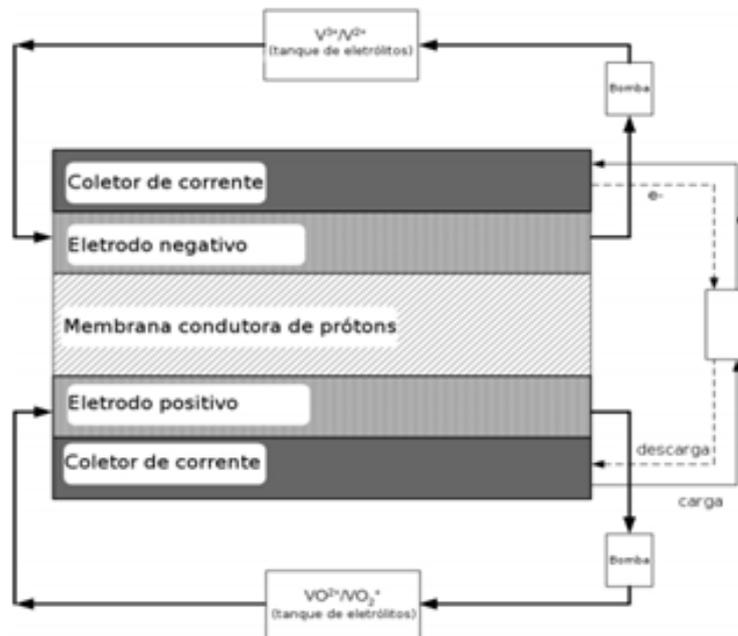
Quanto às suas características de uso, elas possuem um mal desempenho em baixas temperaturas, porém são muito utilizadas no auxílio de sistemas que envolvem fontes alternativas.

#### 2.2.1.1.3 Baterias de Fluxo Reverso de Vanádio

Essa bateria é formada por células de energia que formam uma pilha, entre as quais fluem dois eletrólitos através de feltros de carbono que funcionam como eletrodos porosos e são separados por uma membrana que a permite troca de prótons. Assun (2015)

Um esquema de operação desse funcionamento pode ser encontrado na FIGURA 5.

FIGURA 5 - Esquema demonstrativo do funcionamento da bateria de Fluxo reverso de Vanádio



FONTE: Assun (2015)

As baterias de fluxo reverso de Vanádio oferecem uma alta tensão entre suas células, o que é muito favorável para aplicações de alta potência e densidade de energia. Além disso, elas apresentam respostas rápidas, uma eficiência em torno de 90% e podem operar por mais de 16000 ciclos. Por outro lado, elas apresentam um alto custo de operação, e uma confiabilidade não muito boa devido à baixa estabilidade do eletrólito. Luo, Xing et al. (2015)

## 2.2.2 Aplicações de Armazenadores de Energia com a tecnologia de Baterias na Rede Elétrica

Como neste trabalho de conclusão de curso, o tipo de equipamento de armazenamento de energia utilizado será a bateria, utilizando dessa forma uma tecnologia eletroquímica. Considerando isso, foi realizado um levantamento de informações sobre as principais aplicações de armazenamento de energia eletroquímica em projetos no mundo todo cadastrados no banco de dados do DOE.

Pelo fato do trabalho estar avaliando a inserção de baterias em três lugares distintos de um sistema de distribuição, as aplicações também foram divididas entre pequeno (5 a 10 kW), médio (25 a 75 kW) e grande (500 kW e 1 MW) porte.

### 2.2.2.1 Aplicações de Armazenamento de Energia em projetos de pequeno porte

Realizando uma filtragem dos dados adquiridos para selecionar apenas as instalações que tinham baterias de 5 kW a 10 kW, chegou-se ao número de projetos mostrados na TABELA 1 -

TABELA 1 - Aplicações de projetos de armazenamento de energia com tecnologia eletroquímica de pequeno porte (5 kW e 10 kW)

Project Name	Technology Type	Rated Power in kW	Duration (HH:MM)	Status	Service/Use Case	Country	Grid Interconnection	Energy Storage Technology Provider
Greensmith Energy	Lithium Iron Phosphate Battery	5	4.0	Operational	Onsite Renewable Generation Shifting	United States	Secondary Distribution	Greensmith Energy
NRECA - Distributed Energy Storage	Lead-acid	5	2.0	Operational	Electric Energy Time Shift	United States	Secondary Distribution	GS-Yuasa
NRECA - Distributed Energy Storage	Lead-acid	5	2.0	Operational	Electric Energy Time Shift	United States	Secondary Distribution	GS-Yuasa
Duke Energy-Residential	Lithium-ion	6	1.83	Operational	Grid-Connected Residential (Reliability)	United States	Secondary Distribution	
Gardner Community Center	Lithium-ion	6	1.50	Operational	Electric Bill Management with Renewables	United States	Secondary Distribution	JuiceBox Energy, Inc.
Shakopee Public Utilities	Lead-acid	9	2.0	Operational	Renewables Capacity Firming	United States	Secondary Distribution	
Rustenburg VRLA Project	Valve Regulated Lead-acid Battery	10	5.0	Operational	Distribution upgrade due solar	South Africa	Secondary Distribution	
Fotonenboer 't Spieker Dairy Farm	Vanadium Redox Flow	10	8.0	Operational	Electric Bill Management with Renewables	Netherlands	Secondary Distribution	Gildemeister Energy Solutions
New Orleans City Hall	Lithium-ion	10	2.0	Operational	Electric Bill Management with Renewables	United States	Secondary Distribution	SimpliPhi Power
Busselton Farm Property	Vanadium Redox Flow	10	10.0	Operational	Demand Response	Australia	Secondary Distribution	Gildemeister CellCube (DMG Mori)

FONTE: Relatório da etapa 05 do projeto de P&D 4600056875<sup>3</sup>

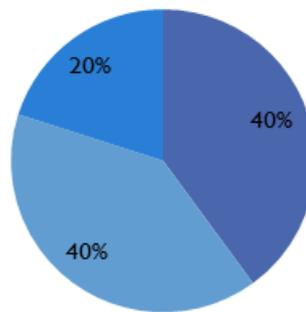
<sup>3</sup> Esses dados estão presentes no relatório mensal da etapa 5 do projeto de P&D da CPFL, já citado anteriormente neste documento, dentro do qual este trabalho de conclusão de curso está inserido.

Sendo um dos principais motivos identificar qual é a tecnologia eletroquímica mais utilizada em casos de pequeno porte, plotou-se um gráfico (FIGURA 6) a partir dos dados presentes na TABELA 1 para ser possível visualizar essa informação com maior clareza.

FIGURA 6 - Tecnologias de Armazenamento Eletroquímica *versus* Projetos em operação para Pequeno Porte

#### Tecnologia de armazenamento x Projetos

■ Lithium ■ Lead-acid ■ Vanadium



FONTE: Relatório da etapa 05 do projeto de P&D 4600056875

Através da FIGURA 6, pode-se perceber que os tipos de tecnologia mais utilizadas nos projetos de pequeno porte são as baterias de íon de lítio e de chumbo-ácido, cada uma representando 40% de uso do total de instalações existentes.

#### 2.2.2.2 Aplicações de Armazenamento de Energia em projetos de médio porte

Na filtragem feita para as tecnologias que se encontram entre 25 e 75 kW, encontrou-se os projetos que constam na TABELA 2.

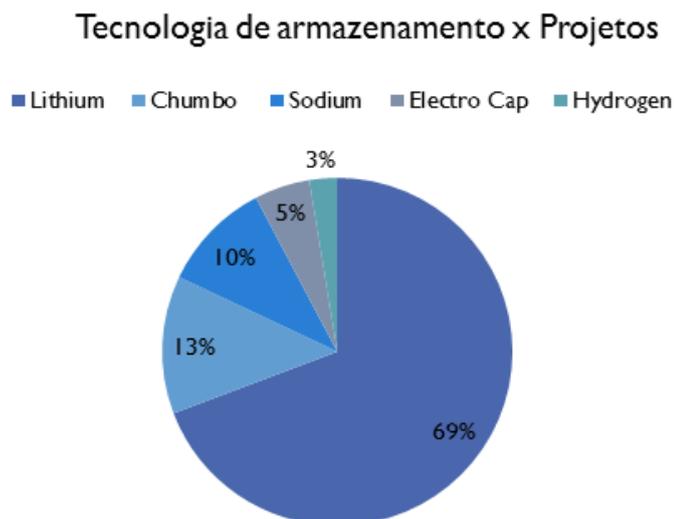
TABELA 2 - Aplicações de projetos de armazenamento de energia com tecnologia eletroquímica de Médio Porte (25kW até 75kW)

Project Name	Technology Type	Rated Power in kW	Duration (HH:MM)	Status	Service/Use Case	Country	Grid Interconnection	Energy Storage Technology Provider
Energy Storage System Demonstration - NEC	Lithium Iron Phosphate	25	1.92	Operational	Distribution upgrade due to solar	United States	Secondary Distribution	NEC Energy Solutions
SDGE Skills CES	Lithium-ion	25	2.0	Operational	Grid-Connected Commercial (Reliability & Quality)	United States	Secondary Distribution	Saft
SDGE Clairmont CES	Lithium-ion	25	2.0	Operational	Grid-Connected Commercial (Reliability & Quality)	United States	Secondary Distribution	Saft
SDGE Poway CES	Lithium-ion	25	2.0	Operational	Grid-Connected Commercial (Reliability & Quality)	United States	Secondary Distribution	Saft
SDG&E Century Park DESS	Lithium-ion	50	1.67	Operational	Distribution upgrade due to solar	United States	Secondary Distribution	Greensmith Energy
EPRI Knoxville Energy Storage	Lithium Iron Phosphate	50	0.92	Operational	Distribution upgrade due to solar	United States	Secondary Distribution	BYD
EnStorage Technology Demonstrator	Hydrogen Bromine Flow Battery	50	2.0	Operational	Renewables Capacity Firming	Israel	Secondary Distribution	
Falköping Substation Smart Grid - ABB	Lithium-ion	75	1.0	Operational	Distribution upgrade due to solar	Sweden	Secondary Distribution	ABB AB
Cal Poly - Amonix / Greensmith Energy	Lithium-ion	75	2.0	Operational	Renewables Capacity Firming	United States	Secondary Distribution	Greensmith Energy
Community Energy Storage	Lithium Polymer	75	2.0	Operational	Electric Energy Time Shift	United States	Primary Distribution	Kokam

FONTE: Relatório da etapa 06 do projeto de P&D 4600056875<sup>4</sup>

Tendo como base a TABELA 2, obteve-se o gráfico da FIGURA 7 que mostra a distribuição das tecnologias de armazenamento eletroquímicas entre as instalações de médio porte existentes.

FIGURA 7 - Tecnologias de Armazenamento Eletroquímicas *versus* Projetos em operação para Médio Porte



FONTE: Relatório da etapa 06 do projeto de P&D 4600056875

<sup>4</sup> Esses dados estão presentes no relatório mensal da etapa 6 do projeto de P&D da CPFL, já citado anteriormente neste documento, dentro do qual este trabalho de conclusão de curso está inserido.

Através da FIGURA 7, é possível notar que a tecnologia de bateria de lítio é a que predomina entre os projetos de médio porte, com 69% do total de projetos existentes. Percebe-se também que há mais diversidade de tecnologias utilizadas quando comparado com aquelas que tinham nas instalações de pequeno porte.

### 2.2.2.3 Aplicações de Armazenamento de Energia em projetos de grande porte

Os projetos de armazenamento de energia com tecnologia eletroquímica de grande porte, que compreendem equipamentos de 500 kW e 1 MW, são mostradas na TABELA 3.

TABELA 3 - Aplicações de projetos de armazenamento de energia com tecnologia eletroquímica de Médio Porte (500 kW e 1 MW)

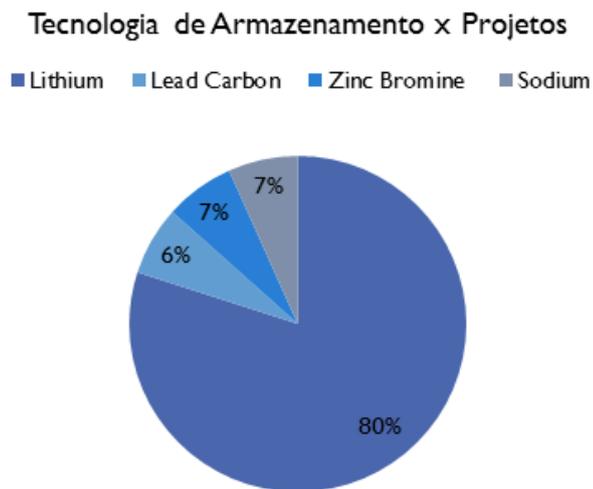
Project Name	Technology	Power in kW	Duration (HH:MM)	Service/ Use Case	Country	Grid Interconnection	Provider
Monroe Community College CES Unit for Grid Support - DTE Energy	Lithium-ion	500	0.50	Electric Bill Management with Renewables	United States	Primary Distribution	S&C
Borrego Springs Microgrid - SDG&E	Lithium Nickel Cobalt Aluminum	500	3.0	Load Following (Tertiary Balancing)	United States	Primary Distribution	Saft
Axion PowerCube for PJM (New Castle, PA)	Lead Carbon Battery	500	0.50	Frequency Regulation	United States	Secondary Distribution	Axion Power International Inc.
Toronto Hydro CES Project	Lithium Polymer	500	0.50	Demand Response	Canada	Primary Distribution	Dow Kokam
PSE Bellevue Storage Innovation Project	Zinc Bromine Flow	500	2.0	Electric Supply Capacity	United States	Primary Distribution	Primus Power
Community Energy Storage for Grid Support (Residential CES Units) - DTE Energy	Lithium-ion	500	2.0	Electric Bill Management with Renewables	United States	Secondary Distribution	Kokam
SDGE Pala SES GRC ES	Lithium-ion	500	3.0	Grid-Connected Commercial (Reliability & Quality)	United States	Primary Distribution	Greensmith
SMUD Galt Advanced Feeder Demo ESS	Lithium-ion Battery	500	0.25	Frequency Regulation	United States	Secondary Distribution	Mitsubishi
One Maritime Plaza - Advanced Microgrid Solutions	Lithium-ion Battery	500	2.0	Electric Bill Management	United States	Secondary Distribution	Tesla
CuisinArt Resort Solar Plus Storage Microgrid	Lithium-ion Battery	500	0.50	Microgrid Capability	Anguilla	Secondary Distribution	LG Chem
Long Island Bus BESS New York Power Authority	Sodium-sulfur Battery	1000	6.50	Black Start	United States	Secondary Distribution	NGK Insulators
SDG&E Carmel Valley Saft / ABB	Lithium-ion	1000	3.0	Grid-Connected Commercial (Reliability & Quality)	United States	Primary Distribution	Saft
SDG&E Julian S&C / Kokam	Lithium-ion	1000	2.30	Microgrid Capability	United States	Primary Distribution	Kokam
SDGE Borrego SES GRC ES	Lithium-ion	1000	3.0	Grid-Connected Commercial (Reliability & Quality)	United States	Primary Distribution	Saft
SDGE C1243 Ortega HWY GRC ES	Lithium-ion	1000	3.0	Stationary Transmission	United States	Primary Distribution	Greensmith

FONTE: Relatório da etapa 07 do projeto de P&D 4600056875<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Esses dados estão presentes no relatório mensal da etapa 7 do projeto de P&D da CPFL, já citado anteriormente neste documento, dentro do qual este trabalho de conclusão de curso está inserido.

Para esse porte fica evidente, olhando a TABELA 3, que existem mais projetos realizados, e a partir das tecnologias apresentadas em cada uma das instalações existentes, define-se na FIGURA 8 a porcentagem da cada tecnologia utilizada em relação ao total de projetos com baterias de 500 kW e 1 MW.

FIGURA 8 - Tecnologias de Armazenamento Eletroquímicas versus Projetos em operação para Grande Porte



FONTE: Relatório da etapa 07 do projeto de P&D 4600056875

Nos projetos envolvendo baterias de 500 kW e 1 MW, assim como para o médio porte, a tecnologia que prevalece é a de íon de lítio conforme vê-se na FIGURA 8. Entretanto para as instalações de grande porte a diferença do uso de baterias de lítio em relação às outras é bem maior, totalizando 80%.

### 2.3 REVISÃO DA LITERATURA

Para realizar a busca pelos documentos bibliográficos utilizados como base para desenvolver este trabalho foi utilizado um método proposto em Ensslin *et al.* (2011). Além disso, o acesso aos documentos selecionados foi realizado usando o apoio do Portal Periódicos da Capes. Foram selecionadas as quatro palavras-chaves, em inglês, associadas entre si de duas maneiras diferentes como pode ser visto na TABELA 4.

TABELA 4 - Definição e Associação das palavras-chaves para a realização da revisão de literatura

PALAVRAS-CHAVE	ASSOCIAÇÃO
Energy storage	(1) Energy storage AND distribution system
Distribution system	
Battery	(2) Battery AND Digsilent PowerFactory
Digsilent PowerFactory	

FONTE: A autora (2018)

Com a associação (1) da tabela acima teve-se o objetivo de buscar textos que tratassem de redes de distribuição de energia elétrica com sistemas de armazenamento de energia implantados. Já para o conjunto de palavras (2), esperava-se encontrar estudos que tivessem utilizado o software DigSILENT PowerFactory para modelar e simular baterias conectadas à rede elétrica.

Utilizou-se a ferramenta chamada de *Publish and Perish* que realiza a busca por palavras-chaves, fazendo uso da base de dados *Google Scholar*. Inicialmente foram encontrados 992 documentos para a pesquisa da associação (1) e 502 da associação (2). Então foi feito um primeiro filtro analisando a relevância dos títulos selecionados na busca, restando depois disso 73 textos da seleção inicial de (1) e 24 de (2). A segunda filtragem de relevância foi baseada na leitura dos resumos dos títulos selecionando os mais que mais se aproximavam ao tema em estudo. E então, após esse segundo filtro, restaram 13 documentos da pesquisa (1) e 4 da pesquisa (2), que foram lidos em sua integralidade, e ao final da leitura, apenas 11 documentos da pesquisa (1) e 2 da pesquisa (2) foram julgados pertinentes para realizar a revisão.

Existem vários artigos que apresentam o estado da arte de sistemas de armazenamento de energia integrados com a rede elétrica de distribuição. Em Luo, Xing et al. (2015), são apresentados os tipos de tecnologias mais utilizadas, o potencial de aplicação de cada tecnologia, os desafios para implantação e utilização das tecnologias, ajudando a guiar o leitor na escolha das tecnologias certas para cada aplicação. Já em Liangzhong et al. (2016), além da revisão dos tipos de tecnologias, suas aplicações e o desenvolvimento pelo qual vêm passando, também é abordada a eficiência e o tempo de vida de cada uma, chegando até a discussões voltadas aos desafios técnicos e econômicos a serem enfrentados quando implantadas no sistema elétrico. Outro documento que realiza uma revisão geral das tecnologias de

armazenamento de energia, suas principais funções e a importância de suas aplicações de maneira sucinta e completa é Alhamali et al. (2016).

Muitos trabalhos abordam a utilização de sistemas de armazenamento de energia com bateria em sistemas fotovoltaicos para auxiliar a rede elétrica a manter o seu bom funcionamento. Tendo em conta que neste trabalho de conclusão de curso, dois dos três sistemas em estudo possuem sistemas fotovoltaicos, é de extrema relevância analisar as pesquisas que já existem nesse contexto. Em Lamberti et al. (2015), por exemplo, avalia-se a utilização dessa composição em sistemas residenciais para aliviar o impacto do perfil da tensão. Avalia-se assim, o desvio da tensão nos momentos de penetração dos sistemas fotovoltaicos sem a bateria e com a bateria para ficar dentro dos limites exigidos, e ao final é possível perceber os benefícios em termos de qualidade energia tanto para os operadores das redes de distribuição como para os próprios consumidores residenciais. Worthmann et al. (2015) não dá um foco muito grande aos sistemas fotovoltaicos, e desenvolve algoritmos de controle (um centralizado, um descentralizado e outro simples) para controlar o uso das baterias com o objetivo de reduzir a variação da demanda de energia da rede elétrica. Os três subsistemas utilizados são residenciais, assim como o sistema de pequeno porte utilizado neste trabalho, e contêm uma geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos.

Em Calderaro et al. (2015), é feita a utilização da bateria com o principal objetivo de manter os níveis de tensão da rede que acabam ultrapassando os valores aceitáveis quando há uma penetração de fontes renováveis intermitentes alta na rede. Em um sistema de distribuição composto por um alimentador com painéis fotovoltaicos e geração eólica, a bateria é utilizada de modo a realizar uma regulação de tensão maximizando a produção de potência ativa da rede elétrica de distribuição.

Já em Pimm et al. (2018), por exemplo, utiliza-se um sistema de baterias para realizar a estratégia de *peak-shaving* (corte do pico de carga) em redes de distribuição de áreas residenciais quando há um aumento das cargas da rede e de inserção de sistemas fotovoltaicos. Um método é usado para balancear os valores de consumo ou de fornecimento de energia de modo a ficar sempre próximo aos limites da demanda.

Como pode ser concluído da seção 2.2.2, as baterias com a tecnologia de íon de lítio (Li-Ion) estão sendo amplamente utilizadas para aplicações na rede elétrica, e algumas literaturas realizaram estudos focados nelas. Em Bila et al. (2016) são apresentados resultados de 9 testes realizados em uma bateria com a tecnologia de

ion de lítio conectada a uma casa e à rede de distribuição, com o objetivo de avaliar a performance do equipamento quanto ao *State of Charge* (SOC) – em português Estado de Carga - dependendo da potência e da tensão para vários tipos de situação. Os autores de Koller et al. (2015) apresentam um caso real de aplicação de um sistema de bateria de Li-Ion de 1MW em Zurique para peak shaving, regulação frequência e operação em modo ilhado.

No estudo desenvolvido por Yunusov et al. (2016) as baterias são utilizadas com o intuito de balancear as fases e diminuir a demanda de energia em horários de pico em alimentadores de uma subestação. Através das ferramentas Matlab e Open DSS são analisados os impactos causados pela bateria em cada nó da rede de baixa tensão em apenas uma fase, em três fases independentes uma da outra, com três fases dependentes sem bateria apenas para balanceamento de fase, e em três fases dependentes com bateria. Percebe-se com os resultados que há uma diferença dependendo da localização da bateria ao longo das linhas do alimentador. A solução monofásica é mais eficiente se colocada em linhas com a menor tensão de fase, e para realizar o balanceamento das fases, a melhor localização é nas linhas mais próximas à subestação.

Dugan et al. (2016) é um artigo que possui um alinhamento de objetivos parecido com este TCC modelando um sistema bateria para realizar simulações que mostrem o impacto em intervalos de minutos e horas, assim como para eventos transitórios na ordem de segundos. Além disso, também são realizadas análises para o modo de operação peak-shaving e para o modo dinâmico, entretanto é utilizado o *software* OpenDSS para realizar as modelagens e simulações.

Entrando no âmbito de outros trabalhos desenvolvidos utilizando a ferramenta computacional *DigSILENT PowerFactory*, os autores de Hartmann; Lipták (2015) criaram um modelo de bateria genérico para poder testar as diferentes estratégias capazes de serem implementadas com baterias no sistema elétrico, desenvolvendo um modelo de bateria para realizar análises transitórias e quase-dinâmicas com o *software*. O modelo desenvolvido nesse trabalho é muito semelhante com o do *template* disponível no banco de dados da ferramenta e utilizado no presente trabalho. Não é possível saber exatamente em quais aspectos os modelos diferem, pois, os autores não disponibilizam tantas informações sobre o desenvolvimento deles. Entretanto, com as descrições feitas sobre cada um e com os resultados obtidos, percebe-se que as respostas alcançadas são muito similares.

Veerashekar et al. (2015) é outro trabalho desenvolvido com a ferramenta *PowerFactory*, e que investiga a influência de baterias em um sistema de distribuição rural. Os autores propõem um modelo de bateria que ajude a manter os perfis de tensão nas linhas dos alimentadores, o carregamento dos cabos da linha e de transformadores de distribuição, fluxo de potência entre a rede de baixa e média tensão, e perdas totais do sistema dentro de valores aceitáveis quando há a entrada massiva de geração fotovoltaica. Uma análise com e sem o sistema fotovoltaico (SFV) mais a bateria é feita em três cenários durante momentos diferentes no verão e no inverno.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, primeiramente, foram introduzidos os conceitos do que é uma rede elétrica de distribuição e sua evolução para as *smart grids*. Em seguida, uma breve revisão sobre armazenamentos de energia foi realizada passando pelos principais tipos e as tecnologias utilizadas. Também foi mostrado um levantamento das aplicações de armazenamento eletroquímico (baterias) para os sistemas de pequeno, médio e grande porte cadastradas no DOE, e quais são as tecnologias mais utilizadas em cada caso.

Por fim, realizou-se uma explicação breve sobre o método utilizado para buscar e filtrar as bibliografias da revisão da literatura, finalizando com alguns parágrafos de comentários sobre essas bibliografias.

## 3 FERRAMENTA DE ANÁLISE E MODELAGEM ELÉTRICA

### 3.1 VISÃO GERAL DA FERRAMENTA

O software escolhido para modelar os sistemas utilizados neste trabalho e realizar suas simulações foi o DlgSILENT PowerFactory, desenvolvido pela empresa DlgSILENT GmbH – Digital Simulation and Electrical Networks, tendo sua sede em Gomaringen, na Alemanha. Essa é uma ferramenta computacional voltada para engenharia com o objetivo de realizar análises de sistemas elétricos de transmissão, distribuição e industriais.

Além disso, o software foi criado com a intenção de poder ser utilizado e operado em um ambiente gráfico permitindo ao usuário criar diagramas unifilares de sistemas de potência com elementos reais utilizados nestes sistemas, podendo editar as configurações e atribuir modelos personalizados àqueles. Essas interfaces podem ser divididas basicamente entre:

- *Network Graphics* (Gráficos de Rede): ainda podem ser classificados entre Single Line Diagrams (Diagramas Unifilares), Block Diagrams (Diagrama de Blocos) e Virtual Instruments;
- *Data Manager* (Gerenciador de dados);
- Interfaces para códigos e equações.

Para redes elétricas com geração distribuída, a completa biblioteca do programa permite que o usuário utilize modelos de pré-definidos de cargas, perfis de consumo de energia, geradores e conversores, integrados a instalações com armazenamento por baterias, por exemplo, assim como modelos dinâmicos. DigSILENT (2018)

O programa utiliza um único banco de dados contendo os dados necessários para todos os equipamentos de um sistema de potência, como motores e geradores síncronos e assíncronos, transformadores, geradores estáticos para simular geradores eólicos e baterias, sistemas fotovoltaicos, fontes externas CA e CC, redes externas, cargas de média e baixa tensão, equipamentos de proteção e qualidade de energia, entre outros. Portanto, o PowerFactory é capaz de executar todas as funções de simulação de potência com apenas uma plataforma. Essas funções são análises de fluxo de carga, cálculos de curto circuito, análise de harmônicos, coordenação da proteção, análise de transitório e de estabilidade, análise quase-dinâmica, e serão explicadas em detalhes na seção 3.2 SIMULAÇÕES. DigSILENT (2017a)

O banco de dados do DPF é hierárquico e estruturado através de orientação a objetos. Com isso, elementos, diagramas, casos de estudo ("*study cases*"), cenários de operação ("*Operation Scenarios*"), comandos para cálculos, configurações de programa, entre outros, são armazenados como objetos dentro de pastas de maneira hierárquica. As pastas são organizadas de forma a facilitar a separação entre os diferentes estudos dentro de um projeto.

O *software* também possui uma linguagem própria utilizada para criar scripts com comandos para definir iterações ou rotinas de cálculo específicas para uma determinada simulação. A linguagem é chamada de *DigSILENT Programming*

*Language - DPL*. Um script DPL deve possuir algumas configurações fundamentais para o seu funcionamento como comandos para cálculo de fluxo (*'if-else'* e *'do-while'*), comandos do PowerFactory para curtos-circuitos ou fluxo de potência, rotinas de entrada e saída, expressões matemáticas, procedimentos para chamar objetos e chamadas a sub-rotinas. DlgSILENT (2017a)

## 3.2 SIMULAÇÕES

As principais análises e simulações de sistemas elétricos de potências possíveis de serem realizadas com o auxílio do DlgSILENT PowerFactory serão descritas nas seções a seguir.

### 3.2.1 Fluxo de Potência

Este tipo de simulação tem como objetivo analisar um sistema elétrico em regime permanente. Nessa análise, não são consideradas quaisquer mudanças de valores do sistema, ou seja, escolhe-se um instante de tempo fixo em que se deseja saber quais são os valores para uma determinada condição. Os dados obtidos ao final da simulação são a tensão e o seu ângulo para cada nó, e a potência ativa e reativa de cada trecho de linha.

Levando em conta esses quatro dados que podem ser calculados quando é realizada uma simulação de fluxo de potência, dependendo das duas variáveis que são definidas pelo usuário, os nós do sistema podem ser classificados de três maneiras diferentes: PV, PQ e slack ( $V\theta$ ). No primeiro caso são definidos o valor de potência ativa e tensão, no segundo das potências ativa e reativa, e por último sabe-se os valores da tensão e da fase. Ainda as equações nodais utilizadas para representar o sistema são implementadas através do método *Newton-Raphson* clássico ou de equações de correntes. O método utilizado deve ser escolhido pelo usuário e deve ser baseado no tipo de sistema elétrico que será analisado. DlgSILENT (2017a)

Complementando o método de Newton-Raphson, o *software* utiliza um *loop* externo quando são considerados transformadores com controle de *tap* automático e/ou *shunts* chaveáveis. Isso é feito porque pelo método de Newton-Raphson as tolerâncias são definidas sem levar em conta a possibilidade de mudança de valores

que possuem os dois tipos de equipamentos citados anteriormente. DIgSILENT (2017a)

Além de ser possível realizar um cálculo de fluxo de carga em CA (corrente alternada) balanceado ou desbalanceado, há também a possibilidade de realizar o cálculo em CC (corrente contínua). Essa análise não se trata de realizar um cálculo de fluxo para uma rede elétrica CC, mas sim para que se consiga analisar sistemas de transmissão que são muito complexos e precisam de uma aproximação suficientemente boa do fluxo de potência ativa. Ou ainda para casos em que o fluxo de potência CA não converge. Nesse método diferenciado, é feita uma simplificação do sistema não-linear resultante das equações nodais da rede por conta da relação existente entre a tensão e o fluxo de potência ativa em redes elétricas de alta tensão. DIgSILENT (2017a)

### 3.2.2 Cálculo de Curto-Circuito

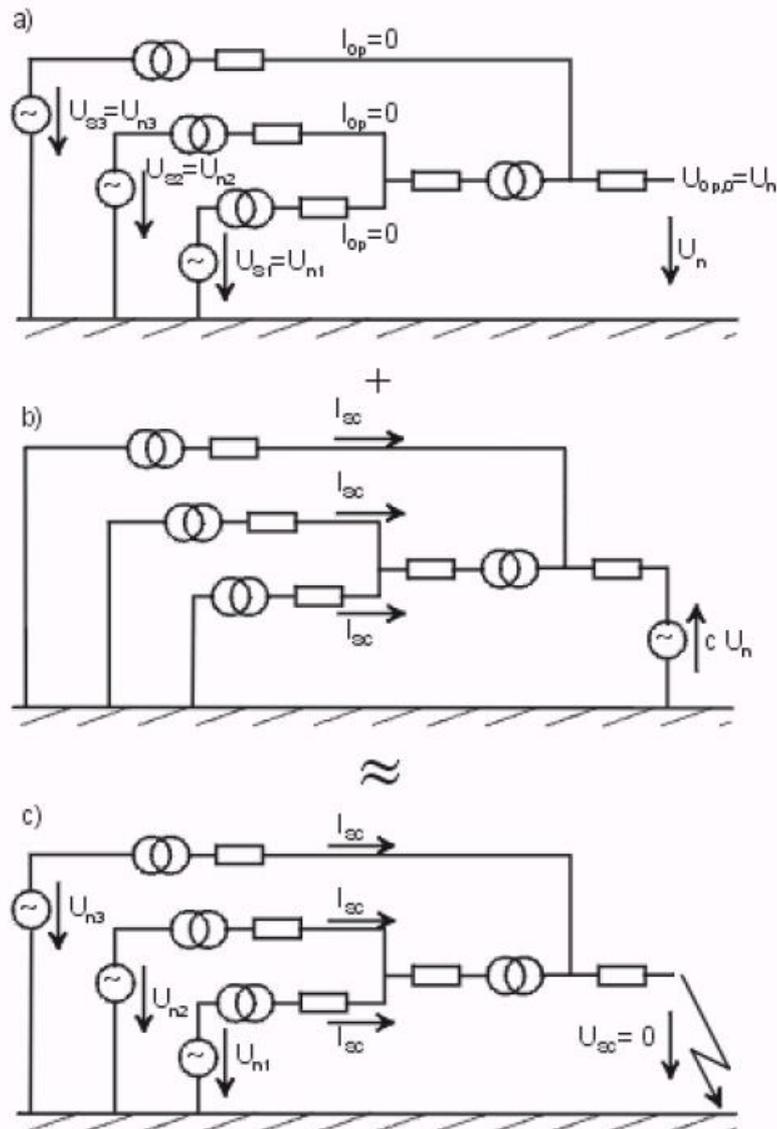
Apesar das redes elétricas serem projetadas para funcionarem de maneira segura e confiável, os sistemas continuam passíveis de falhas. Sendo assim, o cálculo de curto-circuito é utilizado para saber o comportamento de uma rede elétrica nesses momentos de instabilidade, e assim conseguir planejar a rede de forma a garantir que seus equipamentos sofram o menor dano possível e a interrupção do fornecimento de energia elétrica tenha uma duração mínima. DIgSILENT (2017a)

No *PowerFactory* é possível executar o cálculo de curto-circuito conforme os métodos IEC 60909/VDE 0102, ANSI e IEC 61363 para sistemas CA, e os métodos IEC 61660 e ANSI/IEEE 946 para os casos de redes CC. Também é possível utilizar o método da superposição (ou método completo) para analisar uma corrente de falha em situações específicas como um erro de configuração da rede ou mal funcionamento de uma proteção. DIgSILENT (2017a)

O método IEC 60909/VDE 0102 é uma simplificação do método completo e utiliza uma fonte de tensão na barra onde a falta ocorre, conforme pode ser visualizado na FIGURA 9. O principal objetivo com desse tipo de cálculo é não depender de uma simulação prévia do fluxo de carga, e ainda associada com as condições de operação no exato momento do curto-circuito. Entretanto, com essas aproximações realizadas em cima do método da superposição, para certos tipos de aplicação, chega-se a

resultados insuficientes. Assim, é necessário que fatores de correção sejam aplicados às impedâncias dos elementos do sistema. DIgSILENT (2017a)

FIGURA 9 - Ilustração do Método de Cálculo de Curto-Circuito IEC 60909/VDE 0102



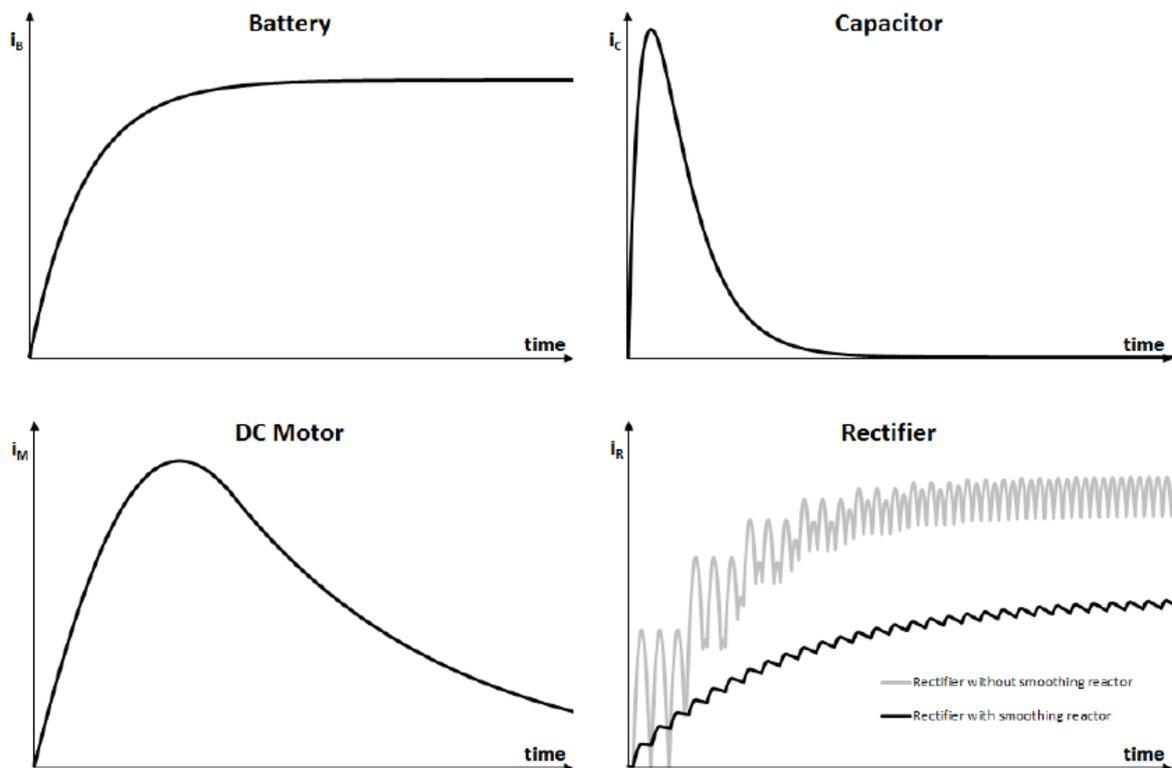
FONTE: DIgSILENT (2017a)

Dentro do método ANSI, o ANSI C37.010 é utilizado para equipamentos inseridos em redes elétricas de média e alta tensão considerando a contribuição dos geradores como locais ou remotos dependendo de onde se localiza a falta. Já para o ANSI C37.13 são considerados os procedimentos necessários para calcular curtos-circuitos em disjuntores aplicados em sistemas com menos de 1000V, considerando

principalmente dados como a tensão na barra pré-falta igual a 1 p.u., a impedância de motores e a relação X/R no local da falta. DIGSILENT (2017a)

Um dos métodos utilizados em sistemas elétricos de corrente contínua é o IEC 61660. A norma considera sistemas auxiliares em plantas de potência e subestações para tensões acima de 250 V CC. Retificadores CA trifásicos em conexão ponte, baterias estacionárias de chumbo-ácido, capacitores e motores CC com excitação independente são os equipamentos que podem ser considerados como fontes de corrente durante o cálculo de curto-circuito. Para cada uma dessas fontes, o *PowerFactory* considera uma função da corrente de curto-circuito em relação ao tempo, conforme pode ser visto na FIGURA 10. DIGSILENT (2017a)

FIGURA 10 - Gráfico das funções de tempo da corrente de curto-circuito para cada uma das fontes



FONTE: DIGSILENT (2017a)

Para sistemas auxiliares em CC para estações de potência nucleares e não-nucleares, a norma IEEE 946 é utilizada. Com ela é possível realizar a escolha correta de equipamentos conforme seus dados elétricos, interconexões, instrumentação, controle e proteção. Além disso é possível ter acesso às metodologias para o cálculo da contribuição das correntes de falta de baterias, retificadores e máquinas CC

também. Os valores calculados nessa análise são a corrente de pico de curto-circuito, corrente de curto-circuito em regime quase-permanente, constante de tempo do sistema e taxa de crescimento da corrente de curto-circuito. DIgSILENT (2017a)

### 3.2.3 Proteção

As análises relacionadas à proteção de um sistema elétrico de potência no *software* começam com a modelagem do sistema elétrico, definindo todos os seus elementos e configurando seus parâmetros. A partir do momento em que se tem o diagrama unifilar da rede elétrica que se planeja proteger, os equipamentos de proteção (relés e fusíveis) podem ser associados com os elementos da rede nos lugares apropriados. DIgSILENT (2017a)

A definição dos equipamentos pode ser feita com modelos genéricos ou com modelos baseados em produtos comerciais e específicos de certos fabricantes. A biblioteca do *PowerFactory* disponibiliza fusíveis, relés e transformadores de instrumentação genéricos que não precisam de parametrizações tão detalhadas como aqueles específicos de fabricantes. Esse tipo de modelo é muito útil para quando ainda não há uma decisão precisa de qual será o esquema de proteção adotado. DIgSILENT (2017a)

Para os projetos que já possuem um esquemático de proteção definido, recomenda-se a utilização dos equipamentos comerciais detalhados que foram ou serão empregados no sistema. Esses modelos podem ser obtidos no website da DIgSILENT através de *download*. DIgSILENT (2017a)

### 3.2.4 Quase-Dinâmica

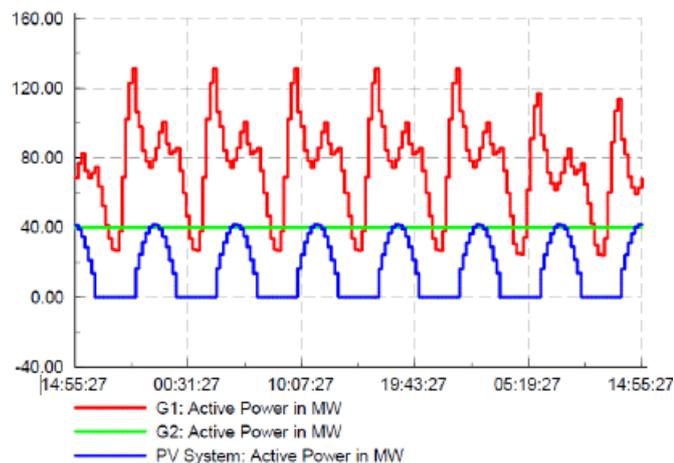
A análise Quase-Dinâmica está posicionada entre a análise de fluxo de carga e a análise dinâmica. É considerada uma ferramenta para realizar estudos que exigem a análise de simulações que tenham uma duração média ou longa. Com esse tipo de simulação é possível realizar fluxos de potência durante vários intervalos de tempo, com a flexibilidade do usuário escolher o período de tempo que deseja simular e também a duração dos intervalos de tempo. DIgSILENT (2017a)

Em vários casos, é necessário analisar o fluxo de potência de um sistema elétrico em suas diferentes condições de operação, ou seja, na dependência temporal

de diferentes etapas do seu funcionamento. Para alcançar resultados assim deve-se fazer uma modelagem da rede dependente do tempo, pois há elementos da rede que dependem do tempo. Por exemplo, cargas de um sistema que variam ao longo de um dia, sistemas fotovoltaicos que produzem energia elétrica conforme a variação da incidência do sol durante um dia, geração eólica que produz energia elétrica conforme a velocidade do vento, etc. Sendo assim, não é interessante uma análise na ordem de segundos, mas sim de minutos/horas até meses/anos. Uma simulação dinâmica pode realizar simulações que variam durante um período de tempo, mas exigem muito computacionalmente e também demandam uma quantidade de informações complexas desnecessárias nos exemplos citados anteriormente. Para isso as simulações quase-dinâmicas utilizam o conceito de variáveis de estado para definir equações diferenciais no tempo. DlgSILENT (2017a)

Um exemplo desse tipo de simulação pode ser visto na FIGURA 11. Esse é um exemplo de simulação quase-dinâmica mostrando a geração de dois geradores e um sistema fotovoltaico inseridos em uma rede elétrica ao longo de uma semana.

FIGURA 11 - Exemplo do fluxo de potência de dois geradores e um sistema fotovoltaico durante uma semana utilizando a simulação quase-dinâmica



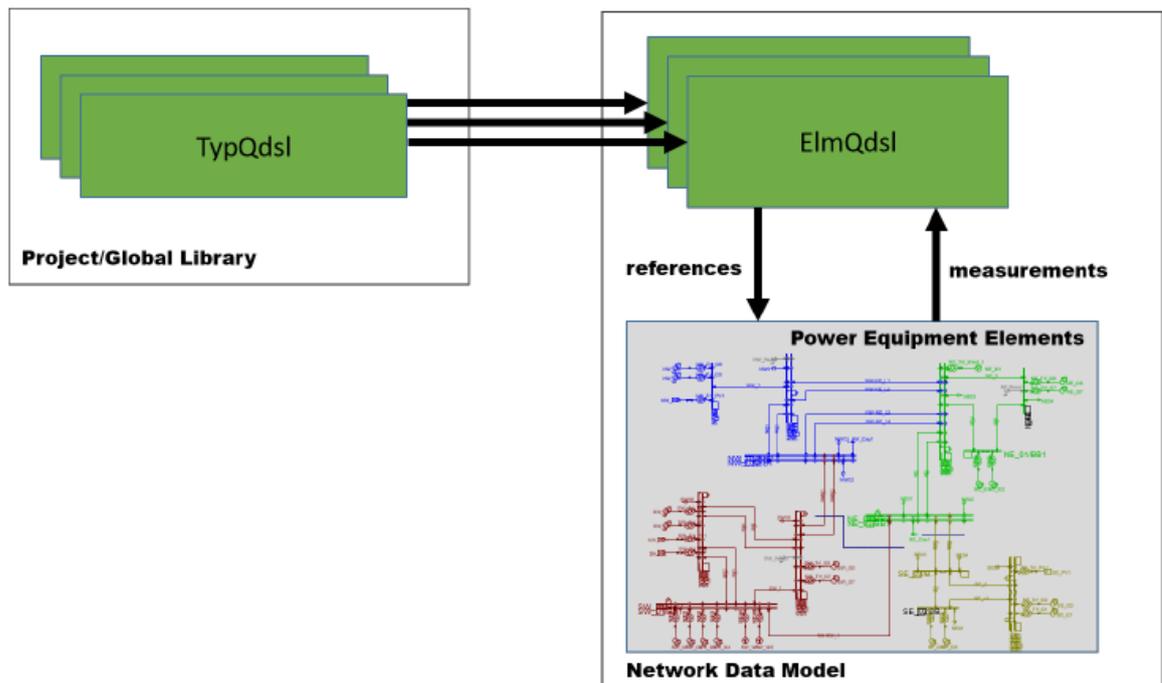
Fonte: DlgSILENT (2017a)

No *PowerFactory* é possível criar um modelo de simulação quase-dinâmica para os equipamentos do sistema de potência. Esse modelo pode ser chamado de *QDSL model* e é responsável por definir um comportamento característico para determinados elementos da rede elétrica. Além disso, o desenvolvimento desse modelo é baseado em dois objetos: a definição do projeto do modelo de simulação

Quase-Dinâmica (TypQdsl) e o próprio elemento que funcionará a partir do modelo definido para a simulação quase-dinâmica (ElmQdsl). DIgSILENT (2017a)

A criação do *QDSL model* é realizada através de *scripts* que definem a inicialização do modelo, suas equações e o seu modo funcionamento tanto para simulações de fluxo de carga como para as simulações quase-dinâmicas. Sendo assim, o *software* possibilita a integração (FIGURA 12) entre o sistema elétrico, o modelo criado (*ElmQdsl*) e o projeto com os códigos para realizar as simulações de fluxo de carga e quase-dinâmica (*TypQdsl*), o que significa que uma vez implementado no sistema, ele estará vinculado e ativo para ambos os tipos de simulação. Para desenvolver aqueles *scripts* utiliza-se a linguagem DPL descrita anteriormente. DIgSILENT (2017a)

FIGURA 12 - Esquemático mostrando a integração do *QDSL models* em um projeto do *PowerFactory*



FONTE: DIgSILENT (2017a)

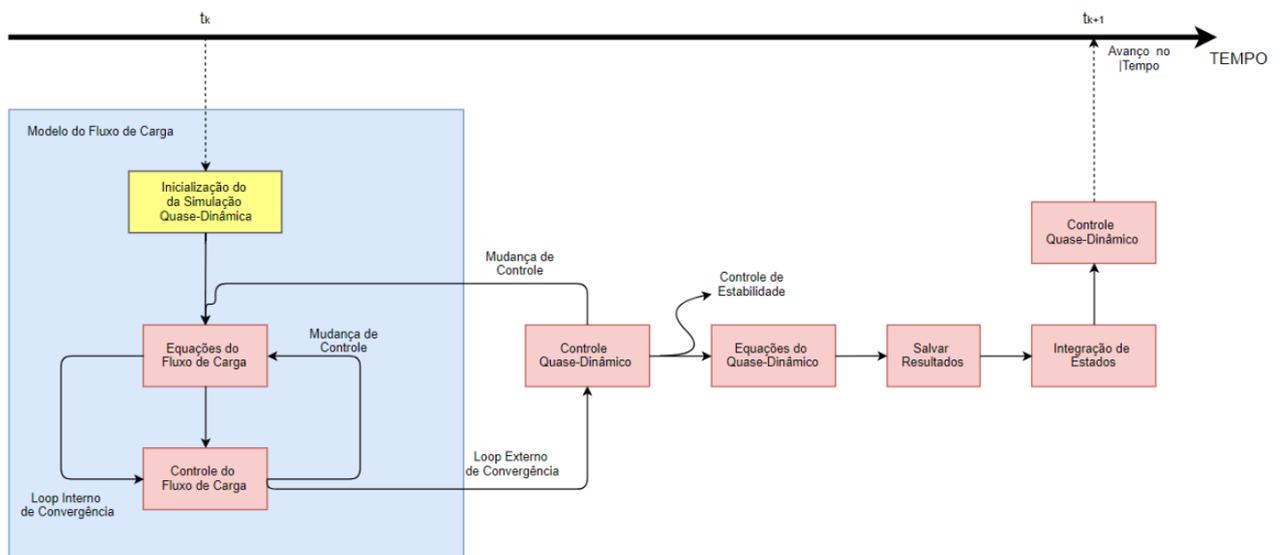
O projeto de um *QDSL model* dever ser composto pelo conjunto e interconexão das seções definidas no projeto *TypQdsl*. Sendo estas divididas entre:

- *Basic Data*: Nessa seção são definidas as variáveis, que podem ser de dois tipos: variáveis de estado e parâmetros. Os parâmetros são constantes que definem uma especificação do modelo, e os estados determinam a forma como o modelo se comporta no domínio do tempo;

- *Results*: É uma tabela onde as variáveis de resultado caracterizadas no tempo são determinadas para poderem ser gravadas durante a simulação e serem analisadas posteriormente;
- *Initialisation*: é o *script* responsável por inicializar as variáveis de estados, as variáveis de resultado e os parâmetros do modelo. A inicialização pode ser feita com um valor constante ou através de cálculos baseados em parâmetros de elementos da rede elétrica;
- *Load Flow*: existem dois *scripts* que são executados nesta seção, um nomeado *Equations* com as equações que determinam o fluxo de potência, e o *Control* com o modo como é feito o controle do fluxo de carga;
- *Quase-Dynamic Simulation*: o *script Equations* desta seção define as equações diferenciais e declara as suas variáveis de estado, sendo executado uma vez por intervalo de tempo de uma simulação. Já as ações para o controle da mudança de cada etapa do regime são feitas através do *script Control*, que pode ser executado várias vezes até que seja atingido o valor do estado de regime permanente requerido a cada intervalo de tempo. DIGSILENT (2017a)

O algoritmo que rege a interação entre as seções de um *QDSL model* para a execução de simulação quase-dinâmica pode ser visualizado no esquemático da FIGURA 13.

FIGURA 13 - *QDSL models*: Procedimentos de simulação



FONTE: Blasi (2017)

### 3.2.5 Transitórias/RMT

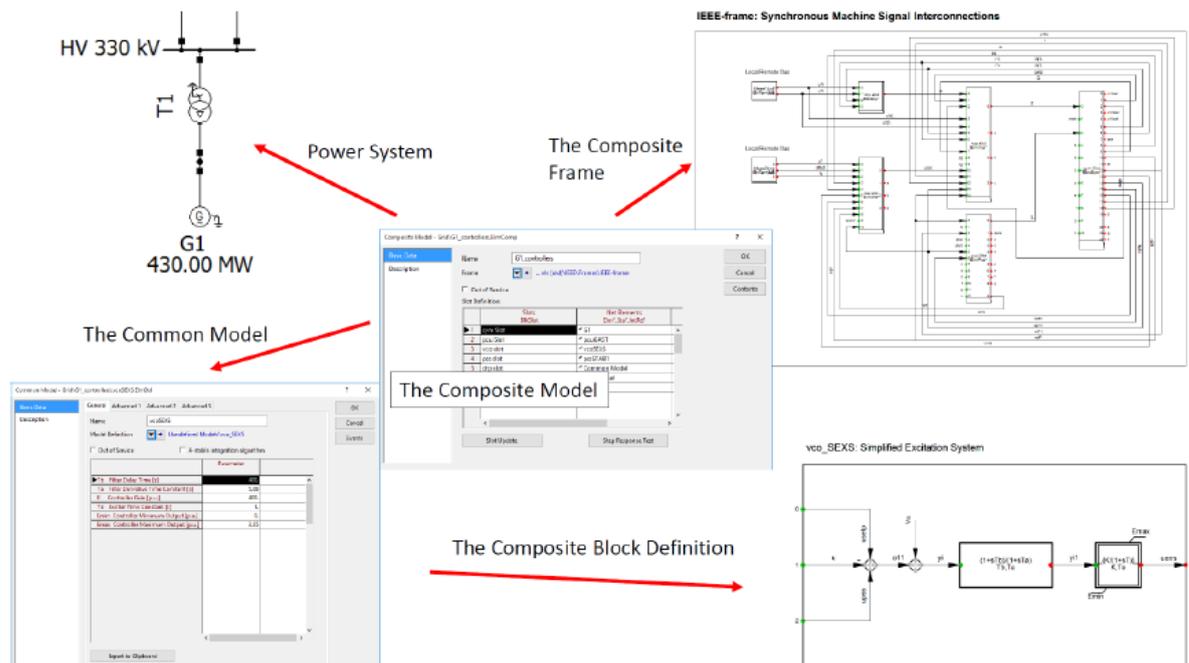
As funções transitórias de simulação presentes no DlgSILENT *PowerFactory* têm como objetivo analisar o comportamento dinâmico dos diferentes tipos de sistema de potência possíveis de serem modelados com a ferramenta. Através dessa análise, pretende-se estudar o modo como age a rede elétrica antes e depois de mudanças na carga ou na geração, durante faltas e desconexões. DlgSILENT (2017a)

O *software* disponibiliza uma biblioteca contendo diversos modelos de máquinas, controladores e equipamentos elétricos e mecânicos que podem ser utilizados e modificados para atender os projetos de cada usuário. DlgSILENT (2017a)

Essas simulações realizadas no domínio do tempo devem ser inicializadas por uma validação do fluxo de potência do sistema, com isso a ferramenta calcula as condições iniciais de todos os equipamentos e controladores do sistema de potência. As variáveis de estado derivativas precisam de requisitos que são alcançados através dos pontos de operação de regime permanente calculados com as condições iniciais. DlgSILENT (2017a)

Um esquemático mostrando os principais elementos que compõem um sistema modelado para análise de estabilidade pode ser visto na FIGURA 14.

FIGURA 14 - Esquemático mostrando os principais elementos que compõem a modelagem de um sistema para simulações dinâmicas



FONTE: DlgSILENT (2017a)

Cada um dos elementos que se encontram na FIGURA 14 podem ser descritos da seguinte forma:

- *Power System*: é o diagrama que mostra todos os elementos do sistema de forma gráfica.
- *The Composite Model/Block Definition*: responsável pelas equações de controle que definem o modo transitório para cada modelo do sistema, ou seja, são os blocos que contêm as funções que determinam o que cada bloco fará para realizar o controle do modelo.
- *The Common Model*: é o bloco onde são configurados os parâmetros com os valores corretos para cada controlador individualmente.
- *The Composite Frame*: é o diagrama que define as variáveis de entrada e saída de cada modelo, além de configurar a conexão entre eles.
- *The Composite Model*: é a parte que agrupa o diagrama e os modelos transitórios customizados em apenas um conjunto de blocos para criar o modelo composto do elemento que foi criado.

O *design* e a criação dos *common models* são realizados também através da linguagem DPL.

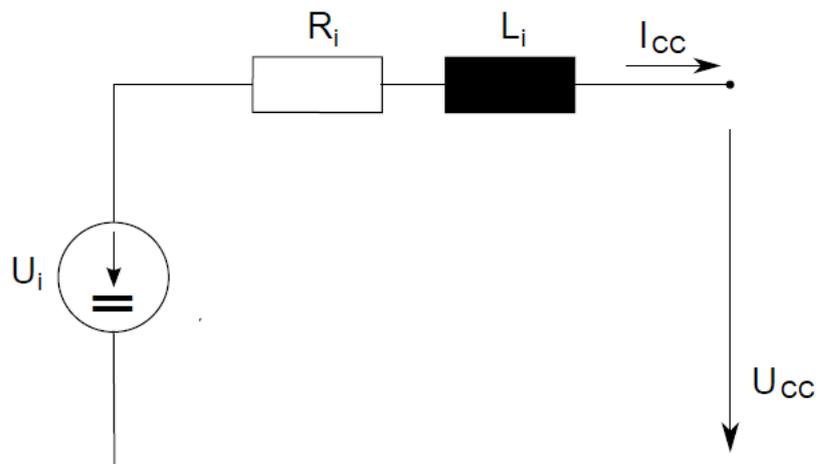
### 3.3 MODELAGEM DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

Através de *software PowerFactory* é possível utilizar diversos tipos de equipamentos elétricos e mecânicos. Eles podem ser um modelo genérico que atenda a condições reais ou modelos comerciais com características exatamente iguais aos de fabricantes. Neste trabalho, o desafio foi desenvolver um modelo de bateria para inserção na rede elétrica.

Como existe uma gama muito grande de tecnologias químicas para serem utilizadas em uma bateria, não há um modelo de fácil modelagem e precisamente válido que possa ser aplicado a todas as baterias. Um dos primeiros problemas que se encontra para modelar uma bateria é achar um modelo que não seja tão complexo, mas que consiga gerar resultados precisos. Em um segundo momento, existe a necessidade de conseguir dados de fabricantes ou medições próprias que permitam parametrizar a bateria. DlgSILENT (2010)

Sendo assim, uma bateria genérica pode ser modelada de duas formas distintas na ferramenta utilizada, como uma fonte de tensão DC ou um gerador estático. A fonte de tensão CC pode ser conectada apenas a terminais CC e tem um circuito conforme mostra a FIGURA 15. Nesse circuito, pode-se perceber a existência de uma fonte de tensão e uma impedância formada por uma resistência e um indutância. DlgSILENT (2017b)

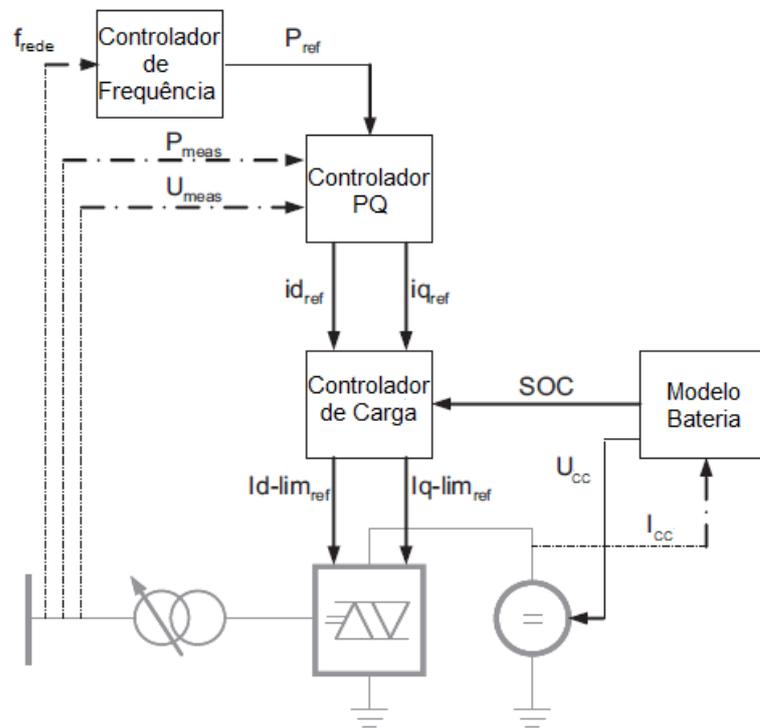
FIGURA 15 - Circuito equivalente da bateria como fonte de tensão CC



FONTE: DlgSILENT (2017b)

No caso em que se utiliza o modelo da FIGURA 15, para compor o sistema de armazenamento de energia com bateria (*battery energy storage system – BESS*) são necessários o equipamento de armazenamento e um conversor CC/CA para poder conecta-lo na rede elétrica CA. Esse conversor é um inversor e retificador ao mesmo tempo, baseado em um VSC (*Voltage Sourced Converter*) com uma modulação PWM (*Pulse Width Modulation*). O modelo completo do circuito empregado para esse tipo de aplicação pode ser visto na FIGURA 16. DlgSILENT (2010)

FIGURA 16 - Estrutura do sistema de armazenamento de energia com bateria como fonte de tensão CC utilizando um VSC



FONTE: DIgSILENT (2010)

O segundo modelo que pode ser utilizado no *software* é um gerador estático através do qual podem ser modelados diferentes equipamentos como: sistemas fotovoltaicos, células a combustível, dispositivos de armazenamento, terminais HVDC (*High Voltage Direct Current*), compensadores de potência reativa, e geradores eólicos. DIgSILENT (2017c)

Os geradores estáticos são uma forma mais prática de representar qualquer tipo de gerador não rotacional. No caso de um equipamento de armazenamento como a bateria, eles já são providos de um conversor estático, vindo daí o nome utilizado para denomina-los na ferramenta. Existe como opção de equipamento na biblioteca do *PowerFactory* um modelo de gerador já dedicado para o uso como bateria. DIgSILENT (2017a)

Neste trabalho, chegou-se à conclusão que a melhor opção para realizar as análises necessárias, levando em conta também que o foco não é a modelagem de um conversor, foi utilizar o modelo de bateria como gerador estático.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O presente capítulo apresenta uma visão geral sobre a ferramenta computacional utilizada para desenvolver a modelagem dos três sistemas elétricos em estudo e dos dois tipos de modelo de bateria que serão utilizados. Além disso, as simulações que foram utilizadas neste trabalho de conclusão de curso são definidas e descritas, assim como os modelos de bateria que podem ser considerados para análises dentro do *software*.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os métodos utilizados para obter os resultados que mostrarão o impacto elétrico das baterias nas três redes elétricas onde serão inseridas.

### 4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para chegar aos resultados são os dados elétricos do consumidor residencial, do condomínio Ipê e do alimentador da subestação de Barão Geraldo, assim como a potência e a capacidade das respectivas baterias instaladas em cada um deles. Também foi necessário utilizar a ferramenta computacional DlgSILENT *PowerFactory* para realizar as simulações.

#### 4.1.1 Dados elétricos das redes elétricas

##### 4.1.1.1 Consumidor Residencial

O sistema elétrico de pequeno porte é composto por uma residência alimentada pela rede elétrica da CPFL, o barramento de conexão com a rede elétrica de distribuição e por um SFV. O SAE com baterias será inserido em paralelo com a residência e a jusante do quadro de medição de energia elétrica da CPFL.

O circuito elétrico residencial possui os seguintes dados elétricos para serem especificados:

- Potência da Rede Externa: determinada pela potência do transformador de distribuição a montante;
- Tensão de alimentação da residência: definida pela saída de tensão do secundário do transformador de distribuição a montante;
- Medições no quadro de medição: consumo de potência ativa da residência.

Os dados elétricos necessários para modelar a rede elétrica de pequeno porte foram fornecidos pela CPFL e podem ser vistos na TABELA 5 - Dados Elétricos do circuito do Consumidor residencial.

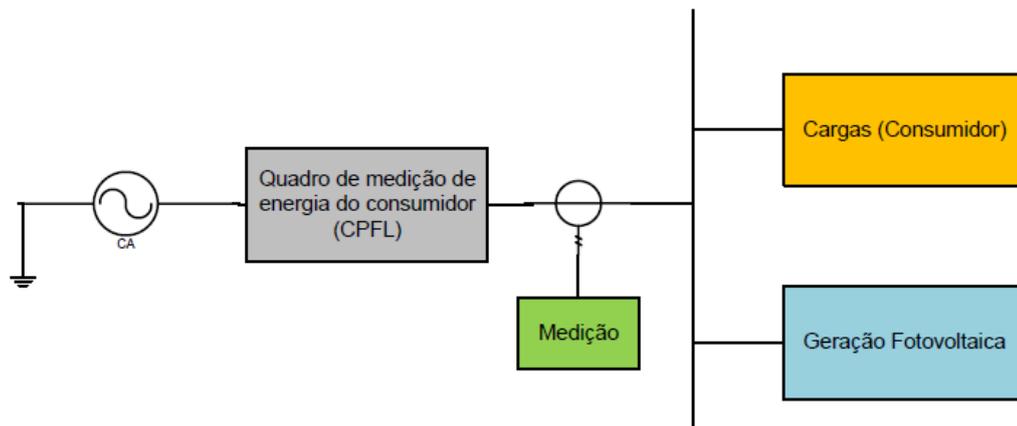
TABELA 5 - Dados Elétricos do circuito do Consumidor residencial

Dados Elétricos	Valores
Potência da rede externa	0,075 MVA
Tensão de alimentação da residência	127/220 VAC

FONTE: A autora (2018)

Também foram realizadas medições para poder saber o perfil de consumo da residência. O equipamento de medição foi instalado conforme a FIGURA 17.

FIGURA 17 - Esquema de medição das características de consumo da residência



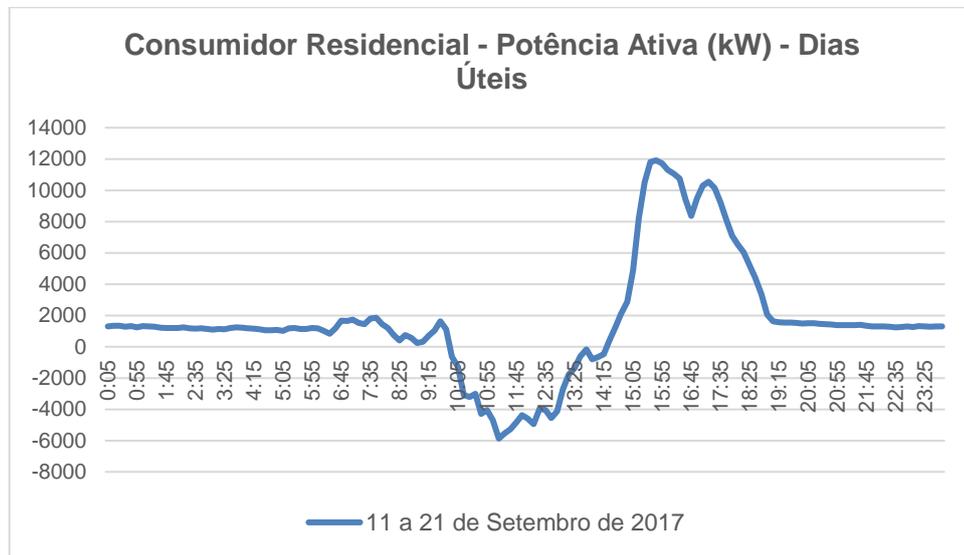
FONTE: Relatório da etapa 43 do projeto de P&D 4600056875<sup>6</sup>

As medições de potência ativa consumida foram realizadas durante o período de 11 a 21 de setembro de 2017. A média dos valores obtidos durante o período foram

<sup>6</sup> Esses dados estão presentes no relatório mensal da etapa 43 do projeto de P&D da CPFL, já citado anteriormente neste documento, dentro do qual este trabalho de conclusão de curso está inserido.

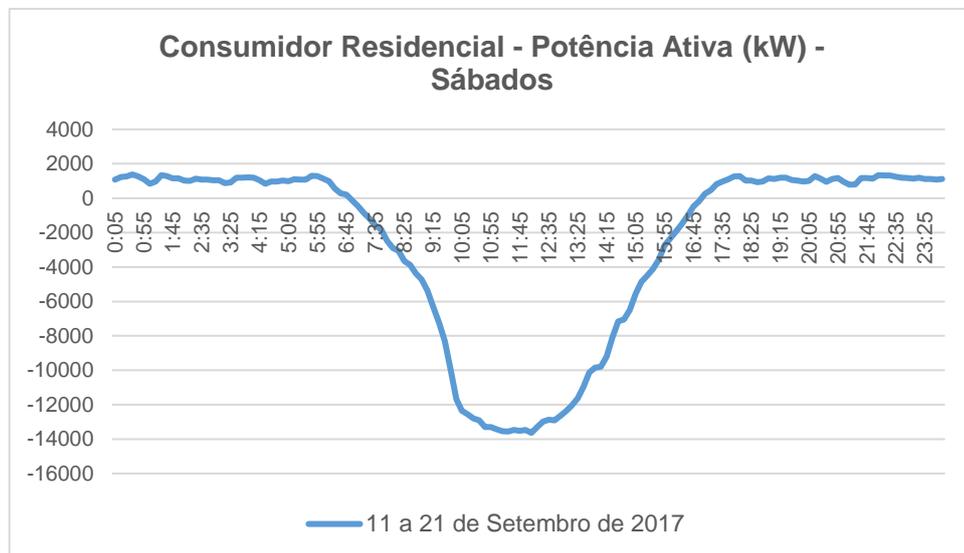
divididos entre dias úteis, sábados e domingos, resultando nas curvas de carga da FIGURA 18, da FIGURA 19 e da FIGURA 20.

FIGURA 18 - Curva característica da potência ativa na residência durante os dias úteis do período especificado



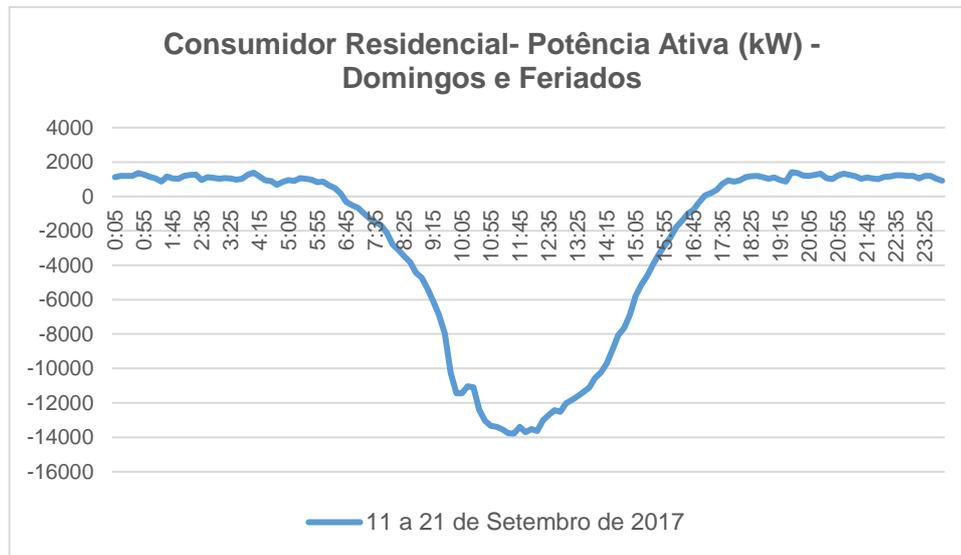
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 19 - Curva característica da potência ativa na residência durante os sábados do período especificado



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 20 - Curva característica da potência ativa na residência durante os domingos do período especificado



FONTE: A autora (2018)

É possível perceber através das curvas de consumo das residências que entre o período incidência solar nos painéis fotovoltaicos, há mais energia elétrica gerada do que consumida, resultando em valores de potências negativas.

Em um primeiro momento, a bateria utilizada no sistema de pequeno porte terá como dados elétricos uma potência de 5 kVA e uma capacidade 5 kWh.

#### 4.1.1.2 Condomínio dos Ipês

O sistema elétrico de médio porte é representado por uma rede externa, um transformador de distribuição, um barramento que representa o Condomínio dos Ipês, a carga dos consumidores desse condomínio, um sistema fotovoltaico composto por quinze painéis e a bateria em paralelo com a carga.

O circuito elétrico do Condomínio Ipê possui alguns dados elétricos importantes para que possam ser realizadas as simulações, são eles:

- Potência da Rede Externa (definida pela potência nominal do transformador de distribuição);
- Tensões das duas barras do sistema de médio porte;
- Dados elétricos do transformador de distribuição;
- Medições de consumo: consumo de potência ativa do condomínio.

Os dados elétricos necessários para modelar a rede elétrica de pequeno porte foram fornecidos pela CPFL e podem ser vistos na TABELA 6.

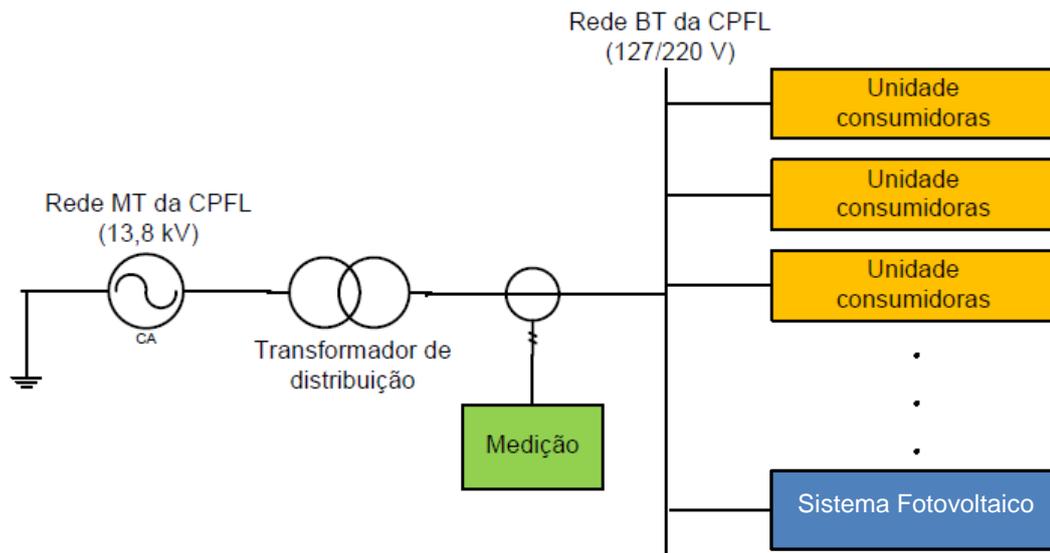
TABELA 6 - Dados Elétricos do circuito do Condomínio dos Ipês

Dados elétricos da subestação fornecidos	Valores
Potência da rede externa	0,040 MW
Tensão barra Alimentador	11,9 kV
Tensão barra Condomínio Ipê	220/127 V
Potência do Transformador de distribuição	0,075 MVA
Potência de curto-circuito trifásica do transformador ( $S_{cc3\phi}$ )	25,67 MVA
Potência de curto-circuito fase-terra do transformador ( $S_{cc1\phi}$ )	22,96 MVA
Impedância série do transformador ( $Z_{série}$ )	$3,43210877 + j4,20799254 \Omega$
Impedância mútua do transformador ( $Z_{mútua}$ )	$0,10414324 + j0,75937847 \Omega$

FONTE: A autora (2018)

Também foram realizadas medições para poder saber o perfil de consumo do condomínio. O equipamento de medição foi instalado conforme a FIGURA 21.

FIGURA 21 - Esquema de medição das características de consumo do condomínio

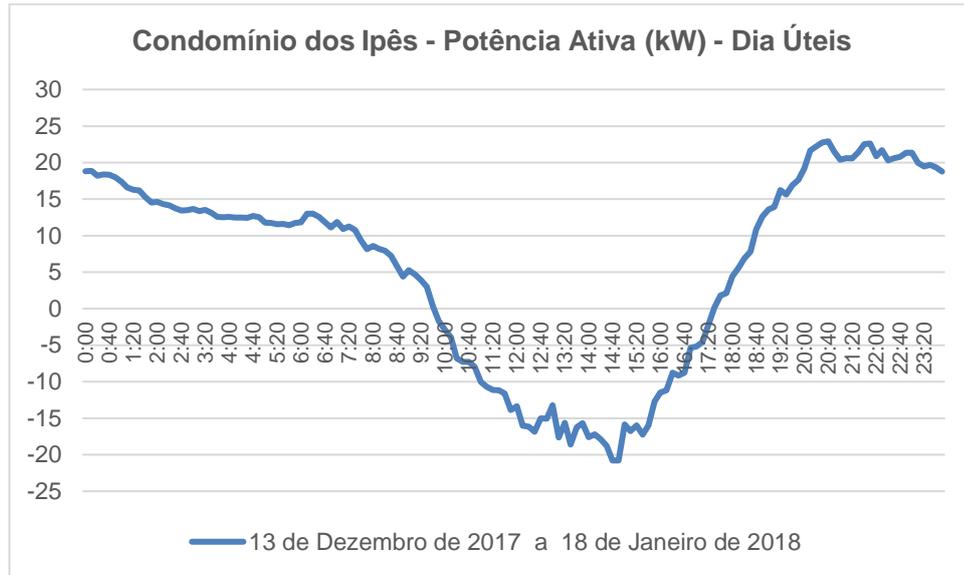


FONTE: Relatório da etapa 43 do projeto de P&D 4600056875<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Esses dados estão presentes no relatório mensal da etapa 43 do projeto de P&D da CPFL, já citado anteriormente neste documento, dentro do qual este trabalho de conclusão de curso está inserido.

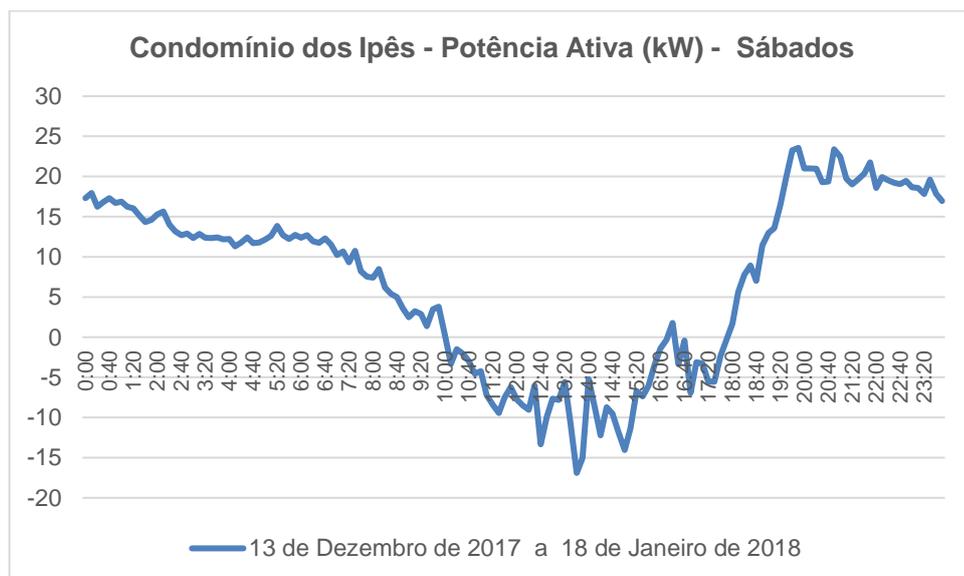
As medições de potência ativa consumida foram realizadas durante o período de 13 de dezembro de 2017 a 18 de janeiro de 2018. A média dos valores obtidos durante o período foram divididos entre dias úteis, sábados e domingos, resultando nas curvas de carga mostradas na FIGURA 22, FIGURA 23 e FIGURA 24.

FIGURA 22 - Curva característica da potência ativa para o Condomínio Ipê durante os dias úteis do período especificado



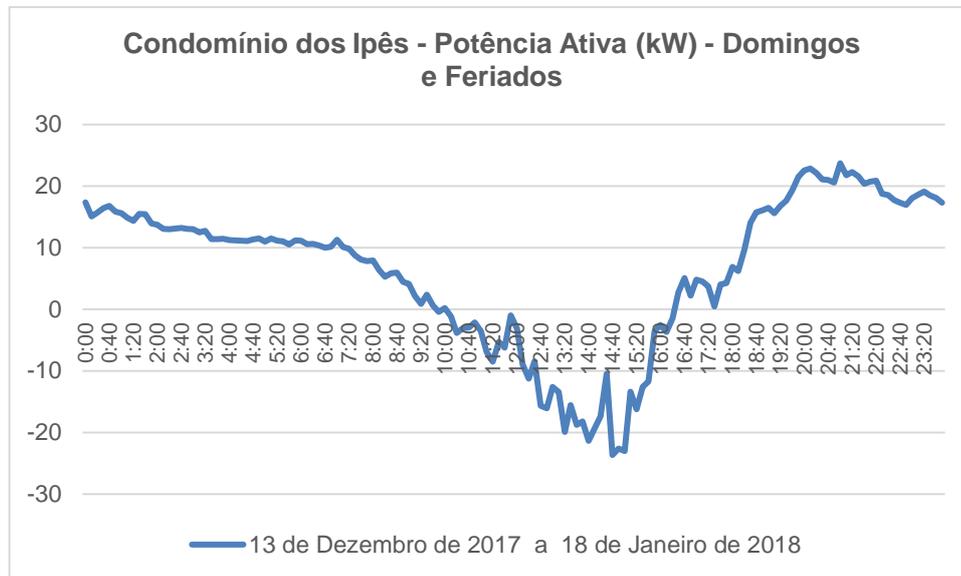
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 23 - Curva característica da potência ativa para o Condomínio Ipê durante os sábados do período especificado



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 24 - Curva característica da potência ativa para o Condomínio Ipê durante os domingos e feriados do período especificado



FONTE: A autora (2018)

Assim como o consumidor residencial, o condomínio dos Ipês possui uma curva de consumo com valores negativos por conta da presença do sistema fotovoltaico.

O SAE que será instalado no condomínio terá uma potência de 50 kW e uma capacidade de 225 kWh.

#### 4.1.1.3 Alimentador

O sistema elétrico de grande porte é constituído pela rede elétrica da subestação de Barão Geraldo em Campinas composta por basicamente dois transformadores e nove alimentadores. O sistema de armazenamento de energia (SAE) será inserido em paralelo com um desses alimentadores, chamado de alimentador BGE09.

Os dados elétricos da subestação de Barão Geraldo utilizados para realizar a simulação podem ser vistos na TABELA 7, sendo eles:

- Potência da Rede Externa da subestação;
- Tensões em cada barra da subestação;
- Potências dos transformadores da subestação;
- Potência/corrente e impedância de curto circuito dos transformadores;

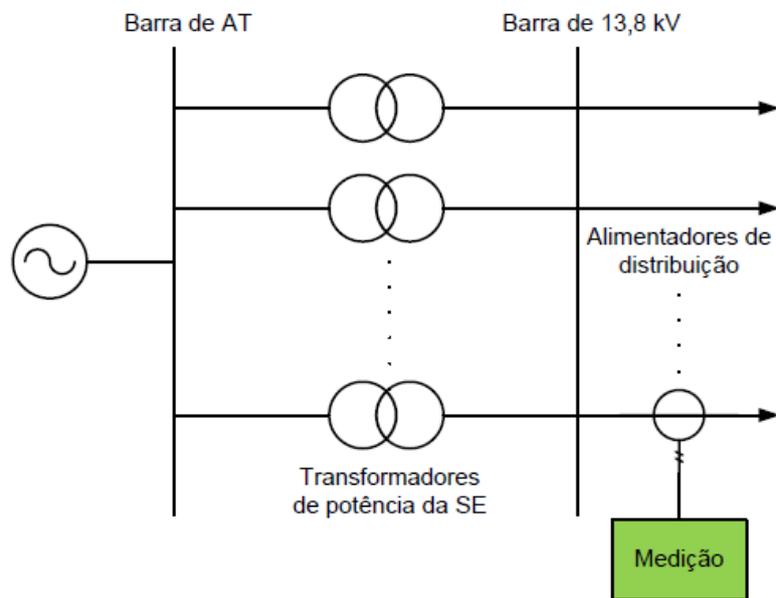
TABELA 7 - Dados Elétricos completos da subestação de Barão Geraldo

Dados elétricos da subestação	Valores
Tensão barra principal	138kV
Tensão barras 1 e 2	11,9kV
Potência do Transformador TR1	25MVA
Potência do Transformador TR2	26,6MVA
Potência de curto-circuito trifásico dos Transformadores TR1 e TR2 ( $S_{cc}$ )	666,67 MVA
Impedância percentual dos Transformadores G1 e G2 ( $Z\%$ )	12 pu
Relação X/R do Transformador TR1	163,09 $\Omega$
Relação X/R do Transformador TR2	163,71 $\Omega$

FONTE: A autora (2018)

Assim como para os sistemas de pequeno e médio porte, também foram realizadas medições para poder saber o perfil de carga do alimentador BGE09. As medições foram realizadas segundo o esquemático da FIGURA 25.

FIGURA 25 - Esquema de medição das características da carga do alimentador BGE09

FONTE: Relatório da etapa 43 do projeto de P&D 4600056875<sup>8</sup>

Os dados medidos foram obtidos durante todo o ano de 2017, e os valores repassados pela CPFL são a média anual desses valores divididos entre dias úteis

<sup>8</sup> Esses dados estão presentes no relatório mensal da etapa 43 do projeto de P&D da CPFL, já citado anteriormente neste documento, dentro do qual este trabalho de conclusão de curso está inserido.

sábados e domingos. Obteve-se ao final as curvas características das figuras FIGURA 26, FIGURA 27 e FIGURA 28.

FIGURA 26 - Curva característica da potência ativa para o alimentador BGE09 durante os dias úteis do período especificado



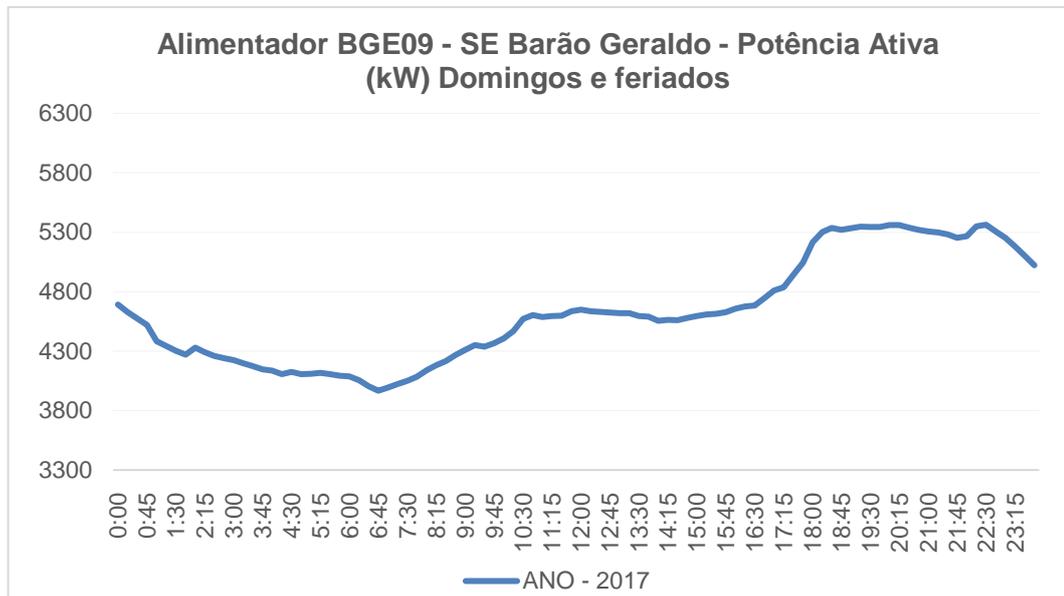
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 27 - Curva característica da potência ativa para o alimentador BGE09 durante os sábados do período especificado



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 28 - Curva característica da potência ativa para o alimentador BGE09 durante os domingos e feriados do período especificado



FONTE: A autora (2018)

O sistema de bateria que será instalado em paralelo com o alimentador BGE09 terá uma potência de 1 MVA e capacidade de 1 MWh.

#### 4.1.2 Ferramenta Computacional

A ferramenta computacional utilizada para realizar a modelagem das redes elétricas de pequeno, médio e grande porte, assim como o sistema de armazenamento de energia com baterias foi o *DIGSILENT PowerFactory*. Ele é um *software* que necessita de uma licença para ser utilizado, a qual foi adquirida pelo Lactec. Como foi citado no capítulo 3, a ferramenta permite realizar diversos tipos de análises e simulações seguindo padrões internacionais, e quando são utilizados dados corretos, é possível obter resultados extremamente confiáveis.

## 4.2 MÉTODOS

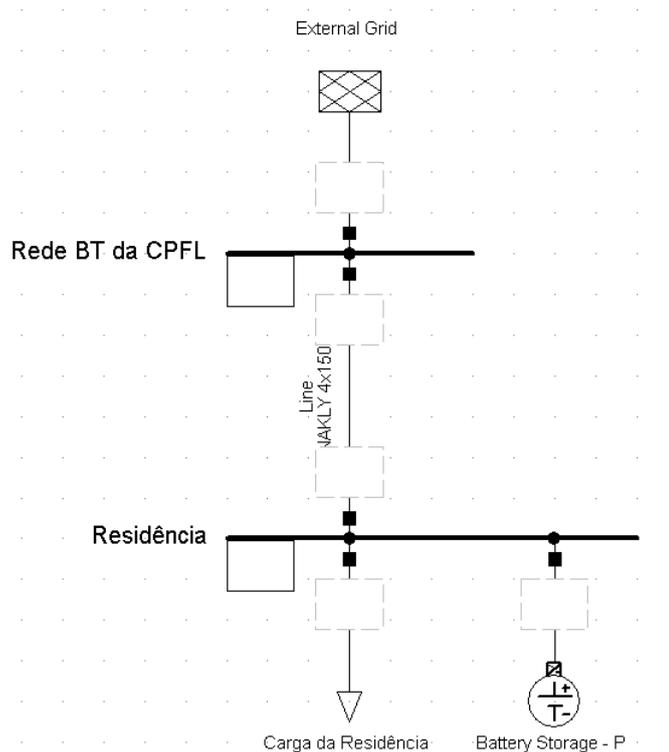
Nesta seção, primeiramente, será explicado como foi realizada a modelagem dos três sistemas elétricos a partir dos dados mostrados para cada um no capítulo 4.1.

Em seguida, dois tipos de modelos de controle para os sistemas de baterias com funcionalidades distintas são demonstrados.

#### 4.2.1 Modelagem das Redes Elétricas

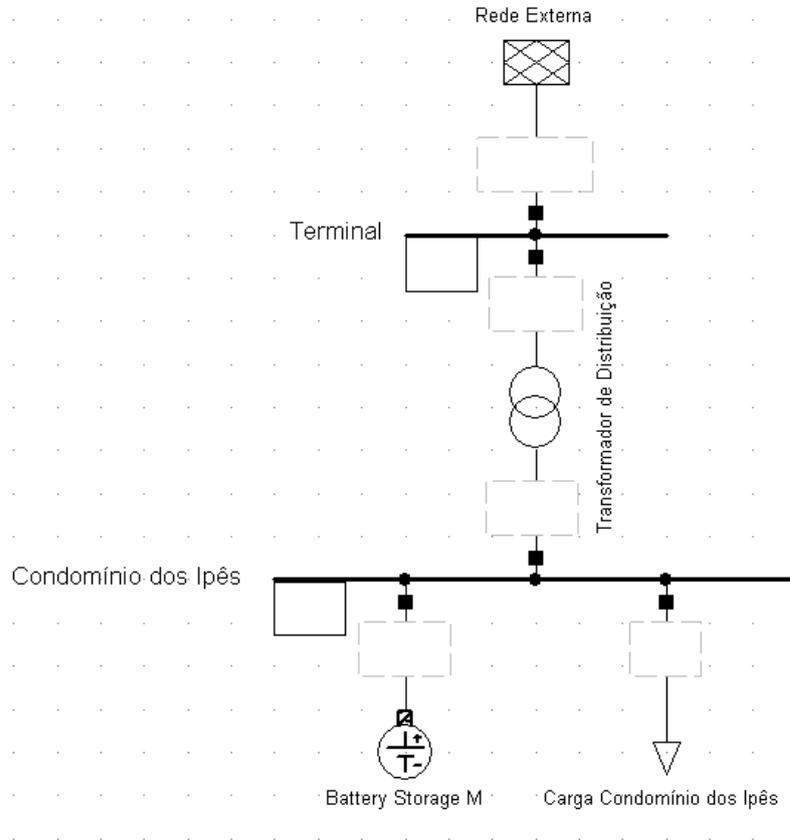
Conforme já foi comentado anteriormente, os sistemas de bateria serão instalados em três partes diferentes do sistema elétrico de distribuição: em um consumidor residencial, no secundário de um transformador de distribuição que atende um condomínio e no alimentador de uma subestação. Fazendo uso dos dados apresentados na seção 4.1.1, as três redes elétricas foram modeladas conforme a FIGURA 29, FIGURA 30 e FIGURA 31.

FIGURA 29 - Sistema Elétrico de Pequeno Porte modelado no *software PowerFactory*



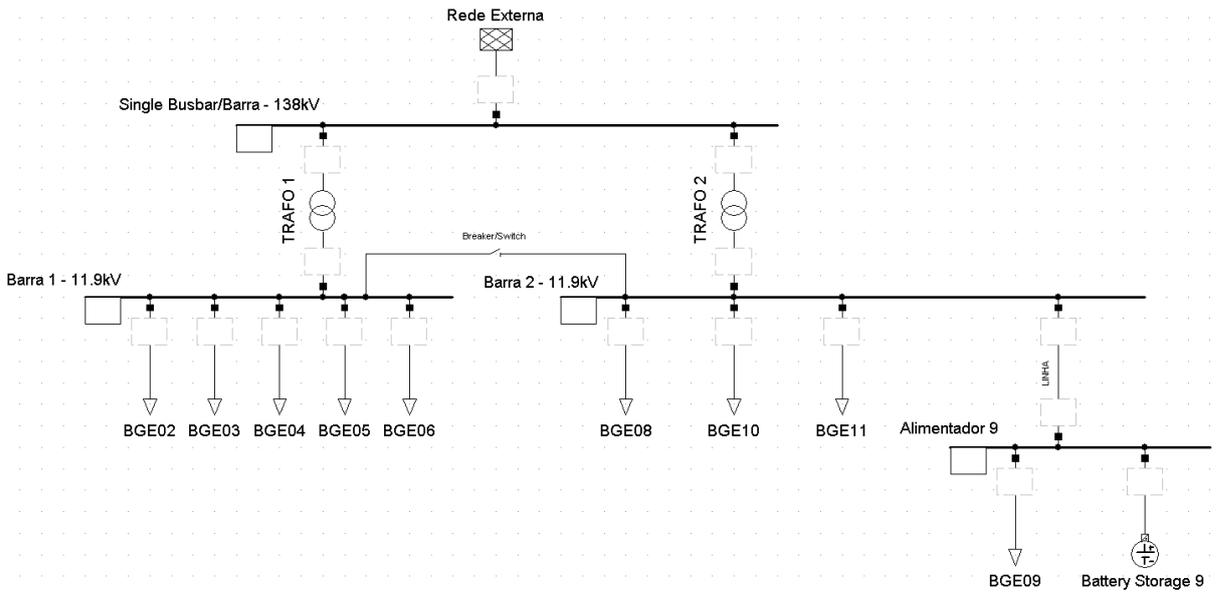
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 30 - Sistema Elétrico de Médio Porte modelado no *software PowerFactory*



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 31 - Sistema Elétrico de Grande Porte modelado no *software PowerFactory*



FONTE: A autora (2018)

O elemento Rede Externa é a representação da rede elétrica que precede cada um desses sistemas, a linha de subtransmissão para o de grande porte, as linhas de distribuição do alimentado para o de médio porte e o transformador de distribuição para o de pequeno porte.

Em cada uma das cargas dos circuitos são entradas associadas suas respectivas curvas de potência ativa mostradas na seção 4.1.1.

#### 4.2.2 Modelagem das Baterias

Além da definição do tipo de equipamento a ser utilizado para representar a bateria, também é necessário atribuir um modelo para caracterizar o controle da bateria de modo a definir como o equipamento vai funcionar dependendo das características do sistema. Para as análises que serão utilizadas neste trabalho serão necessários dois tipos de controle, um para realizar a análise quase-dinâmica e outro para realizar a análise dinâmica.

Na análise quase-dinâmica, deseja-se implementar um controle para que a bateria exerça o modo de operação *peak-shaving*, que tem o intuito de diminuir a potência ativa de um sistema elétrico, tornando a curva de carga mais plana, e assim reduzir a carga demandada da rede elétrica em horários de pico.

O modelo utilizado para a análise dinâmica tem o objetivo de auxiliar a rede elétrica a manter sua estabilidade reagindo de forma rápida em eventos que causam afundamento de tensão, como é o caso de quando ocorrem curtos-circuitos. Esse modo de operação de um SAE é chamado de regulação de tensão.

É importante ressaltar que os modelos utilizados para ambas as análises citadas podem ser encontrados na biblioteca do *PowerFactory*. Neste trabalho, os dois modelos passaram por pequenas modificações para se adaptarem aos três sistemas que estão sendo analisados e às necessidades deste trabalho de conclusão e curso. Nos capítulos a seguir esses modelos de controle dos SAEs serão descritos.

##### 4.2.2.1 Modelo para Simulação Quase-Dinâmica

Para as simulações quase-dinâmicas, conforme foi explicado na seção 3.2.4, o controle funcionará de maneira que cada variação do tempo será considerada um estado do regime permanente. Para analisar a bateria durante o período de um dia,

por exemplo, esse tipo de modelo permite a visualização do comportamento do equipamento a cada intervalo de tempo, que pode ser definido em minutos ou horas.

O modelo utilizado para este tipo de análise utiliza os valores de potência ativa demandada pela carga do sistema onde está inserido, como parâmetros para injetar ou absorver potência ativa e reativa da rede elétrica. Esses parâmetros e outras variáveis necessárias para a simulação podem ser encontradas na seção *Basic Data* do modelo e podem ser vistas junto com suas descrições na TABELA 8.

TABELA 8 - Variáveis parametrizáveis do modelo Quase-Dinâmico

1	variável de estado	SOC	%	Estado da Carga da Bateria
2	parâmetros	Eini	MWh	Capacidade da Bateria
3	parâmetros	SOCini	%	Estado de Carga Inicial
4	parâmetros	SOCmin	%	Estado de Carga mínimo
5	parâmetros	SOCmax	%	Estado de Carga máximo
6	parâmetros	Pstore	MW	Potência Ativa Nominal de armazenamento
7	parâmetros	Qstore	MVAR	Potência Reativa Nominal de armazenamento
8	parâmetros	PFullStore	MW	Potência Ativa da carga para a bateria totalmente carregada
9	parâmetros	PStartStore	MW	Potência Ativa da carga para a bateria começar a carregar
10	parâmetros	Pfeed	MW	Potência Ativa Nominal de alimentação
11	parâmetros	Qfeed	MVAR	Potência Reativa Nominal de alimentação
12	parâmetros	PStartFeed	MW	Potência Ativa da carga para a bateria começar a descarregar
13	parâmetros	PFullFeed	MW	Potência Ativa da carga para a bateria descarregada
14	parâmetros	orientation		Direção do fluxo de potência (1 ou -1) -> Bateria como carga ou gerador

FONTE: Adaptado de DIgSILENT (2017a)

Conforme foi descrito na seção 3.2.4, o *QDSL model* precisa da execução de alguns *scripts*, que são escritos através da linguagem DPL. Para o caso de modelagem da bateria que foi utilizada neste trabalho, os códigos e uma breve explicação do funcionamento desses *scripts* serão descritas através de fluxogramas.

O *Initialisation* é o primeiro bloco a ser executado onde os parâmetros, as variáveis de estado e as variáveis de resultado são inicializadas, assim como os modos de operação *chargeP* e *chargeE* (carregando/d Descarregando) e o SOC (*State of Charge* ou Estado de carga) da bateria.

Os modos de operação são definidos da seguinte maneira:

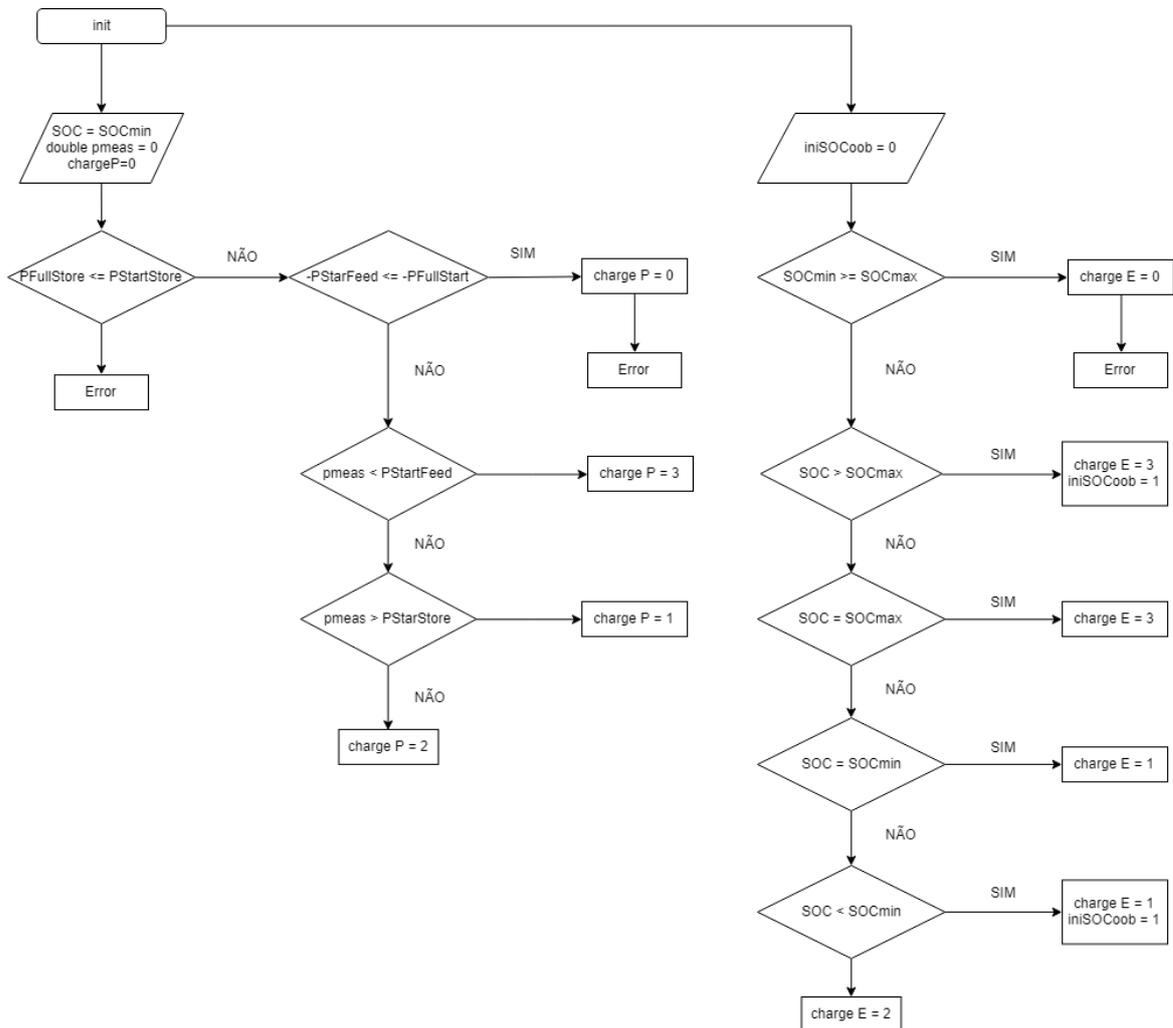
$$chargeP = \begin{cases} 1, & \text{bateria carregando} \\ 2, & \text{bateria inativa} \\ 3, & \text{bateria descarregando} \end{cases}$$

$$chargeE = \begin{cases} 1, & SOC \leq SOC_{min} \\ 2, & SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \\ 3, & SOC \geq SOC_{max} \end{cases}$$

Os cálculos dessa seção são realizados conforme o fluxograma da FIGURA

32.

FIGURA 32 - Fluxograma do script *Initilisation*

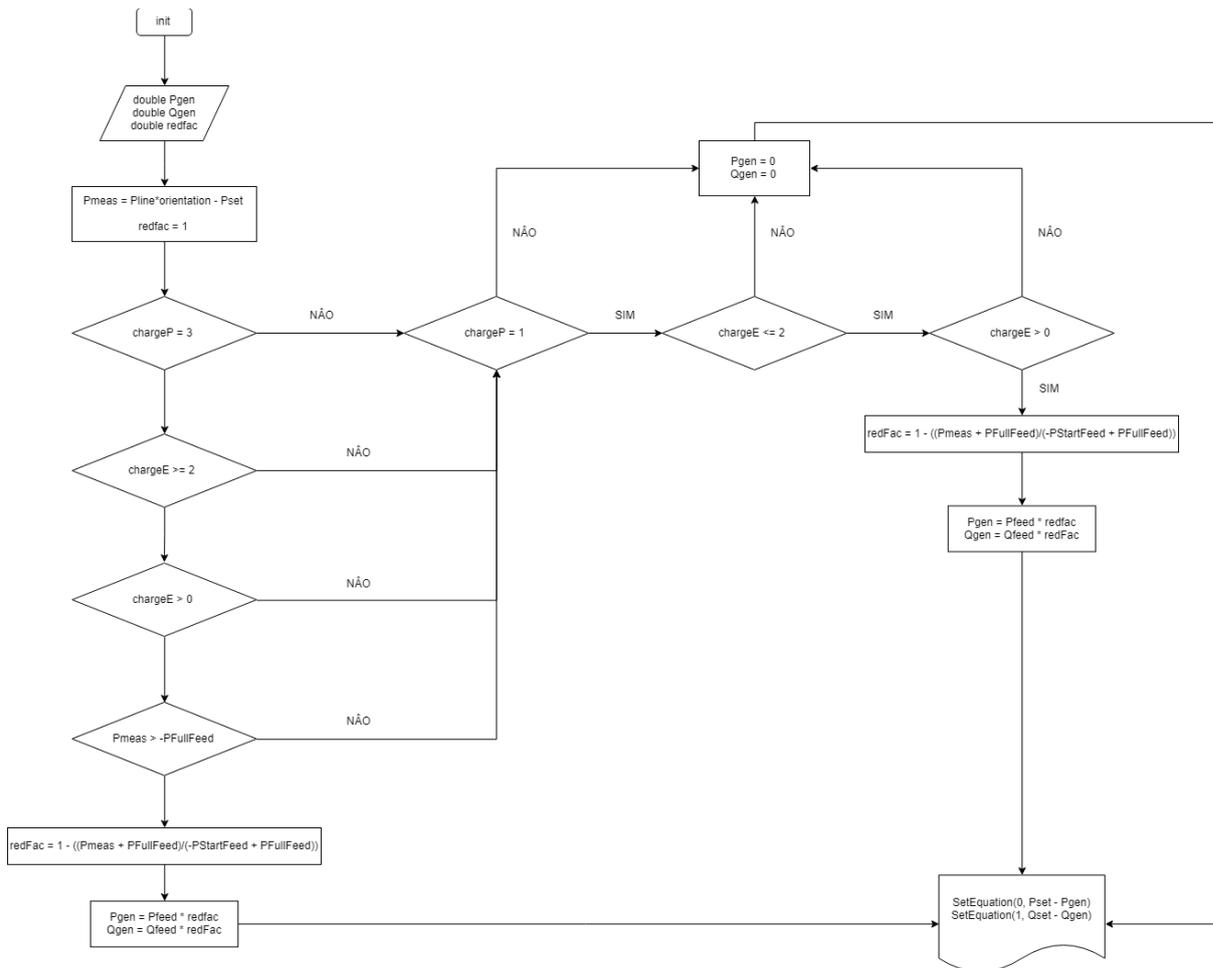


FONTE: A autora (2018)

No script *Load Flow Equations* são definidas a *input* ( $P_{line}$ ) medida e associada ao objeto que define a linha que precede o terminal onde se encontra a bateria, e duas *outputs* ( $P_{set}$  e  $Q_{set}$ ) associadas ao objeto que define o elemento da bateria no sistema e que irão determinar os valores da potência ativa e reativa a cada intervalo de tempo da simulação. Nesse script os modos de operação (*chargeP* e *chargeE*), o estado de

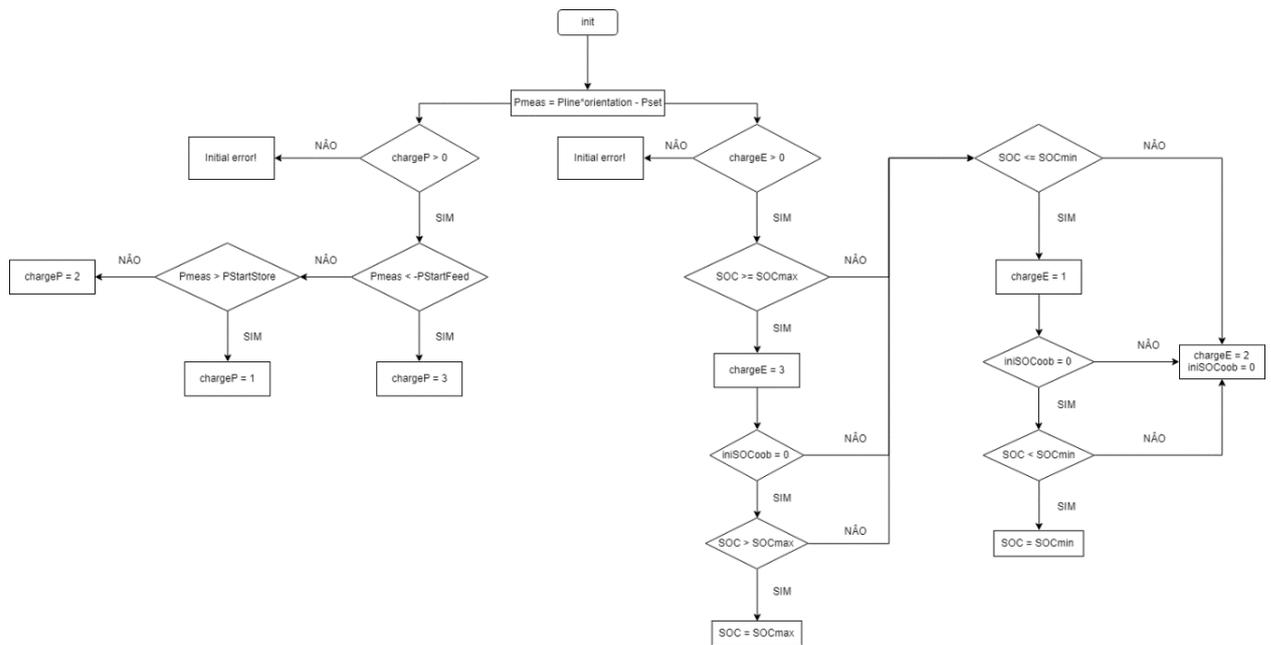
carga (SoC) e as *flags* operacionais não são alteradas. Sendo assim, o que se calcula nesta etapa é o valor de potência ativa e reativa sendo consumida ou gerada pela bateria dependendo do modo de operação em que ela se encontra. Esses cálculos são executados conforme o fluxograma da FIGURA 33.

FIGURA 33 - Fluxograma do *script Load Flow Equations*



FONTE: A autora (2018)

Na seção *Load Flow Control* é realizada uma verificação da convergência do algoritmo de controle do *loop* externo do fluxo de carga. As variáveis *chargeP* e *chargeE* devem ser modificadas para seguir os pontos de operação corretos, pois através das medições das potências no terminal onde a bateria está conectada é determinado se ela estará em modo de carregamento ou descarregamento. A forma como essas mudanças são realizadas pode ser vista no fluxograma da FIGURA 34.

FIGURA 34 - Fluxograma do *script Load Flow Control*

FONTE: A autora (2018)

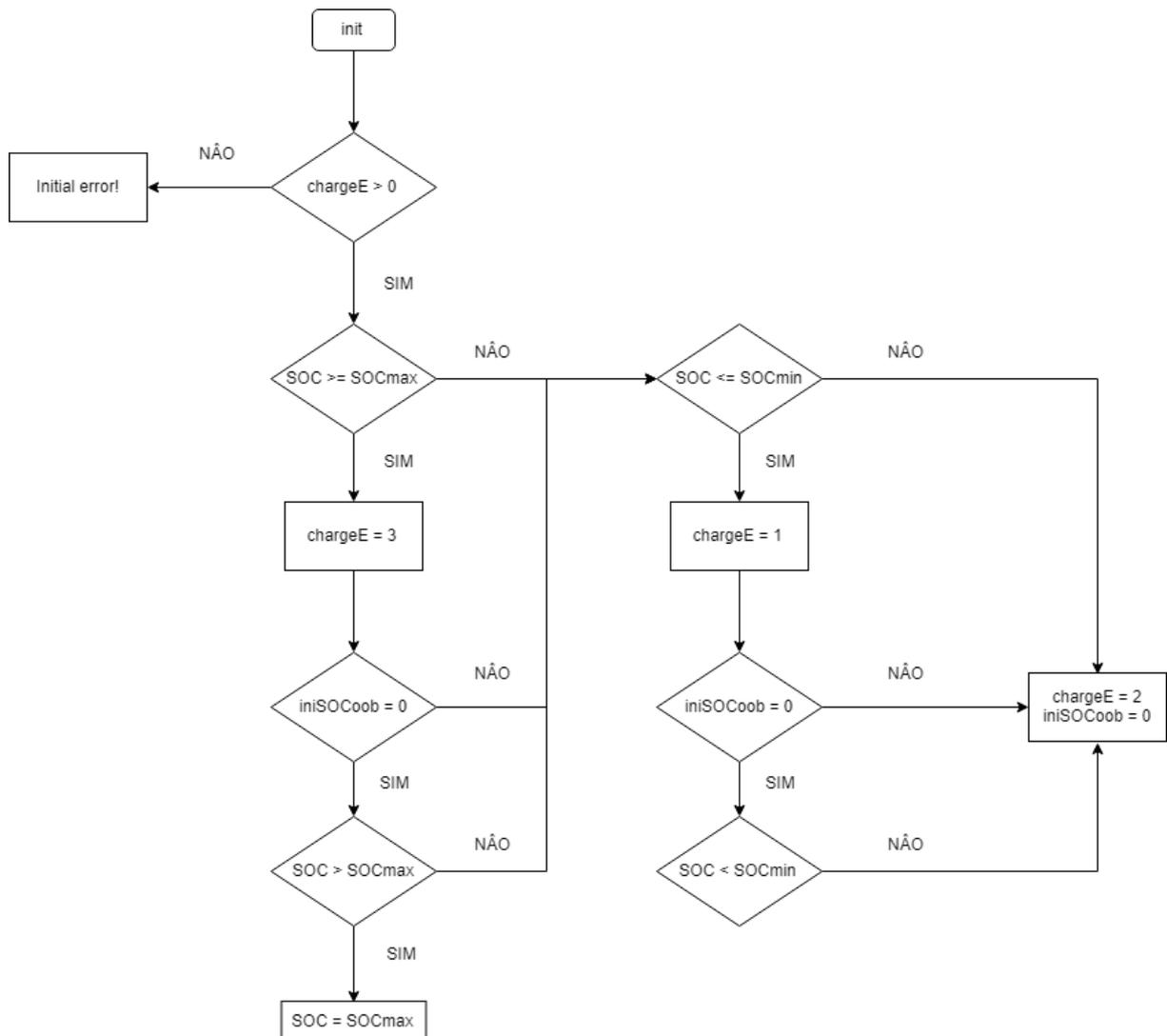
A equação diferencial de estado é definida somente no *script Quase-Dynamic Simulation Equations*. Os pontos presentes na equação após a variável de estado definem a derivada no tempo da respectiva variável. Assume-se que o SOC é definido com uma variável de estado e representa em porcentagem o estado de carga da bateria, e que  $E_{ini}$  é a capacidade da bateria em MWh, formando assim a EQUAÇÃO 1 inserida no *script*.

EQUAÇÃO 1 - Equação diferencial da seção *Quase-Dynamic Simulation Equation*

$$SOC. = -Pset * 100. / (Eini * 3600.); ! slope of SOC$$

FONTE: DlgSILENT (2017a)

Por fim, a seção *Quase-Dynamic Simulation Control* segue a mesma lógica do controle do *script Load Flow* definindo as ações para modificar as variáveis *chargeP* e *chargeE*, e assim determinar em que modo de operação em que a bateria se encontra. O fluxograma que exemplifica o código desse bloco pode ser visto na FIGURA 35.

FIGURA 35 - Fluxograma do *script Quaso-Dynamic Control*

FONTE: A autora (2018)

Levando em conta todas as descrições realizadas sobre o *QDSL model* utilizado para definir a bateria deste trabalho, agora é possível explicar o funcionamento deles unindo todas as informações apresentadas.

A equação que rege o balanço de potência do sistema com bateria é definida pela EQUAÇÃO 2. Ela define que a potência medida e entregue para alimentar a carga é igual à diferença entre a potência da linha que vem da rede elétrica e a potência que pode ser fornecida pela bateria.

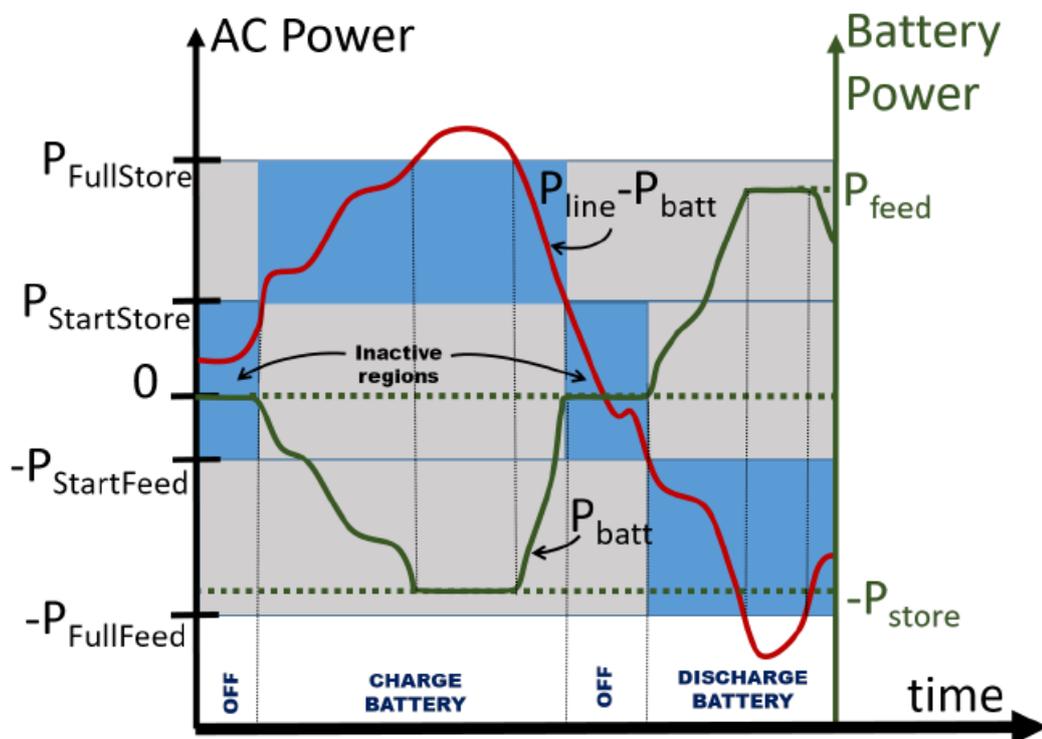
## EQUAÇÃO 2 - Balanço das potências ativas com bateria

$$P_{carga} = P_{linha} - P_{bat} = P_{medida}$$

FONTE: Adaptado de DlgSILENT (2017a)

A estratégia de controle empregada no modelo pode ser resumida de maneira bem intuitiva através do gráfico da FIGURA 36.

FIGURA 36 - Estratégia de controle utilizada para o controle do modelo de bateria



FONTE: DlgSILENT (2017a)

A partir do gráfico da FIGURA 36, pode-se dizer que a linha vermelha representa a diferença entre a potência ativa fornecida pela rede elétrica ( $P_{line}/P_{linha}$ ) e a potência ativa fornecida pela bateria ( $P_{batt}/P_{bat}$ ), ou seja, o total de potência medida ( $P_{medida}$ ) que é consumida pela carga. Como para os sistemas de pequeno e médio porte existem sistemas fotovoltaicos, a estratégia de controle segue a lógica de quando a variável  $P_{medida}$  é positiva a bateria carrega, pois, os painéis fotovoltaicos estão gerando mais energia do que a carga está consumindo. E nos momentos em que  $P_{medida}$  é negativa, a partir de um determinado valor a bateria

descarrega, já que isso significa que a energia gerada pelo sistema fotovoltaico não é suficiente para suprir toda a demanda da carga, diminuindo ou excluindo a necessidade de importar potência ativa da rede dependendo situação.

No sistema de grande porte que não possui geração fotovoltaica, em momentos de baixa demanda da carga ou fora do pico da demanda ( $P_{medida}$  com valores baixos) a bateria é carregada para não sobrecarregar tanto a rede elétrica. Já em momentos de pico da demanda ( $P_{medida}$  com valores altos), a bateria deve ser descarregada para minimizar a energia importada da rede elétrica.

#### 4.2.2.2 Modelo para Simulação Dinâmica

O modelo para realizar simulações que envolvem eventos transitórios, conforme descrito na seção 3.2.5, é dividido em alguns blocos. Para o modelo de bateria utiliza neste trabalho, essa composição de blocos será explicada com detalhes a seguir.

##### 4.2.2.2.1 *Composite Models*

Neste modelo existem dois tipos desse bloco: *Battery* e *BESS-Control*. As composições desses dois blocos, assim como a descrição de cada *slot* que os compõe, podem ser vistas na TABELA 9 e na TABELA 10.

TABELA 9 - Composição do *Composite Models BESS-Control* com a descrição de cada *Common model (slot)* que o compõe

Nome do <i>slot</i>	Descrição	Tipo do bloco
Conversor	Representa o inversor que está conectado ao gerador estático	Elemento do diagrama unifilar representado pelo gerador estático
PQ-Control	Controlador de potência ativa e reativa do inversor	DSL-Model
PQ-Measurement	Medidor de potência ativa e reativa para dar o <i>feedback</i> ao controlador	Dispositivo para medida de potência
AC-Voltage	Dispositivo que faz a medida da tensão alternada para a detecção de faltas e para auxiliar no controle da tensão	Dispositivo para medida de tensão
Charge Control	Calcula se a bateria deve ser carregada, descarregada ou permanecer inativa	DSL-Model
Battery Model	Link para o <i>Composite Model/Block Battery</i>	Elemento que representa o modelo <i>Battery</i>

FONTE: Adaptado de DIGSILENT (2017a)

Como pode ser visto na TABELA 9, os slots *PQ-Control* e *Charge Control* são do tipo *DSL-Model* ou *Common model*, serão explicados com mais detalhes na seção 4.2.2.2.2. Há também o *Composite Frame* referente a este *Composite model* que será mostrado na FIGURA 37 definindo a relação entre cada um dos *slots*.

TABELA 10 - Composição do *Composite Model Battery* com a descrição de cada *Common model* que o compõe

Nome do <i>slot</i>	Descrição	Tipo do bloco
Battery_Model	Modelo contendo os parâmetros que definem o modelo da bateria	DSL-Model
DC Side	Define o lado CC do modelo (como o gerador estático já possui um conversor, ele não é definido para este caso)	DSL-Model
PQ measurement	Bloco que faz a medida das potências ativa e reativa no lado AC da bateria	Dispositivo para medida de potência

FONTE: Adaptado de DIGSILENT (2017a)

No *Composite Model Battery* também há um *Common model* que será descrito na seção a seguir, e o seu respectivo *Composite Frame* que pode ser visto na FIGURA 38.

#### 4.2.2.2.2 *Common Models*

É através deste tipo de bloco que é feita a parametrização das variáveis dos modelos conforme será explicado.

O *slot PQ-Control* é responsável pelo controle de potência ativa e reativa que a bateria insere ou absorve da rede elétrica. Esse controle é realizado por meio de um controlador PI (suas funções de controle podem ser vistas na FIGURA 39), e as variáveis responsáveis por definir o funcionamento do *slot* podem ser vistas na TABELA 11.

TABELA 11 - Variáveis do *Common model PQ-Control*

Variável		Definição
Tr	s	Constante de tempo de filtragem para o processo ativo
Trq	s	Constante de tempo de filtragem para o processo reativo
Kp	pu	Ganho proporcional do controlador PI para potência ativa
Tip	s	Constante de tempo de integração do controlador PI para potência ativa
AC_deadband	pu	<i>Deadband</i> para o ganho proporcional para injeção de potência reativa
Kq	pu	Ganho proporcional do controlador PI para potência reativa
Tiq	s	Constante de tempo de integração do controlador PI para potência reativa
id_min	pu	Corrente mínima de referência para a potência ativa
iq_min	pu	Corrente mínima de referência para a potência reativa
id_max	pu	Corrente máxima de referência para a potência ativa
iq_max	pu	Corrente máxima de referência para a potência reativa

FONTE: A autora (2018)

No *Common model Charge Control* é definido o modo de funcionamento em que a bateria se encontra, e as variáveis que regem esse funcionamento podem ser vistas na TABELA 12.

TABELA 12 - Variáveis para parametrizar o bloco *Charge Control*

Variáveis		Definição
ChargeCur	pu	Corrente de carregamento mínima
minSOC	pu	Valor de SOC que o descarregamento é cessado
maxSOC	pu	Valor de SOC que o carregamento é cessado
deltaU	pu	Limite para dar preferência à potência reativa

FONTE: A autora (2018)

E por fim, no bloco *Battery\_Model* podem ser parametrizadas as variáveis que definem as características elétricas e físicas do equipamento bateria. Essas variáveis são mostradas na TABELA 13.

TABELA 13 - Variáveis para parametrizar o bloco *Battery\_Model*

Variáveis		Definição
SOC0	int	Estado de carga da bateria na inicialização
CellCapacity	Ah	Capacidade de cada célula da bateria
u_min	V	Tensão da célula descarregada
u_max	V	Tensão da célula completamente cheia
CellsParallel	int	Quantidade de células em paralelo
CellsInRow	int	Quantidade de células em série
RiCell	ohm	Resistência interna por célula

FONTE: A autora (2018)

Para este bloco deve ser dada uma atenção especial, pois para cada um dos três sistemas analisados a capacidade (MWh) da bateria é diferente e, portanto, algumas das variáveis da TABELA 13 são modificadas. Para parametrizar esse valor que se modifica em cada sistema, devem ser levadas em conta as variáveis *SOC0*, *CellsCapacity*, *u\_min*, *u\_max*, *CellsParallel* e *CellsInRow*. A EQUAÇÃO 3 determina capacidade da bateria.

EQUAÇÃO 3 - Determina a capacidade da bateria em MWh

$$U_{cell} = (u_{-max} * SOC0 + u_{-min} * (1 - SOC0))$$

$$V_{term} = U_{cell} * CellsInRow$$

$$E_{bat} = V_{term} * CellsCapacity * CellsParallel$$

FONTE: A autora (2018)

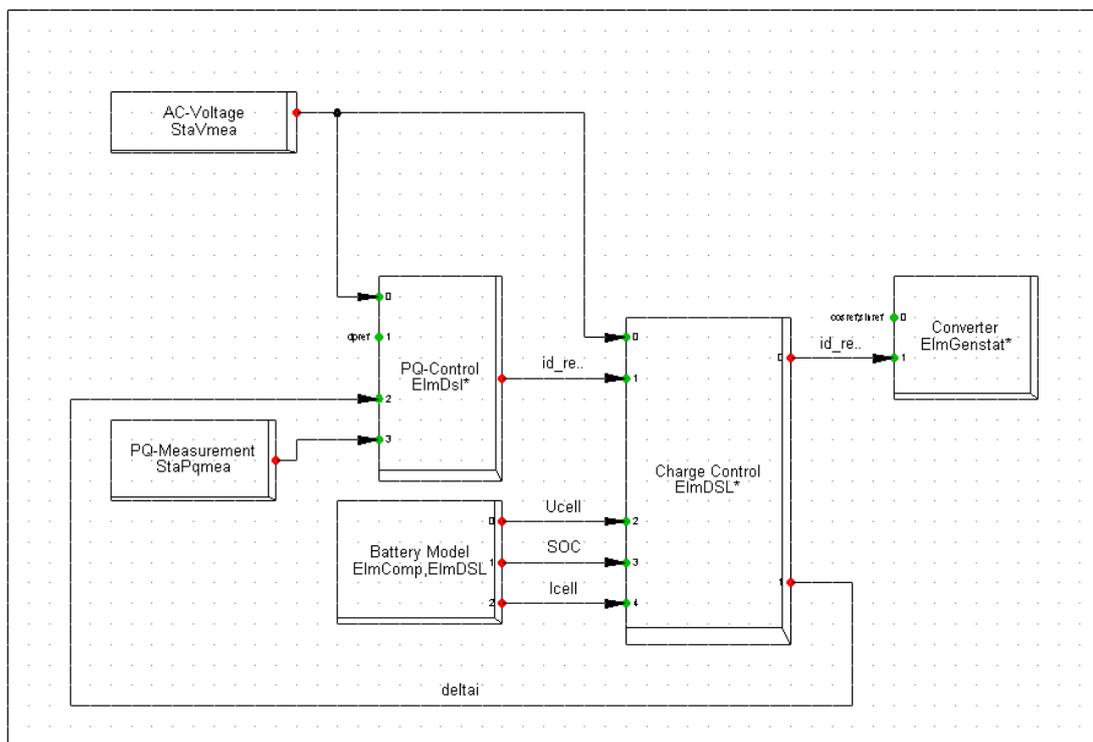
Sendo que  $U_{cell}$  é a tensão nos terminais de cada célula e  $V_{term}$  é a tensão no terminal da bateria como um todo.

A potência da bateria em MVA é inserida diretamente nas configurações do gerador estático que representa a bateria no diagrama unifilar.

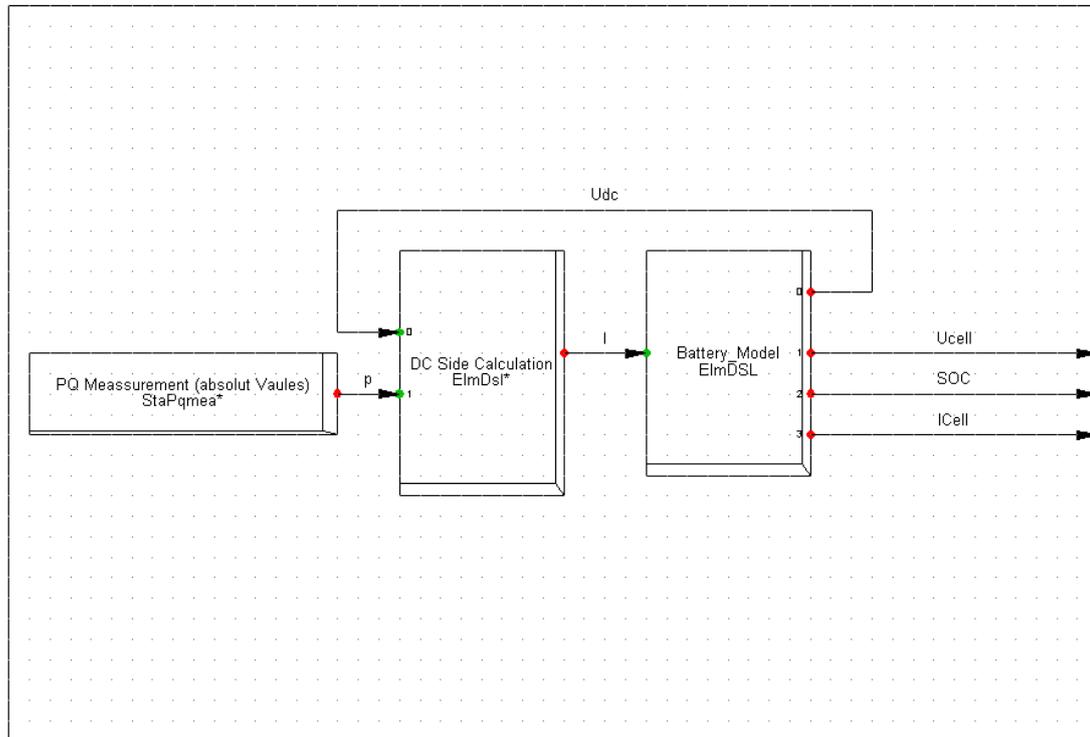
#### 4.2.2.2.3 Composite Frame

A seguir serão mostrados os diagramas de blocos que definem as interconexões, e as variáveis de referência de entrada e saída, que compõem os blocos *Composite Models BESS-Control* e *Battery* (FIGURA 37 e FIGURA 38).

FIGURA 37 - Diagrama de blocos do *Composite Model BESS-Control*



FONTE: A autora (2018)

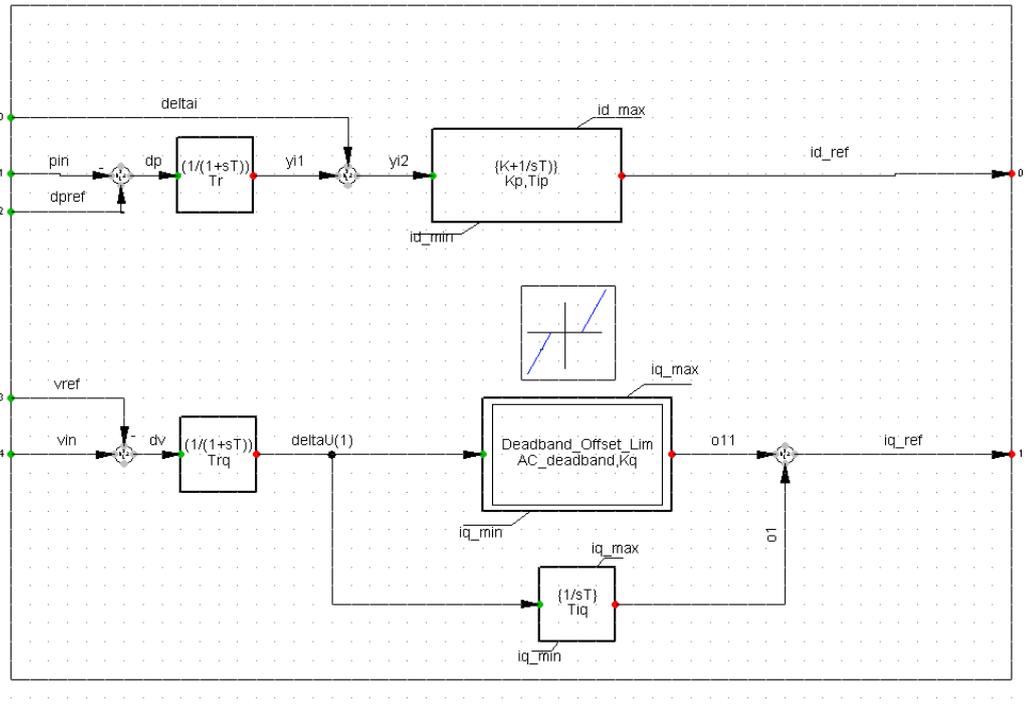
FIGURA 38 - Diagrama de blocos do *Composite Model Battery*

FONTE: A autora (2018)

#### 4.2.2.2.4 Common Model/Block Definition

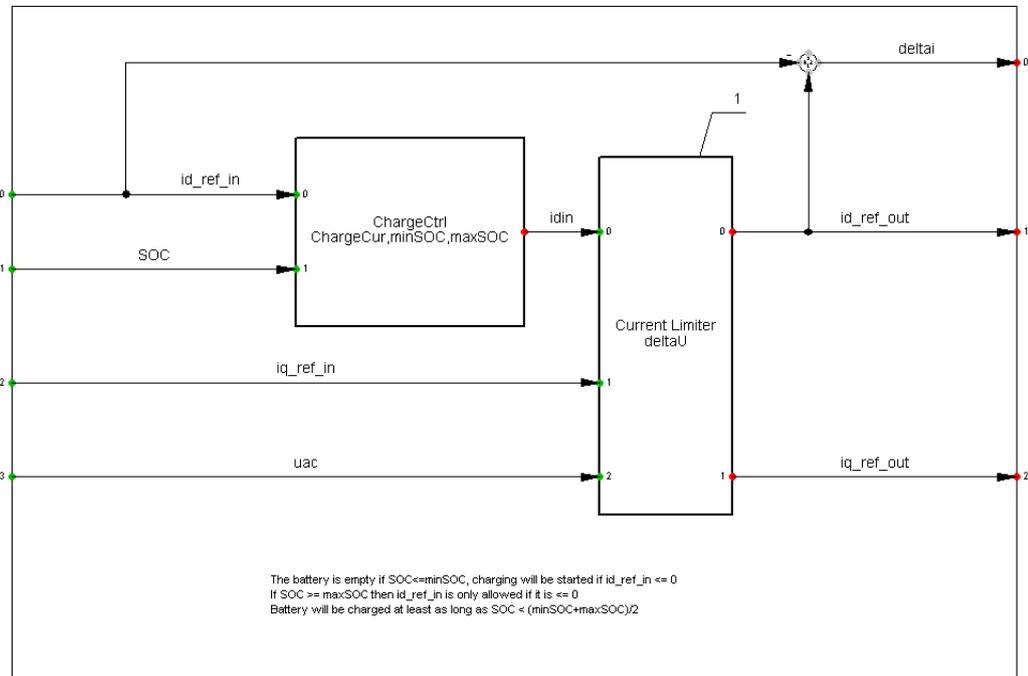
Dentro deste tipo de bloco que são definidas as equações que determinam o funcionamento dos blocos *PQ-Control*, *Charge Control* e *Battery\_Model*. Na FIGURA 39, FIGURA 40 e FIGURA 41, os modelos de cada um daqueles blocos são apresentados.

FIGURA 39 - Diagrama de blocos do Common model *PQ-Control*

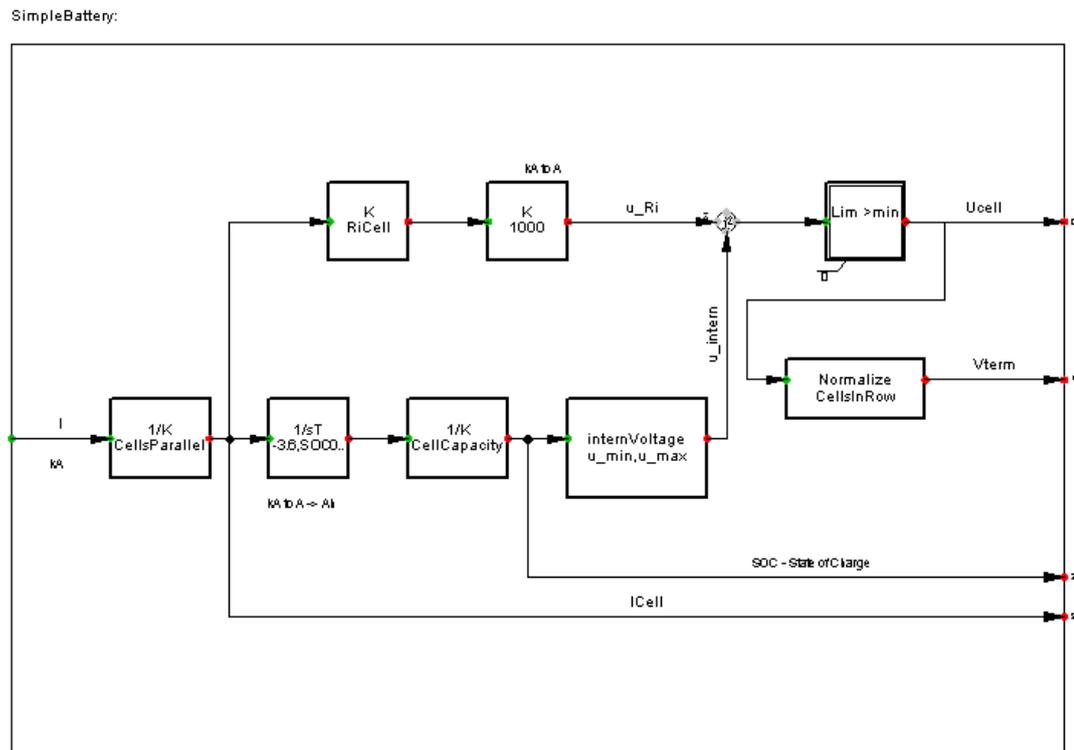


FONTE: A autora (2018)

FIGURA 40 - Diagrama de blocos do Common model *Charge Control*



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 41 - Diagrama de blocos do Common model *Battery\_Model*

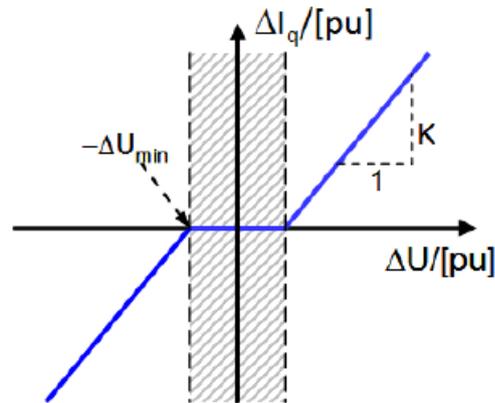
FONTE: A autora (2018)

Após definir e fazer uma explicação de cada parte do modelo dinâmico, pode ser explicada a forma como eles funcionam para manter a estabilidade de tensão da rede elétrica nos sistemas do consumidor residencial, do condomínio e do alimentador, que é o objetivo da sua modelagem para este trabalho.

Para realizar o controle da tensão em afundamentos ou elevações de tensão, o modelo realiza injeção de potência reativa ou ativa, respectivamente. Em momentos que a tensão diminui abaixo de um valor aceitável a potência ativa deve dar prioridade à corrente reativa. Essa preferência é regulada através da variável  $\Delta U$ , definida no slot *Charge\_Control*, que representa o valor da tensão no terminal da bateria em p.u. Quando esta tensão atinge o valor determinado por aquela variável, ela muda o tipo de potência injetada.

O funcionamento desse controle pode ser explicado através do gráfico presente na FIGURA 42.

FIGURA 42 - Gráfico do funcionamento do controle da injeção de corrente reativa em função da variação da tensão ( $\Delta U$ )



FONTE: DigSILENT (2017a)

O tamanho da parte inativa do controle ("banda morta") é modificada a partir da variável *AC\_deadband* presente no *slot PQ\_Control*. Já o parâmetro *K* (definido por *Kp*), é o ganho proporcional para realizar o suporte ao afundamento de tensão. Esse gráfico define o momento em que a referência à potência reativa (variável *iq*) é ativada pela bateria em função da diferença de tensão medida na rede elétrica.

### 4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo teve como objetivo apresentar os dados reais das redes elétricas dos sistemas elétricos de pequeno, médio e grande, utilizados para realizar a modelagem na ferramenta computacional.

Na sequência, foi realizada uma explicação detalhada da modelagem das baterias utilizadas para realizar as análises quase-dinâmicas e as dinâmicas.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para realizar a análise dos resultados das simulações, o presente capítulo foi dividido nos sistemas de pequeno, médio e grande porte, e suas respectivas simulações, conforme a TABELA 14.

TABELA 14 - Simulações realizadas para cada um dos sistemas analisados

Sistemas de Armazenamento de Energia	Simulações realizadas
Sistema de Pequeno Porte (5 kW)	Fluxo de Potência
	Quase-Dinâmica
	RMS/Transitória
Sistema de Médio Porte (50 kW)	Fluxo de Potência
	Curto-circuito
	Quase-Dinâmica
	RMS/Transitória
Sistema de Grande Porte (1 MW)	Fluxo de Potência
	Curto-Circuito
	Proteção
	Quase-Dinâmica
	RMS/Transitória

FONTE: A autora (2018)

Tendo em vista os resultados que serão apresentados a seguir e as parametrizações consideradas para alcançá-los, é relevante ressaltar que os valores utilizados para configurar o modelo quase-dinâmico foram escolhidos analisando alguns pontos da curva da carga de cada um dos sistemas. Já os valores inseridos no modelo dinâmico, para o controlador de carga (*Charge Control*) e o controlador PI de potência ativa e reativa (*PQ-Control*), foram mantidos muito iguais aos propostos pelo modelo inicial existente, apenas realizando alguns ajustes por tentativa e erro. E para a parametrização da estrutura física e elétrica da bateria (*Battery\_Model*), foram utilizados valores de típicos e comerciais, além da realização de alguns cálculos conforme mostrado na seção 4.2.2.2.2.

Uma observação importante a ser feita está relacionada à simulação quase-dinâmica, o intervalo de tempo de integração para os três modelos analisados foi de dez minutos.

## 5.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO SISTEMA DE PEQUENO PORTE

### 5.1.1 Simulação de Fluxo de Potência do Sistema de Pequeno Porte

O cálculo dos fluxos de potência foi realizado com o intuito de averiguar qual é o impacto da bateria relacionado às novas demandas que o sistema elétrico estará

sujeito. A simulação foi realizada dentro de dois cenários, um durante carregamento da bateria e outro no descarregamento, conforme a TABELA 15. Na FIGURA 43 pode ser visto o circuito de pequeno porte com a rede externa, a carga da residência e a bateria em paralelo, e suas respectivas potências, correntes e tensões de barra para o momento em que a bateria está carregando em dias úteis. Para os demais cenários utilizados, eles ficam dispostos da mesma maneira que na FIGURA 43, e por isso não foram exibidos para cada simulação realizada. O resultado de todos os cenários pode ser visto nas tabelas ao final desta seção.

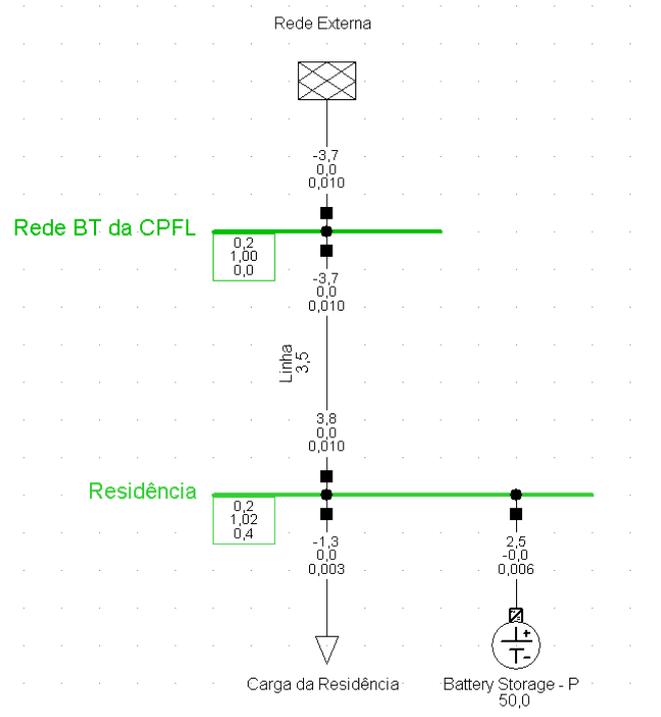
Além disso, o método utilizado foi Newton-Raphson clássico e balanceado em corrente alternada, a bateria está carregando ou descarregando com metade da sua potência nominal, e o valor da carga é mantido fixo para o horário das 12h (meio dia) demandando sempre energia da rede e desconsiderando a geração do sistema fotovoltaico.

TABELA 15 - Cenários utilizados para a análise de fluxo de potência do sistema de pequeno porte

	Hora do dia	Estado da bateria
Cenário 1	12h	carregando
Cenário 2		descarregando

FONTE: A autora (2018)

FIGURA 43 - Sistema de pequeno porte com a bateria carregando durante dias úteis



FONTE: A autora (2018)

Afim de facilitar a compreensão dos resultados do fluxo de potência, os valores obtidos foram organizados conforme é possível ver na TABELA 16, TABELA 17 e TABELA 18.

TABELA 16 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de pequeno porte durante dias úteis

Dias Úteis	Bateria carregando		Bateria descarregando	
	Potência Ativa (kW)	Tensão (pu)	Potência Ativa (kW)	Tensão (pu)
Rede Externa	-3,7	-	1,2	0,003
Carga Residencial	-1,3	-	-1,3	0,003
Bateria	2,5	-	-2,5	0,007
Barra Residência	-	1,02	-	0,99

FONTE: A autora (2018)

TABELA 17 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de pequeno porte aos sábados

Sábados	Bateria carregando		Bateria descarregando	
	Potência Ativa (kW)	Tensão (pu)	Potência Ativa (kW)	Tensão (pu)
Rede Externa	-3,4	-	1,6	-
Carga Residencial	-0,9	-	-0,9	-
Bateria	2,5	-	-2,5	-
Barra Residência	-	1,01	-	0,99

FONTE: A autora (2018)

TABELA 18 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de pequeno porte aos domingos

Domingos	Bateria carregando		Bateria descarregando	
	Potência Ativa (kW)	Tensão (pu)	Potência Ativa (kW)	Tensão (pu)
Rede Externa	-3,6	-	1,3	-
Carga Residencial	-1,2	-	-1,2	-
Bateria	2,5	-	-2,5	-
Barra Residência	-	1,02	-	0,99

FONTE: A autora (2018)

É importante deixar claro que os valores negativos significam a saída de energia e, portanto, que o elemento do sistema está fornecendo energia elétrica. Já os valores positivos significam que o elemento está recebendo energia elétrica.

Através dos resultados nas tabelas acima, é possível perceber que quando a bateria está carregando e exigindo da rede metade da sua potência, a rede precisa fornecer muito mais energia do que geralmente forneceria. Isso pode alterar a infraestrutura necessária para entregar energia à residência, como cabos.

Outro parâmetro que chama a atenção é a tensão na barra de entrada da residência, pois quando há um aumento da potência ativa que passa pelo nó de um sistema, a tensão aumenta nesse ponto, sendo o que acontece quando a bateria está carregando. Mas por outro lado, quando a bateria está descarregando, o fluxo de potência daquela barra diminui, causando uma pequena queda de tensão, conforme pode ser verificado com os valores de tensão igual a 0,99 p.u. apresentados na TABELA 16, na TABELA 17 e na TABELA 18.

### 5.1.2 Simulação Quase-Dinâmica do Sistema de Pequeno Porte

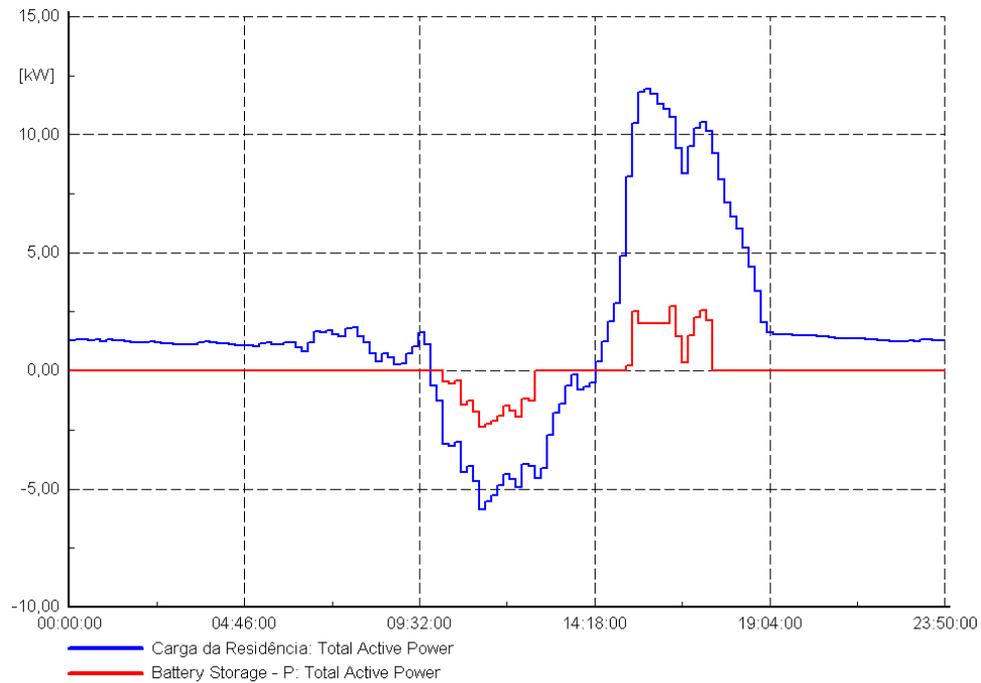
Na simulação quase-dinâmica, conforme já citado anteriormente, o objetivo foi implementar um controle para realizar um corte da carga em momentos de pico da demanda. E para o sistema de pequeno porte, a parametrização do modelo quase-dinâmico explicado na seção 4.2.2.1 para atender os requisitos dos dias úteis, sábados e domingos do período especificado, assim como seus respectivos resultados podem ser vistos nas tabelas e figuras a seguir.

TABELA 19 - Valores dos parâmetros do modelo quase-dinâmico do sistema de pequeno porte para dias úteis

QDSL Model P - Dias Úteis		
Eini	0,005	MWh
SOCini	20	%
SOCmin	10	%
SOCmax	90	%
Pstore	0,002	MW
Qstore	0	MVAR
PFullStore	0,0052	MW
PStartStore	0,00065	MW
Pfeed	0,003	MW
Qfeed	0	MVAR
PStartFeed	0,008	MW
PFullFeed	0,001295	MW
orientation	1	-

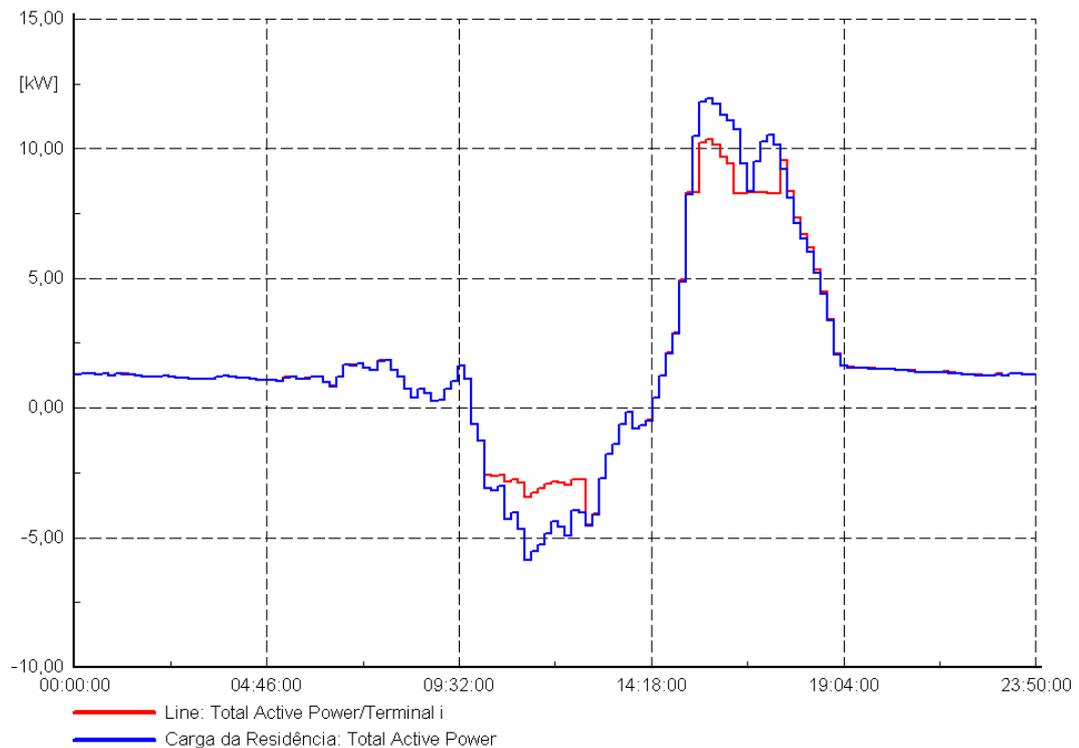
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 44 - Curvas do comportamento da potência ativa da carga da residência (azul) e da bateria (vermelha) ao longo de um dia útil

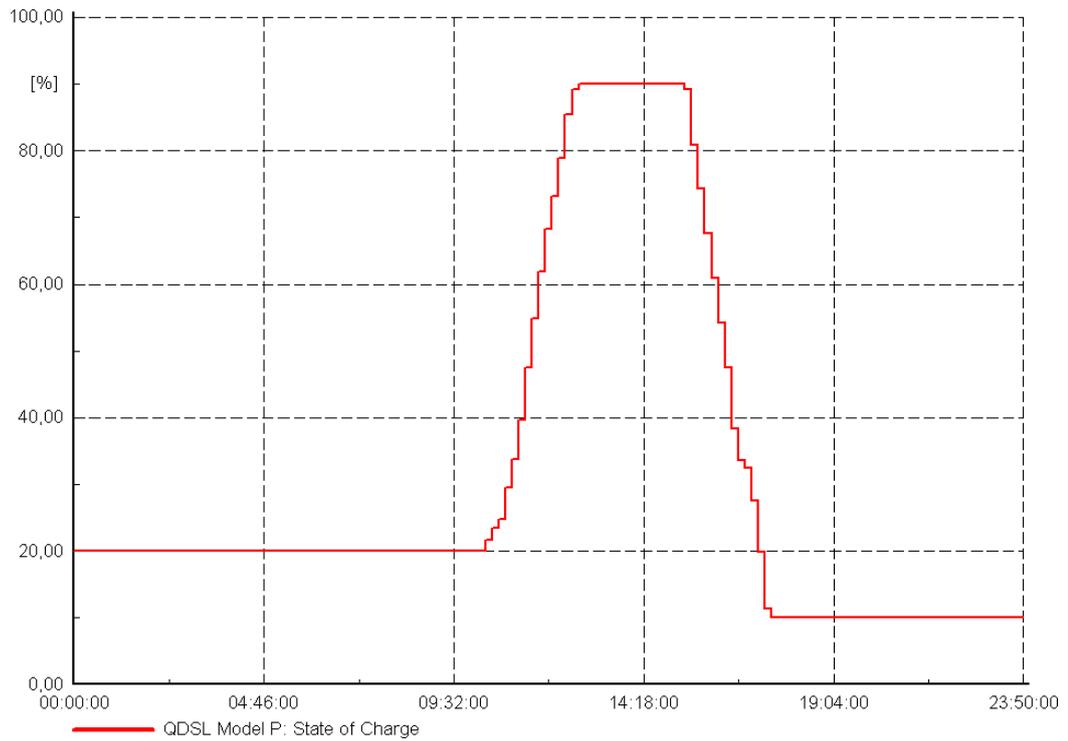


FONTE: A autora (2018)

FIGURA 45 - Curva de potência ativa da carga para o sistema de pequeno porte demandada antes (azul) e após a implantação da bateria (vermelha) ao longo de dias úteis



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 46 - Estado de carga (SOC – *State of Charge*) da bateria ao longo de dias úteis

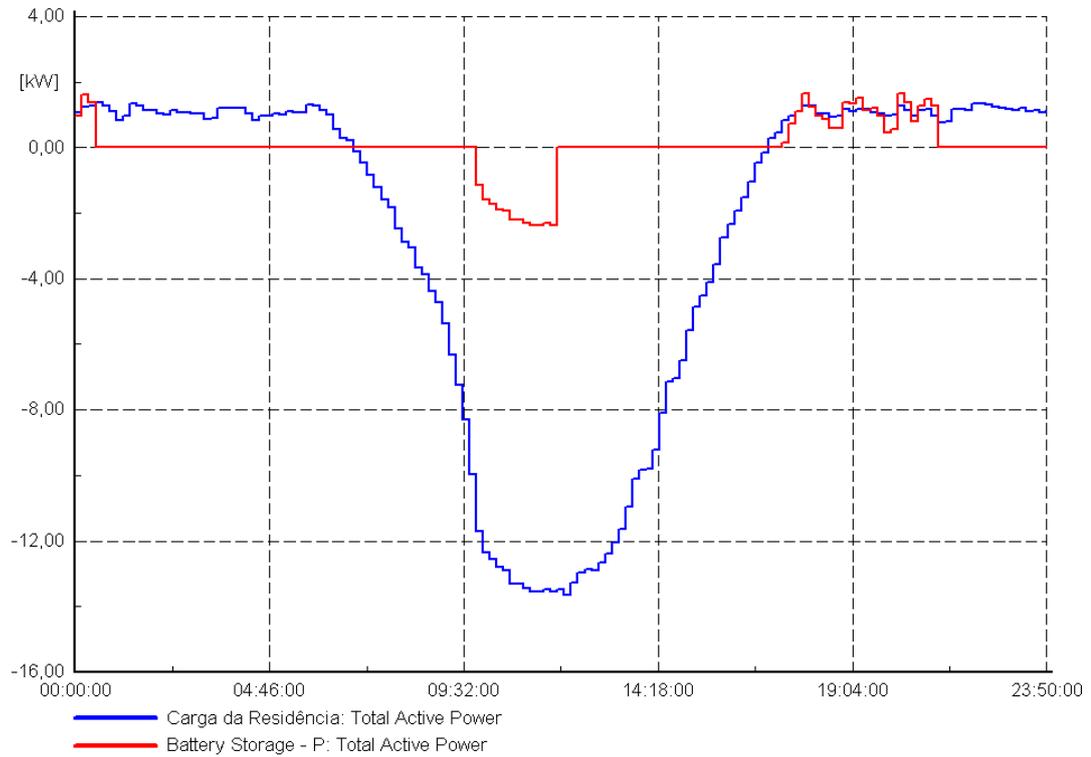
FONTE: A autora (2018)

TABELA 20 - Valores dos parâmetros do modelo quase-dinâmico do sistema de pequeno porte para os sábados

QDSL Model P - Sábados		
Eini	0,005	MWh
SOCini	20	%
SOCmin	10	%
SOCmax	90	%
Pstore	0,002	MW
Qstore	0	MVAR
PFullStore	0,013	MW
PStartStore	0,01	MW
Pfeed	0,0015	MW
Qfeed	0	MVAR
PStartFeed	0,0008	MW
PFullFeed	0,00115	MW
orientation	1	-

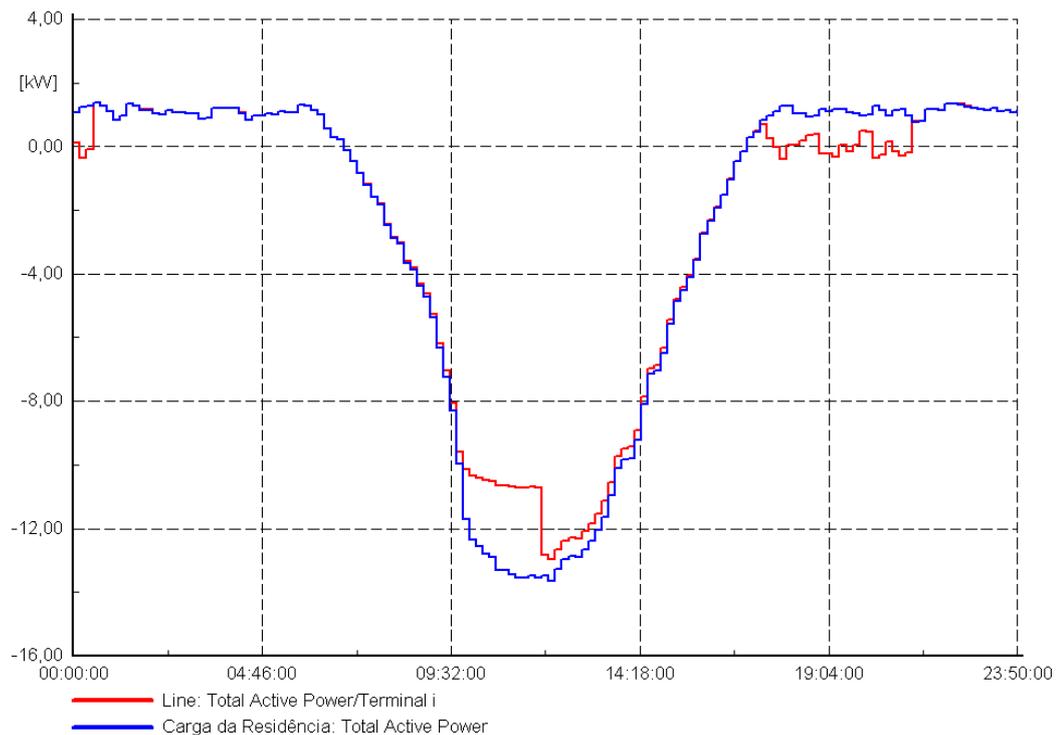
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 47 - Curvas do comportamento da potência ativa da carga da residência (azul) e da bateria (vermelha) aos sábados



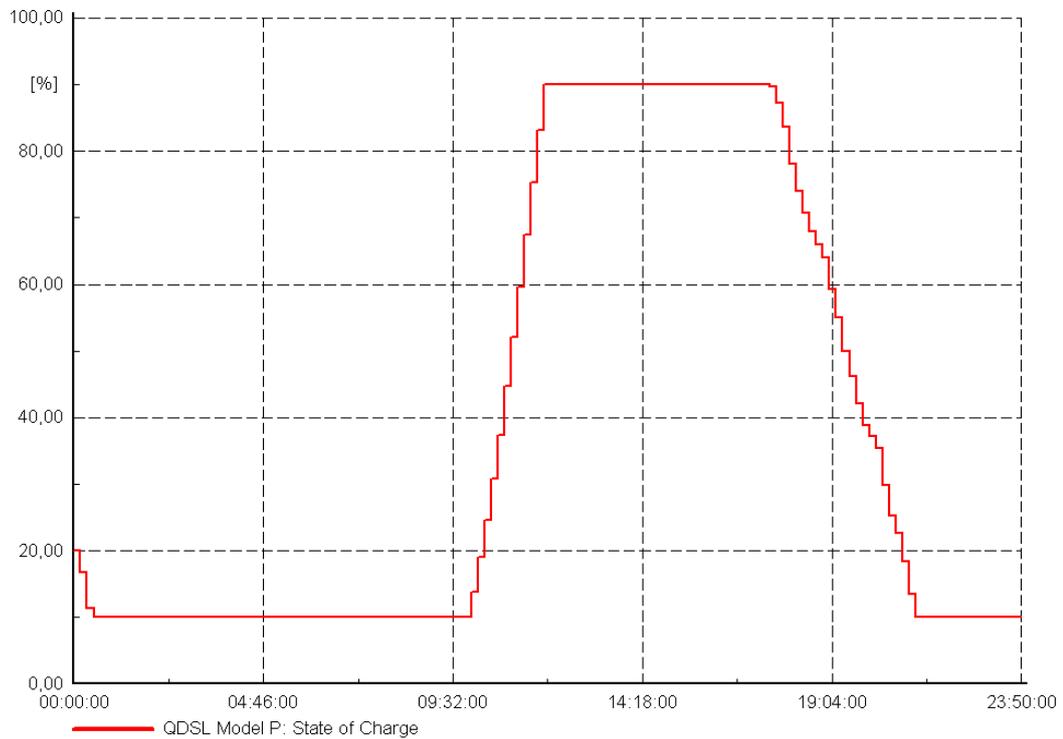
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 48 - Curva de potência ativa da carga para o sistema de pequeno porte demandada antes (azul) e após a implantação da bateria (vermelha) aos sábados



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 49 - Estado de carga (SOC – *State of Charge*) da bateria do sistema de pequeno porte aos sábados



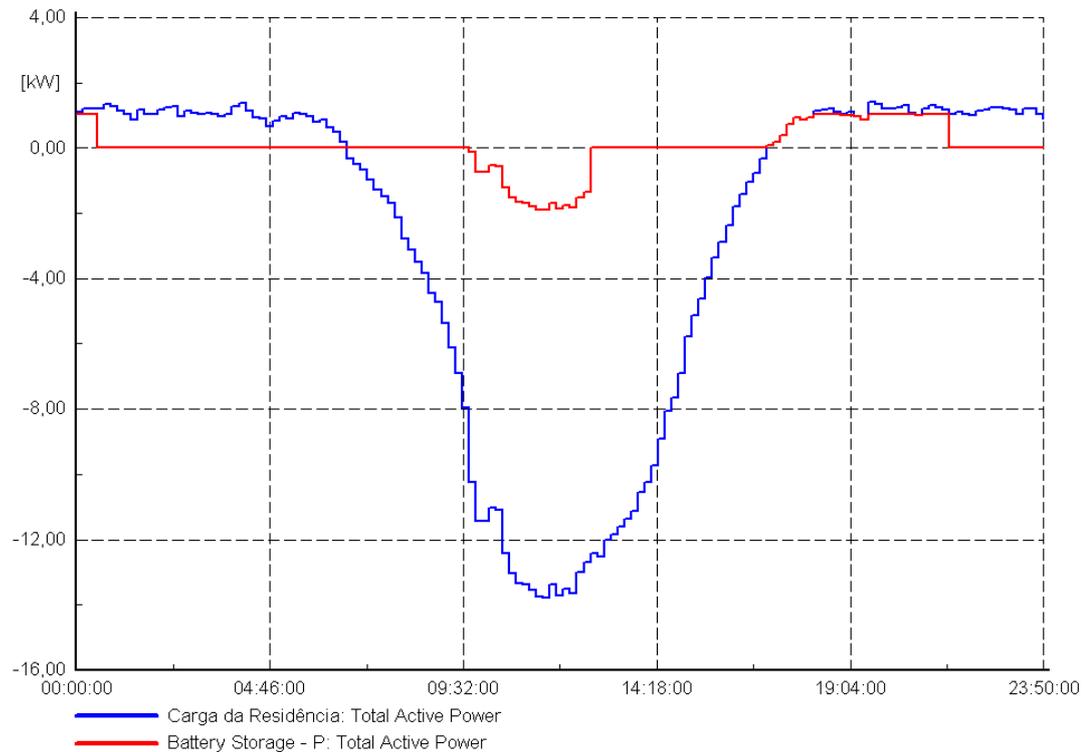
FONTE: A autora (2018)

TABELA 21 - Valores dos parâmetros do modelo quase-dinâmico do sistema de pequeno porte para os domingos

QDSL Model P - Domingos		
Eini	0,005	MWh
SOCini	20	%
SOCmin	10	%
SOCmax	90	%
Pstore	0,002	MW
Qstore	0	MVAR
PFullStore	0,00138	MW
PStartStore	0,008	MW
Pfeed	0,0015	MW
Qfeed	0	MVAR
PStartFeed	0,0009	MW
PFullFeed	0,001	MW
orientation	1	-

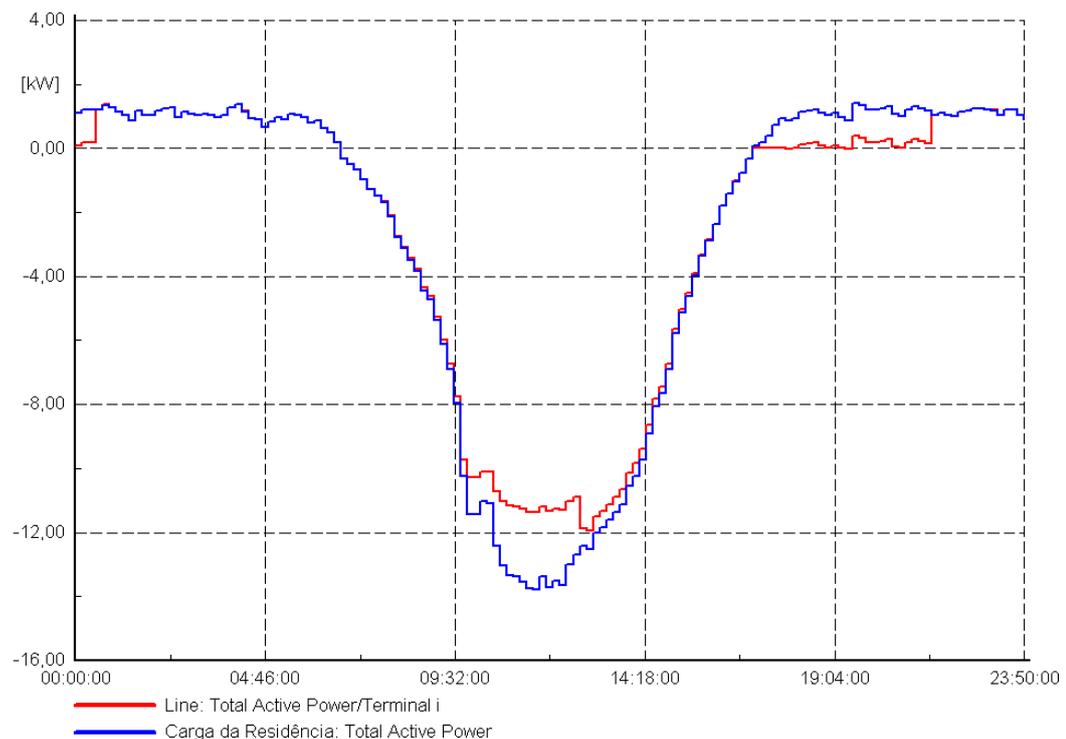
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 50 - Curvas do comportamento da potência ativa da carga da residência (azul) e da bateria (vermelha) aos domingos



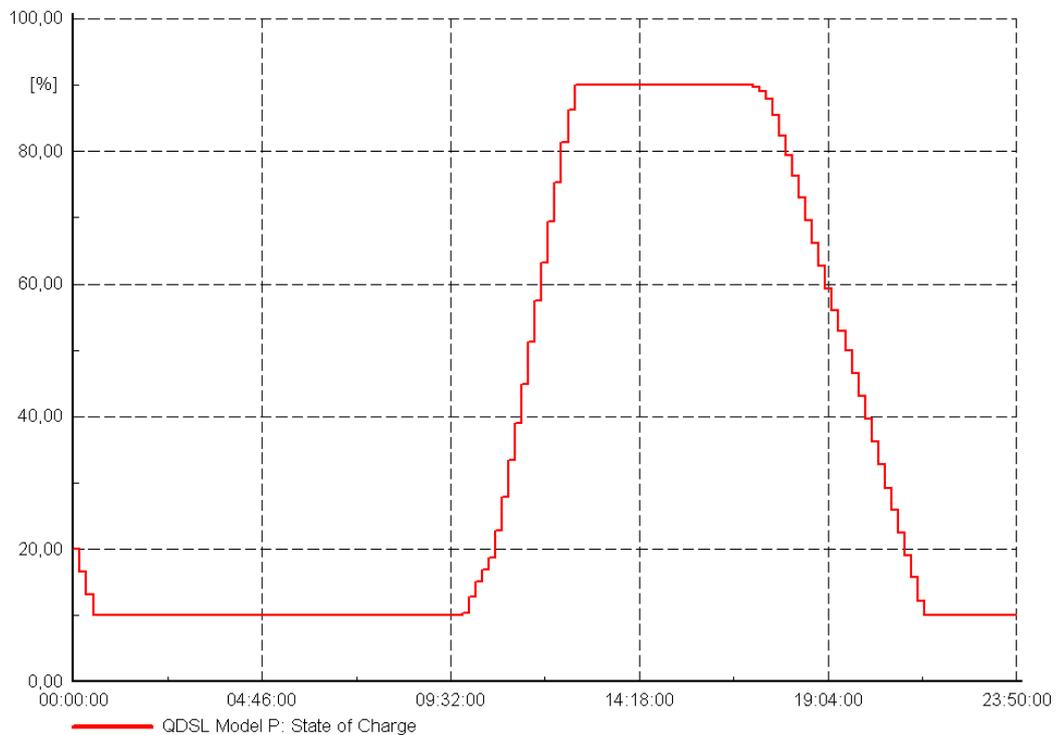
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 51 - Curva de potência ativa da carga para o sistema de pequeno porte demandada antes (azul) e após a implantação da bateria (vermelha) aos domingos



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 52 - Estado de carga (SOC – *State of Charge*) da bateria do sistema de pequeno porte aos domingos



FONTE: A autora (2018)

Analisando a FIGURA 45, a FIGURA 48 e a FIGURA 51, pode-se perceber o efeito que a inserção da bateria causa para o sistema no modo de operação *peak-shaving* utilizado. A redução do corte do pico da carga não se mostra tão significativa, e isso se deve à capacidade da bateria que é igual a 5 kWh, ou seja, o quanto de energia a bateria consegue descarregar ou carregar – 5 kW em uma hora - e durante quanto tempo ela consegue manter essa potência. Sendo assim, utilizando-se uma bateria com uma capacidade maior, seria possível diminuir ainda mais a demanda da rede.

### 5.1.3 Simulação RMS/Transitória do Sistema de Pequeno Porte

Para esta simulação, utilizou-se os valores de parametrização do modelo dinâmico explicado na seção 4.2.2.2, sendo eles mostrados na TABELA 22, TABELA 23 e TABELA 24.

TABELA 22 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o *Common model PQ-Control-P*

PQ-Control-P		
Tr	2	s
Trq	2	s
Kp	0,1	pu
Tip	5	s
AC_deadband	0,1	pu
Kq	2	pu
Tiq	0,1	s
id_min	-1	pu
iq_min	-1	pu
id_max	1	pu
iq_max	1	pu

FONTE: A autora (2018)

TABELA 23 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o *Common model Charge Control-P*

Charge Control-P		
ChargeCur	0,05	pu
minSOC	0,1	pu
maxSOC	0,9	pu
deltaU	0,5	pu

FONTE: A autora (2018)

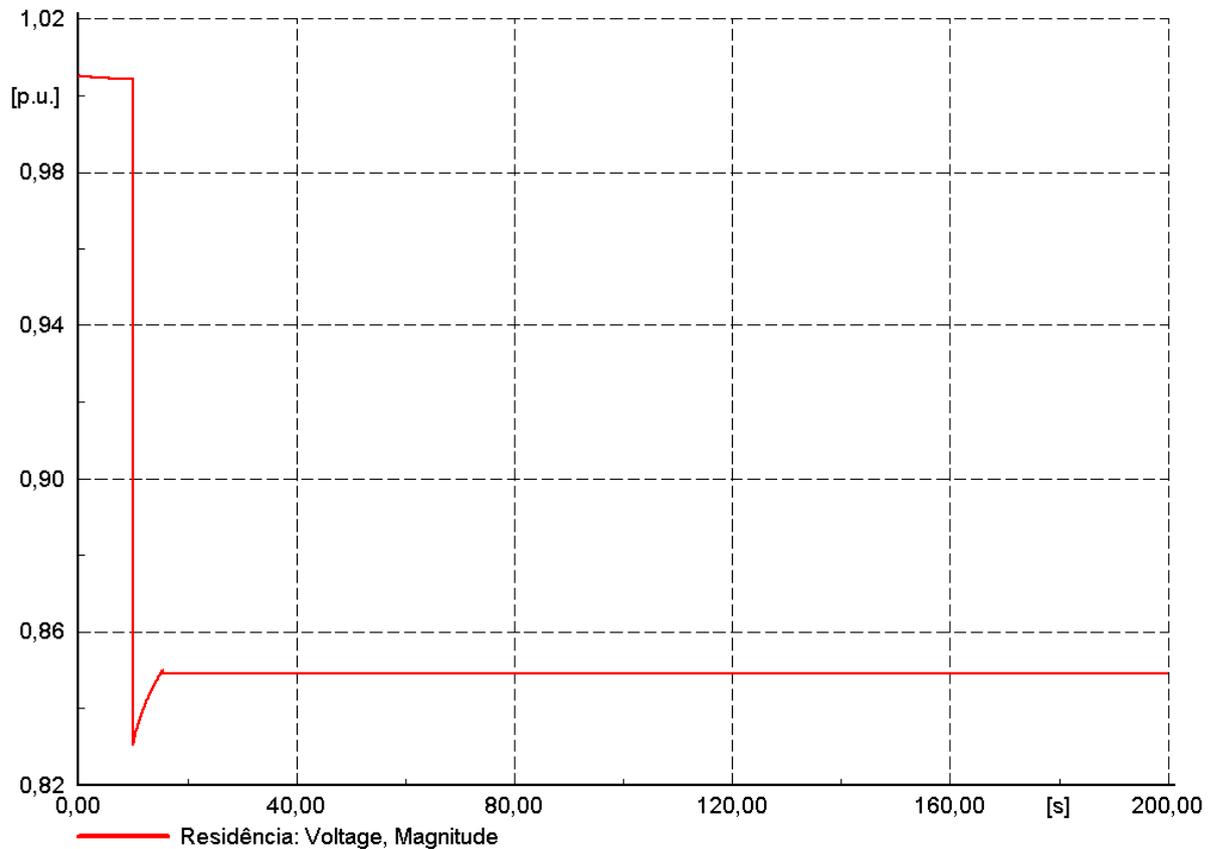
TABELA 24 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o *Common model Simple Battery-P*

Simple Battery-P		
SOC0	0,8	-
CellCapacity	20	Ah
u_min	10	V
u_max	13,85	V
CellsParallel	5	-
CellsInRow	5	-
RiCell	0,001	ohm

FONTE: A autora (2018)

Utilizando os valores citados para parametrizar o modelo da bateria, foi aplicado um evento de curto-circuito trifásico no terminal "Rede BT da CPFL" da FIGURA 29 de impedância igual a 1,0 ohm, a fim de analisar o controle da bateria para casos em que ocorrem eventos de curta duração. O comportamento da tensão da barra da residência pode ser visto na FIGURA 53.

FIGURA 53 - Tensão no terminal "Residência" quando aplicado um curto-circuito no sistema com uma bateria de 5 kVA

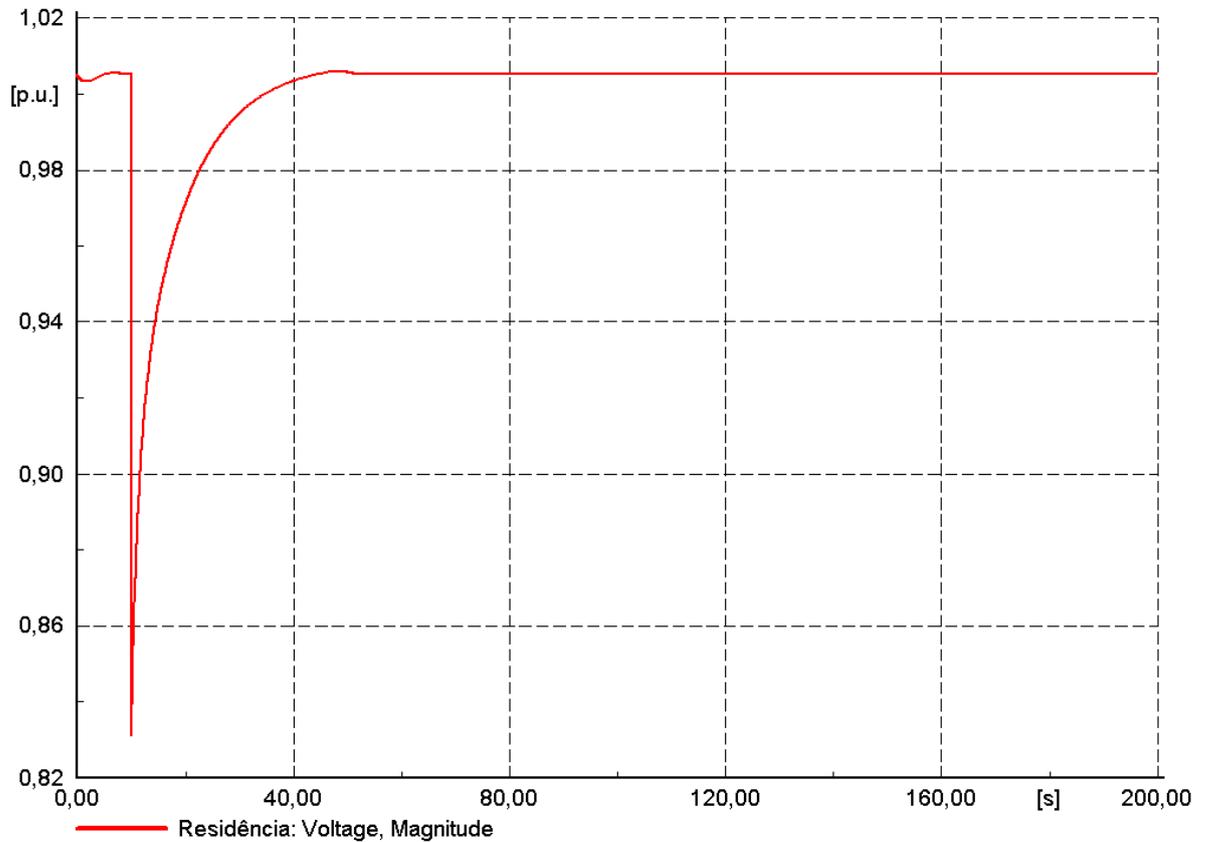


FONTE: A autora (2018)

A FIGURA 53 mostra uma ineficiência da bateria em recuperar a tensão do sistema após o curto-circuito. Isso ocorre devido ao fato da bateria não conseguir entregar potência ativa e reativa a valores adequados para realizar a regulação da tensão em um período de tempo tão curto de tempo. A máxima potência que o equipamento consegue fornecer é de 5 kVA.

Com intuito de obter uma conclusão sobre a potência ser um fator determinante para a bateria conseguir realizar o ajuste da tensão, foi realizado o mesmo evento, mas agora com uma potência de 50kVA. O resultado está na FIGURA 54.

FIGURA 54 - Tensão no terminal "Residência" quando aplicado um curto-circuito no sistema com uma bateria de 50 kVA



FONTE: A autora (2018)

Conforme esperado, o resultado da FIGURA 54 com uma bateria de 50 kVA mostra o equipamento recuperando o afundamento de tensão de uma forma totalmente eficaz no terminal da residência após o curto-circuito trifásico na barra "Rede BT da CPFL". Entretanto para conseguir esse resultado foi necessária uma bateria considerada de médio porte, e para um sistema elétrico de residência inviabiliza essa aplicação devido a vários fatores, principalmente, economicamente.

Outro fato que deve ser observado é a queda da tensão não foi muito grande, sendo que há várias faltas que ocorrem no sistema que podem levar a afundamentos de tensão bem mais severos.

## 5.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO SISTEMA DE MÉDIO PORTE

As simulações para o sistema de médio porte são semelhantes às realizadas para o de pequeno porte, entretanto foi adicionada mais uma análise que foi considerada relevante avaliar, o cálculo de curto-circuito.

### 5.2.1 Simulação Fluxo de Potência do Sistema de Médio Porte

Para o fluxo de potência do sistema de médio foram considerados dois momentos também, considerando que o condomínio possui geração fotovoltaica e o pico da geração é no horário das 12h às 14h. Esses momentos foram chamados de "Cenário 1" e "Cenário 2", determinados conforme a TABELA 25.

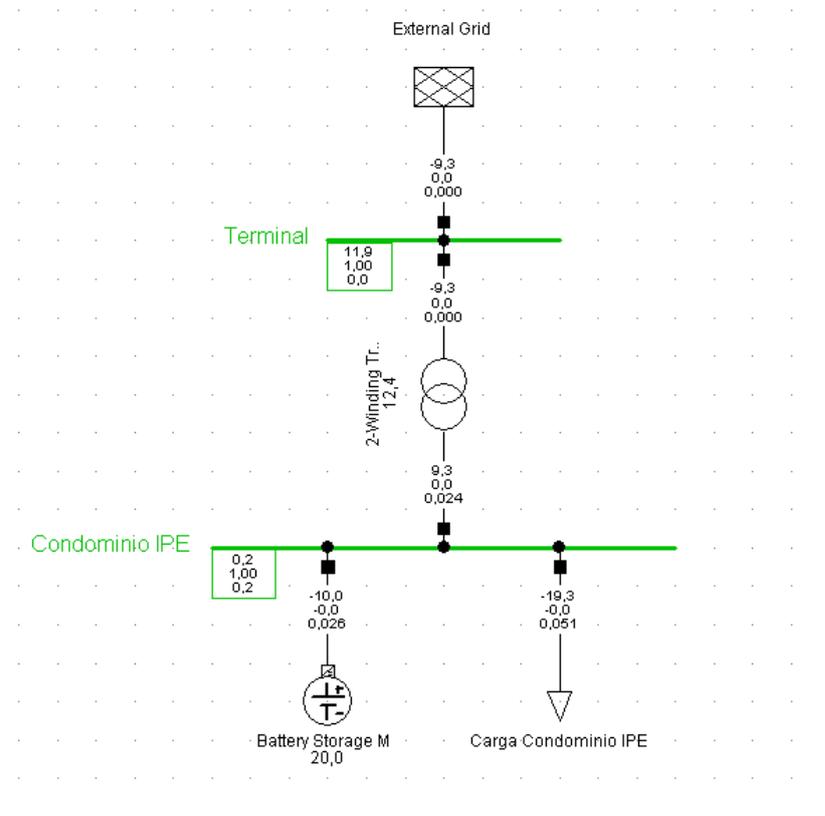
TABELA 25 - Cenários utilizados para a análise de fluxo de potência do sistema de médio porte

	Hora do dia	Estado da bateria
Cenário 1	14h	Carregando
Cenário 2	20h	Descarregando

FONTE: A autora (2018)

Além disso, o método utilizado foi o Newton-Raphson clássico e balanceado em corrente alternada. O modelo do sistema e os seus resultados para o Cenário 1, bateria carregando às 14h, para dias úteis pode ser visto na FIGURA 55. Os principais resultados referentes aos outros cenários foram organizados na TABELA 26, TABELA 27 e TABELA 28 para conseguir realizar a análise dos resultados de uma maneira mais prática.

FIGURA 55 - Sistema de médio porte no Cenário 1 durante dias úteis



FONTE: A autora (2018)

TABELA 26 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de médio porte durante dias úteis

Dias Úteis	Cenário 1		Cenário 2	
	Potência Ativa (kW)	Tensão (pu)	Potência Ativa (kW)	Tensão (pu)
Transformador	9,3	-	-9,2	-
Carga do condomínio	-19,3	-	19,2	-
Bateria	-10	-	10	-
Barra do condomínio	-	1	-	1

FONTE: A autora (2018)

TABELA 27 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de médio porte aos sábados

Sábados	Cenário 1		Cenário 2	
	Potência Ativa (kW)	Tensão (pu)	Potência Ativa (kW)	Tensão (pu)
Transformador	0,2	-	-9	-
Carga do condomínio	-5,2	-	21	-
Bateria	-5	-	12	-
Barra do condomínio	-	1	-	1

FONTE: A autora (2018)

TABELA 28 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de médio porte aos domingos

Domingos	Cenário 1		Cenário 2	
	Potência Ativa (kW)	Tensão (pu)	Potência Ativa (kW)	Tensão (pu)
Transformador	6	-	-14,2	-
Carga do condomínio	-14	-	24,2	-
Bateria	-8	-	10	-
Barra do condomínio	-	1,02	-	0,99

FONTE: A autora (2018)

Diferente da análise realizada para o sistema de pequeno porte na seção 5.1.1, para o sistema de médio porte será considerada a geração fotovoltaica. Esta consideração diferente para as duas foi feita propositalmente para ver o impacto do sistema fotovoltaico em conjunto com o armazenamento de energia. Sendo assim, no cenário 1, a bateria está carregando e o sistema fotovoltaico está no pico da sua geração, e no cenário 2, a bateria está descarregando e não há geração de energia fotovoltaica.

A principal diferença que pode ser notada entre as análises de pequeno e médio porte é o valor das tensões na barra onde a bateria está localizada. Como no sistema de médio porte a bateria está carregando nos momentos em que é possível alimentar a bateria e ao mesmo tempo exportar energia para a rede, e ela descarrega nos momentos em que não há energia fotovoltaica está sendo gerada, a energia que é importada nunca sofre uma variação tão significativa, exigindo menos esforço por parte da rede. Assim, pode-se verificar que a tensão na barra do condomínio não sai do valor de 1 p.u., diferente do que acontece no sistema de pequeno porte.

### 5.2.2 Simulação de Curto-Circuito do Sistema de Médio Porte

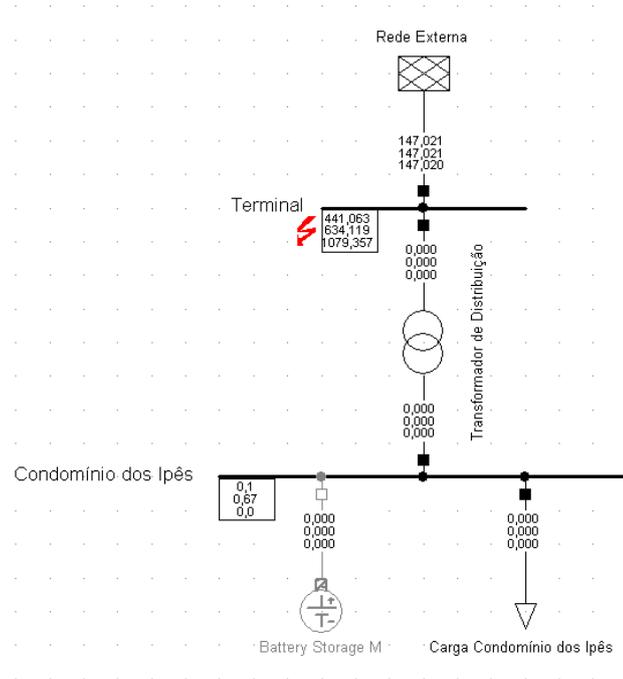
Nesta análise será considerado um curto-circuito monofásico fase-terra e um trifásico no terminal conectado ao enrolamento primário do transformador. O monofásico será aplicado conforme a norma ANSI descreve e é explicado na seção 3.2.2. E o curto trifásico é enquadrado na norma IEC 60909, sendo que a bateria age no momento da falta como se fosse um *static converter-fed drive* conforme define a norma.

Para verificar o impacto da bateria, serão considerados dois cenários:

- Cenário 1: Sistema de médio porte SEM bateria;
- Cenário 2: Sistema de médio porte COM bateria.

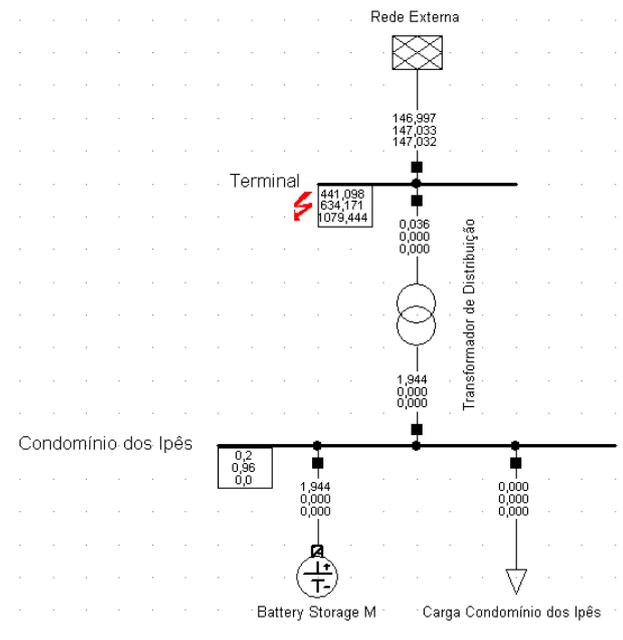
Nas imagens a seguir, é possível ver o resultado para as simulações de curto-circuito monofásico e trifásico para os dois cenários considerados.

FIGURA 56 - Resultado do curto-circuito monofásico no sistema de médio porte sem armazenamento de energia



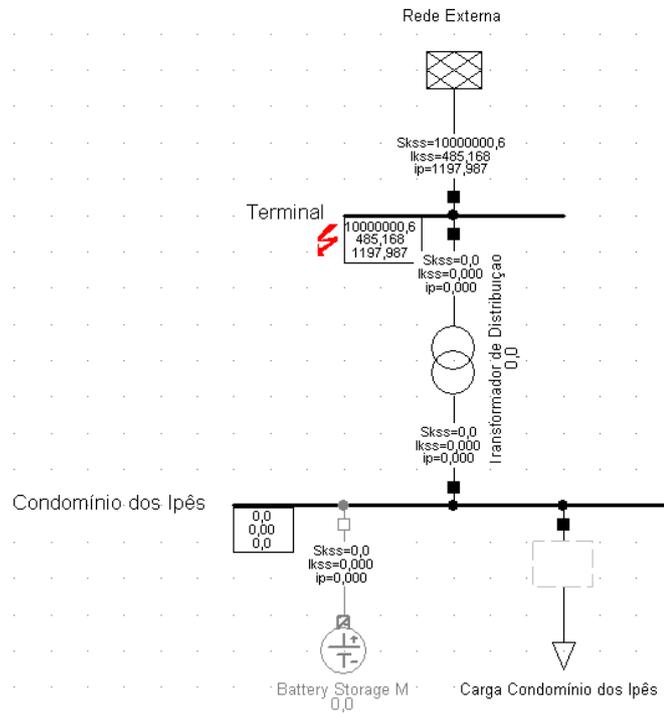
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 57 - Resultado do curto-circuito monofásico no sistema de médio porte com armazenamento de energia



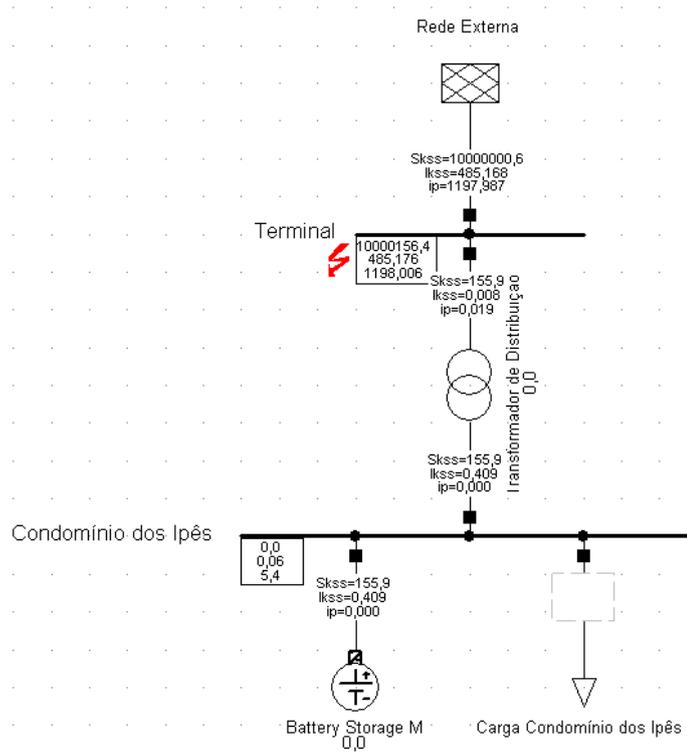
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 58 - Resultado do curto-circuito trifásico no sistema de médio porte sem armazenamento de energia



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 59 - Resultado do curto-circuito trifásico no sistema de médio porte com armazenamento de energia



FONTE: A autora (2018)

Na TABELA 29 e TABELA 30, os resultados estão dispostos de uma maneira mais dinâmica para serem analisados comparativamente.

TABELA 29 - Resultados do cálculo de curto-circuito monofásico para o sistema de médio porte

Curto-circuito monofásico		
	Transformador - Corrente simétrica momentânea ( $I_{sym\_m}$ ) [kA]	Tensão na barra do condomínio [pu]
Cenário 1	0	0,67
Cenário 2	1,944	0,96

FONTE: A autora (2018)

TABELA 30 - Resultados do cálculo de curto-circuito trifásico para o sistema de médio porte

Curto-circuito trifásico		
	Skss da bateria (Corrente de curto em regime permanente) [kA]	ip da bateria (Corrente de pico do curto-circuito) [kA]
Cenário 1	0	0
Cenário 2	155,9	0

FONTE: A autora (2018)

Para ambos os curtos, monofásico e trifásico, pelos valores das correntes de curto-circuito nos terminais onde o evento ocorre, percebe-se uma contribuição da bateria aumentando a corrente de curto-circuito quando ela é inserida no sistema. Entretanto, esse efeito para o curto-circuito em si não é muito significativo, pois o valor das correntes de curto possui uma magnitude muito maior que a magnitude da corrente de contribuição da bateria.

Deve-se analisar também, o fato de que a corrente que chega ao "Terminal" passa antes pelo "Transformador de Distribuição" e, portanto, mesmo que ela não seja significativa para a rede, essa corrente gerada pela bateria durante o curto-circuito pode prejudicar a vida útil do transformador.

### 5.2.3 Simulação Quase-Dinâmica do Sistema de Médio Porte

Assim como realizado para o sistema de pequeno porte, esta análise aplica o conceito de *peak-shaving*, e como o sistema possui geração fotovoltaica, o comportamento do modelo de bateria ocorre como explicado na seção 4.2.2.1. A capacidade da bateria é igual a 225 kWh, e sua potência 50 kW.

Sendo assim, a forma de atuação da bateria para dias úteis, sábados e domingos, durante o período citado na seção 4.1.1.2, além disso os parâmetros

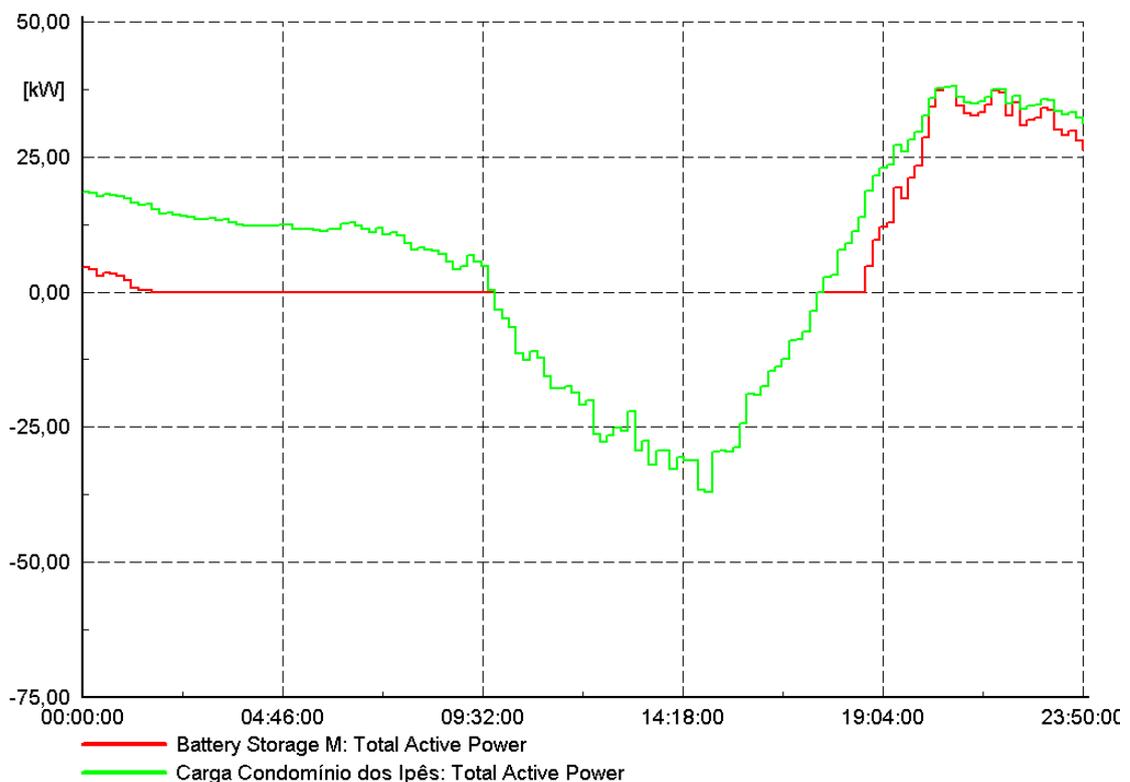
utilizados para configurar as variáveis apresentadas na TABELA 8, pode ser visto na TABELA 31. Os parâmetros foram os mesmos para dias úteis, sábados e domingos.

TABELA 31 - Valores dos parâmetros do modelo quase-dinâmico do sistema de médio porte

QDSL Model M		
Eini	0,225	MWh
SOCini	20	%
SOCmin	10	%
SOCmax	90	%
Pstore	0,05	MW
Qstore	0	MVAR
PFullStore	0,05	MW
PStartStore	0	MW
Pfeed	0,05	MW
Qfeed	0	MVAR
PStartFeed	0,018	MW
PFullFeed	0,05	MW
orientation	1	-

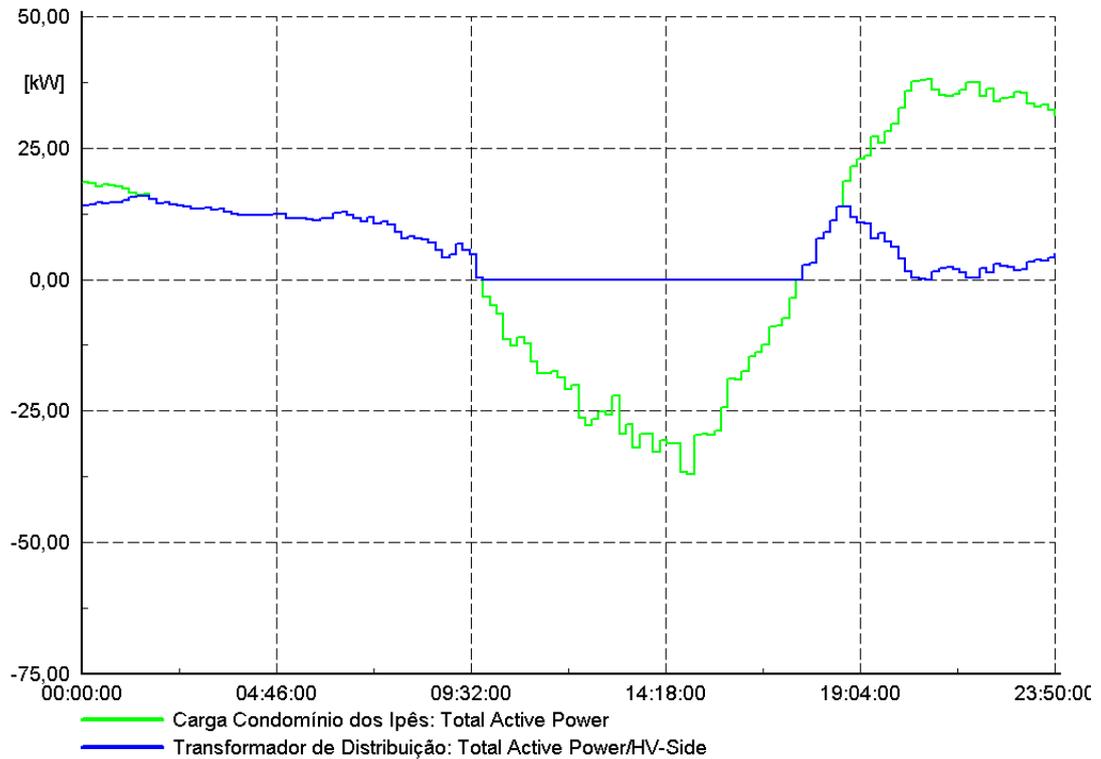
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 60 - Curvas do comportamento da potência ativa da carga do condomínio (verde) e da bateria (vermelha) ao longo de um dia útil



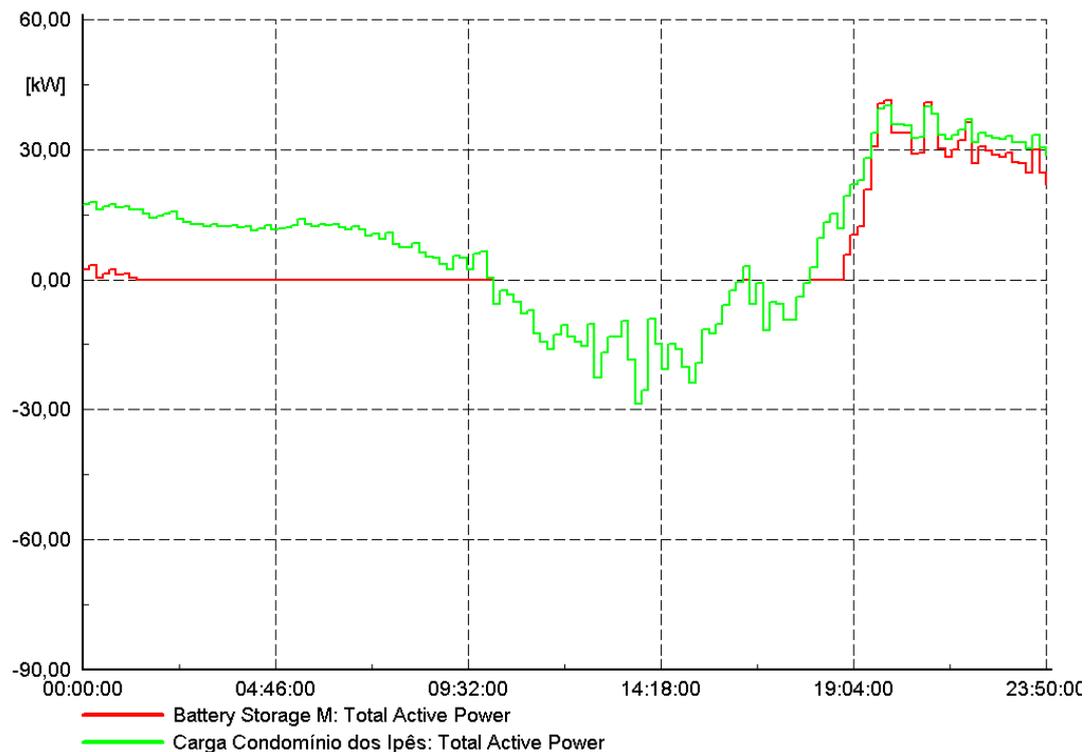
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 61 - Curva de potência ativa da carga do sistema de médio porte demandada antes (verde) e após a implantação da bateria (azul) ao longo de dias úteis



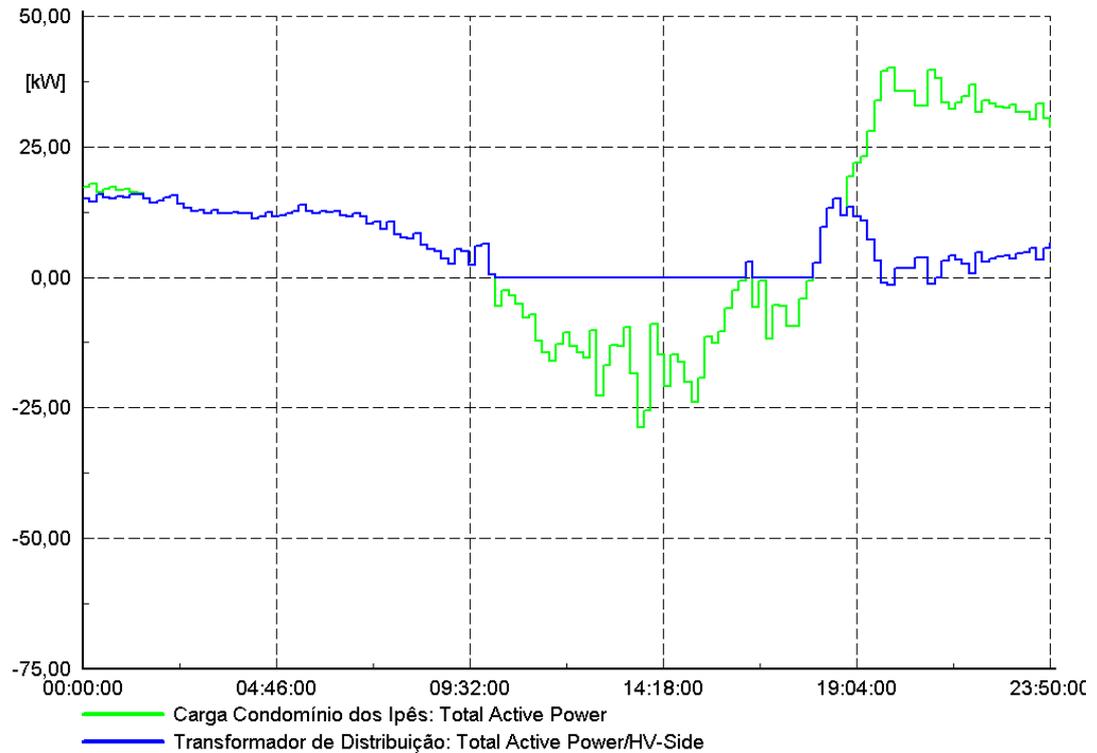
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 62 - Curvas do comportamento da potência ativa da carga do condomínio (verde) e da bateria (vermelha) aos sábados



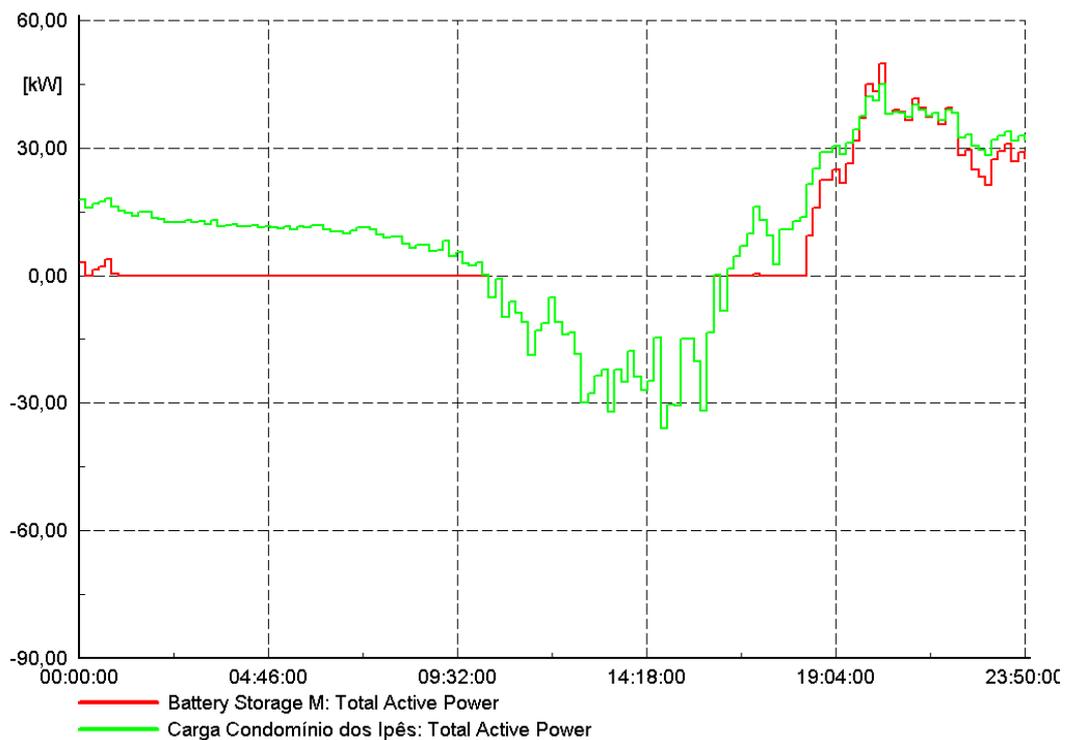
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 63 - Curva de potência ativa da carga do sistema de médio porte demandada antes (verde) e após a implantação da bateria (azul) aos sábados



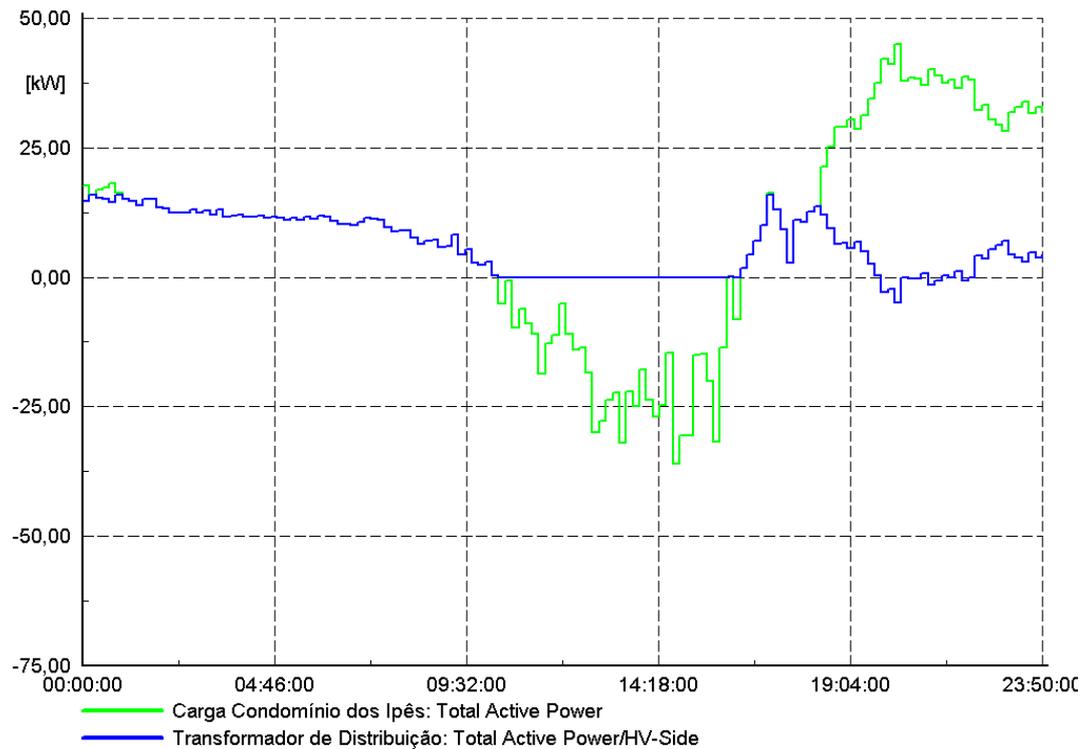
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 64 - Curvas do comportamento da potência ativa da carga do condomínio (verde) e da bateria (vermelha) aos domingos



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 65 - Curva de potência ativa da carga do sistema de médio porte demandada antes (verde) e após a implantação da bateria (azul) aos domingos



FONTE: A autora (2018)

Na FIGURA 60, na FIGURA 62 e na FIGURA 64 é possível visualizar em verde a curva da carga do condomínio com a soma da geração fotovoltaica, e em vermelho o comportamento da bateria durante o período de 24h para dias úteis, sábados e domingos. Nessas figuras, fica claro que a bateria carrega no momento em que a geração fotovoltaica é mais significativa, e descarrega no período em que não geração e o pico da carga tem valores mais altos, diminuindo a importação de energia elétrica da rede de distribuição.

O resultado da bateria, mostrado na FIGURA 61, FIGURA 63 e FIGURA 65 com a linha em azul, apresenta uma diferença de aproximadamente 15kW de diminuição do pico da carga em relação ao que se tinha antes da atuação do armazenamento de energia (curvas em verde). Pela capacidade dessa bateria, 225 kWh, o corte do pico da carga é muito eficiente.

#### 5.2.4 Simulação RMS/Transitória do Sistema de Médio Porte

Utilizando o modelo dinâmico introduzido na seção 4.2.2.2, primeiramente realizou-se uma simulação transitória com a potência da bateria igual a 50 kVA. Os valores utilizados para parametrizar os *Composite models* do equipamento podem ser vistos na TABELA 32, TABELA 33 e TABELA 34.

TABELA 32 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o *Common model PQ-Control-M*

PQ-Control-M		
Tr	0,01	s
Trq	0,1	s
Kp	2	pu
Tip	0,2	s
AC_deadband	0	pu
Kq	1	pu
Tiq	0,02	s
id_min	-0,8	pu
iq_min	-1	pu
id_max	1	pu
iq_max	1	pu

FONTE: A autora (2018)

TABELA 33 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o *Common model Charge Control-M*

Charge Control-M		
ChargeCur	0,05	pu
minSOC	0,1	pu
maxSOC	0,9	pu
deltaU	0,9	pu

FONTE: A autora (2018)

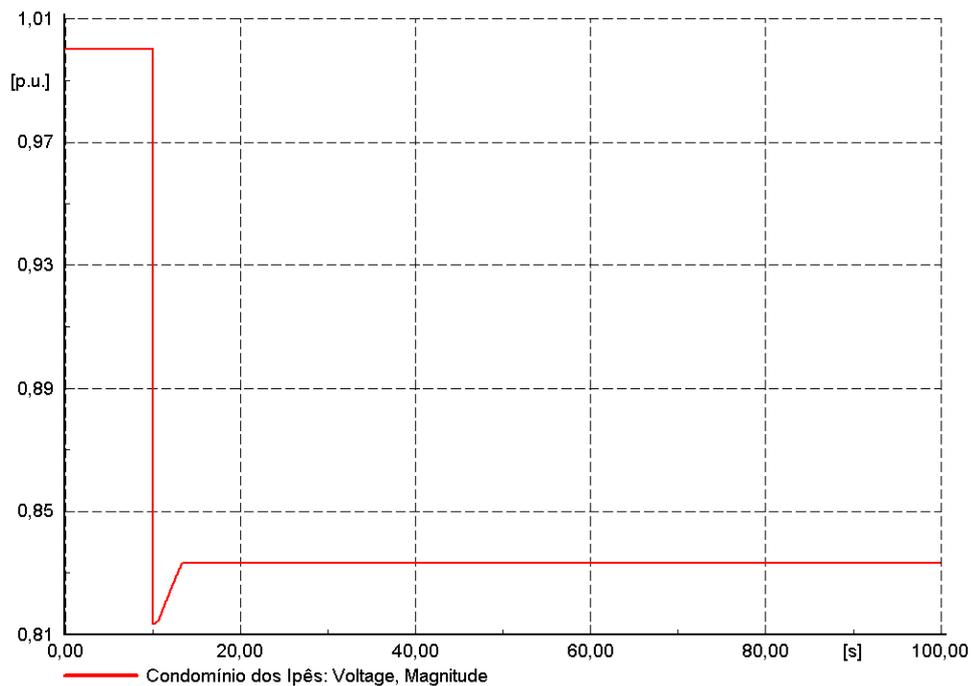
TABELA 34 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o *Common model Simple Battery-M*

Simple Battery-M		
SOC0	0,8	-
CellCapacity	40	Ah
u_min	10	V
u_max	13,85	V
CellsParallel	15	-
CellsInRow	10	-
RiCell	0,001	ohm

FONTE: A autora (2018)

Com os valores apresentados, foi aplicado um curto-circuito trifásico com impedância igual a 0,025 ohm no terminal que conecta o enrolamento primário do Transformador de Distribuição. Com o intuito de mostrar o controle da bateria fazendo a regulação da tensão para afundamentos de tensão em eventos de rápida duração, foi realizada uma simulação RMT, tendo-se ao final a curva da FIGURA 66.

FIGURA 66 - Tensão na barra do condomínio dos Ipês quando aplicado um curto-circuito no primário do transformador de distribuição com uma bateria de 50 kVA

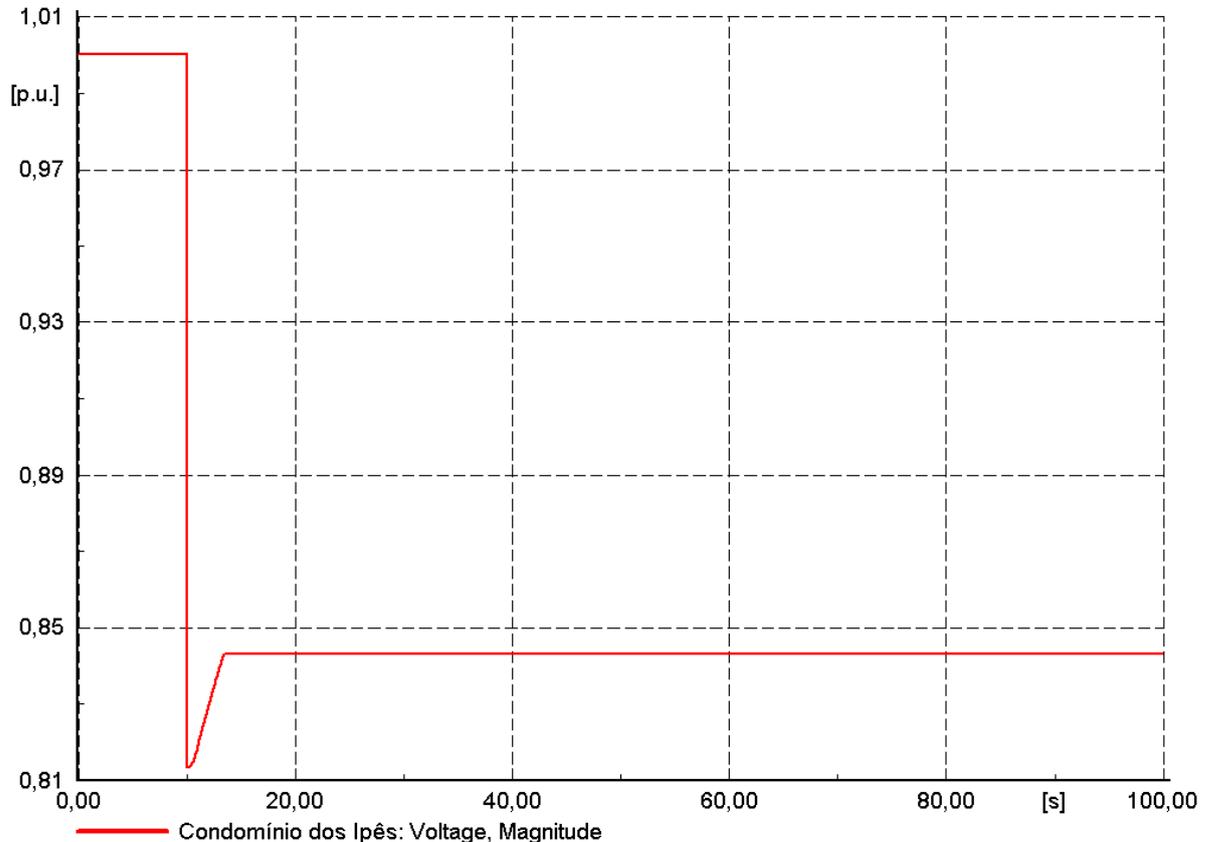


FONTE: A autora (2018)

Com o resultado mostrado na FIGURA 66, chega-se a mesma conclusão verificada na seção 5.1.3, que a bateria não consegue injetar potência suficiente na rede elétrica para recuperar o valor de tensão igual a 1 p.u. de antes do evento que causou o afundamento de tensão.

Neste caso, foi mudado o valor da potência da bateria para 75 kVA para verificar qual o efeito na regulação da tensão. Não foi possível aumentar tanto a potência do equipamento como feito para o sistema de pequeno porte, porque o Transformador de Distribuição possui uma potência de 75 kVA, conforme foi especificado na seção 4.1.1.2. O comportamento da tensão obtido após essa mudança pode ser visto na FIGURA 67.

FIGURA 67 - Tensão na barra do condomínio dos Ipês quando aplicado um curto-circuito no primário do transformador de distribuição com uma bateria de 75 kVA



FONTE: A autora (2018)

Verifica-se na FIGURA 67, uma diferença pouco significativa em relação à FIGURA 66. De uma recuperação de aproximadamente 0,02 p.u. que a bateria de 50 kVA consegue realizar, a bateria de 75 kVA recupera 0,03 p.u. da tensão pós falta.

Com isso, pode-se chegar à conclusão que com esse tipo de tecnologia de armazenamento de energia, para o sistema de médio porte não será possível fazer a regulação da tensão em eventos que causem uma distorção da tensão em um curto período de tempo, da ordem de segundos e minutos.

### 5.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO SISTEMA DE GRANDE PORTE

#### 5.3.1 Simulação de Fluxo de Potência do Sistema de Grande Porte

Para o sistema de grande porte, o fluxo de potência na subestação de Barão Geraldo será avaliado também durante os dias úteis, sábados e domingos. A análise

considerando os momentos em que a bateria está carregando ou descarregando será feita como no sistema de pequeno e médio porte. A TABELA 35 mostra os dois cenários e seus respectivos horários.

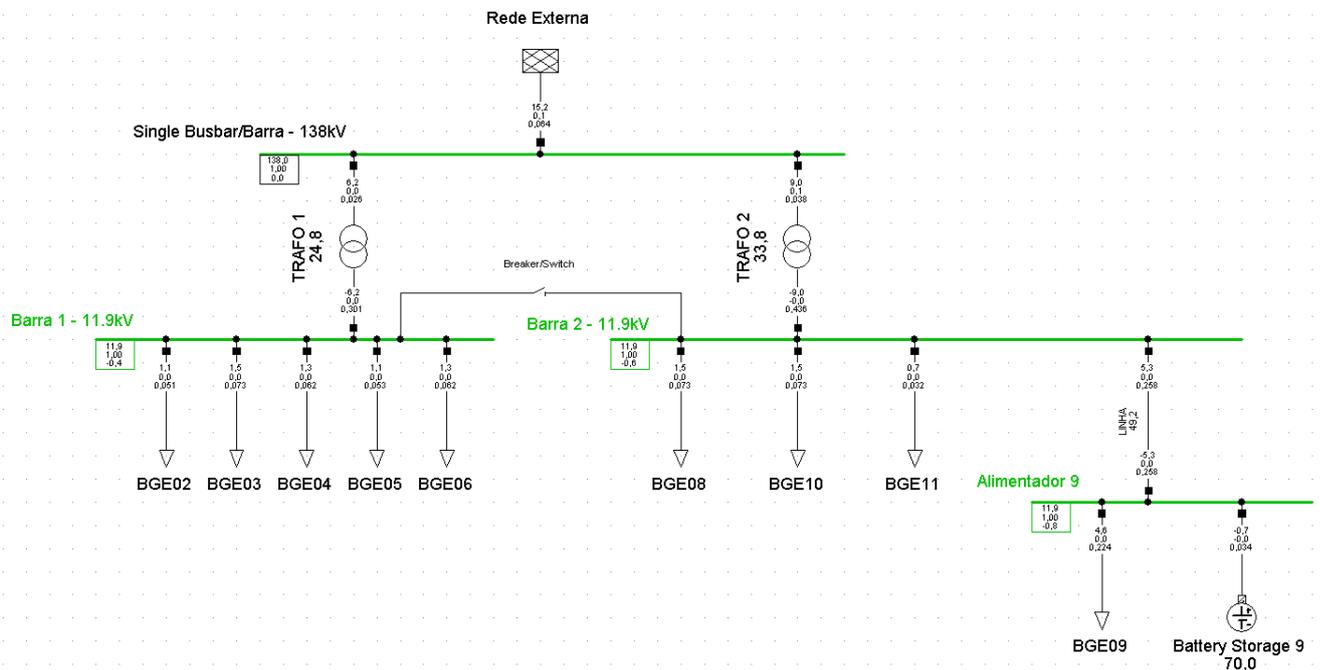
TABELA 35 - Cenários utilizados para a análise de fluxo de potência do sistema de grande porte

		Hora do dia	Estado da bateria
Dias úteis	Cenário 1	4h	Carregando
	Cenário 2	14h	Descarregando
Sábados	Cenário 1	4h	Carregando
	Cenário 2	12h	Descarregando
Domingos	Cenário 1	4h	Carregando
	Cenário 2	19h	Descarregando

FONTE: A autora (2018)

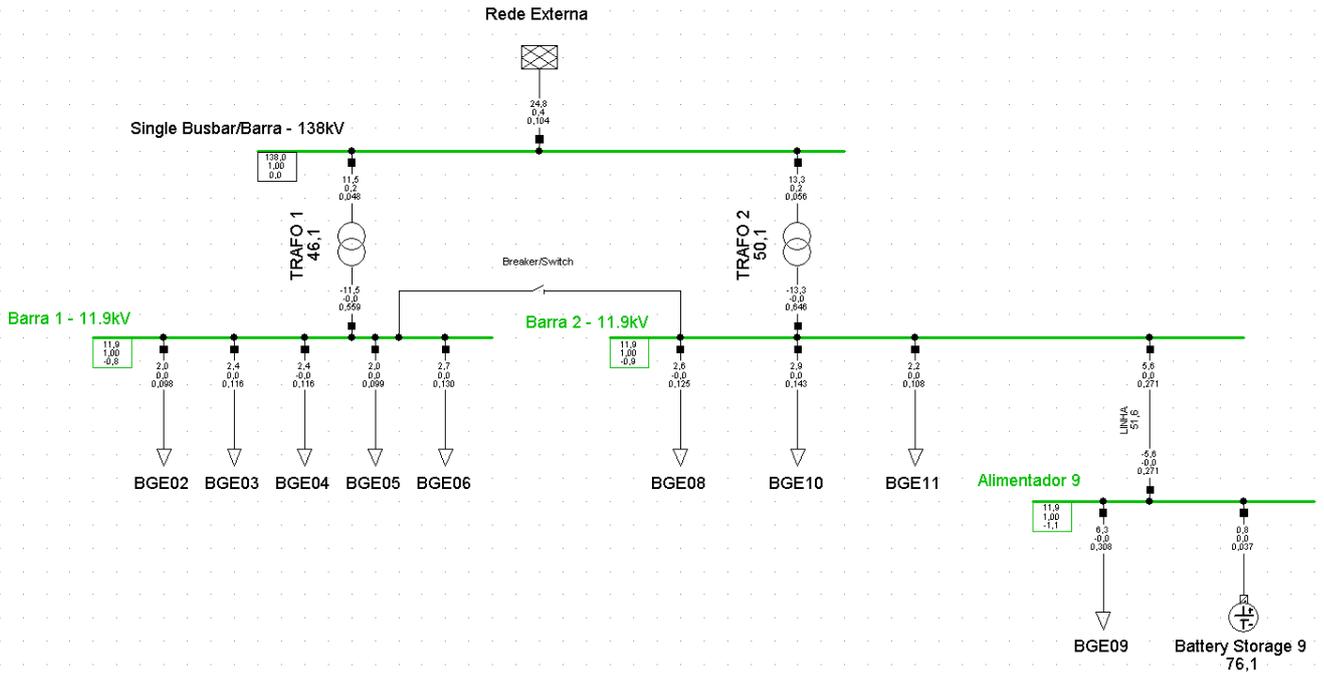
O sistema resultante com os fluxos de carga, quando utilizada uma bateria com capacidade de 1 MWh e 1 MVA, referentes aos dois cenários de cada período considerado pode ser visto da FIGURA 68 à FIGURA 73.

FIGURA 68 - Sistema de grande porte no Cenário 1 durante dias úteis



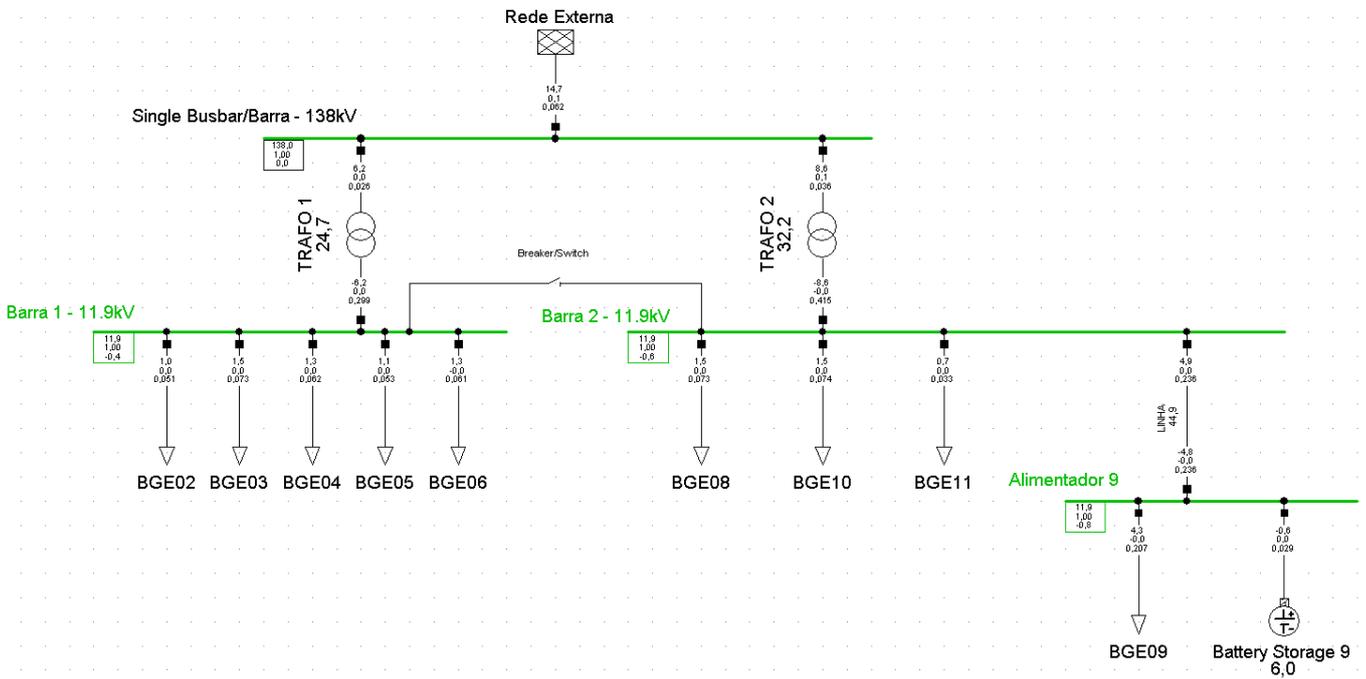
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 69 - Sistema de grande porte no Cenário 2 durante dias úteis



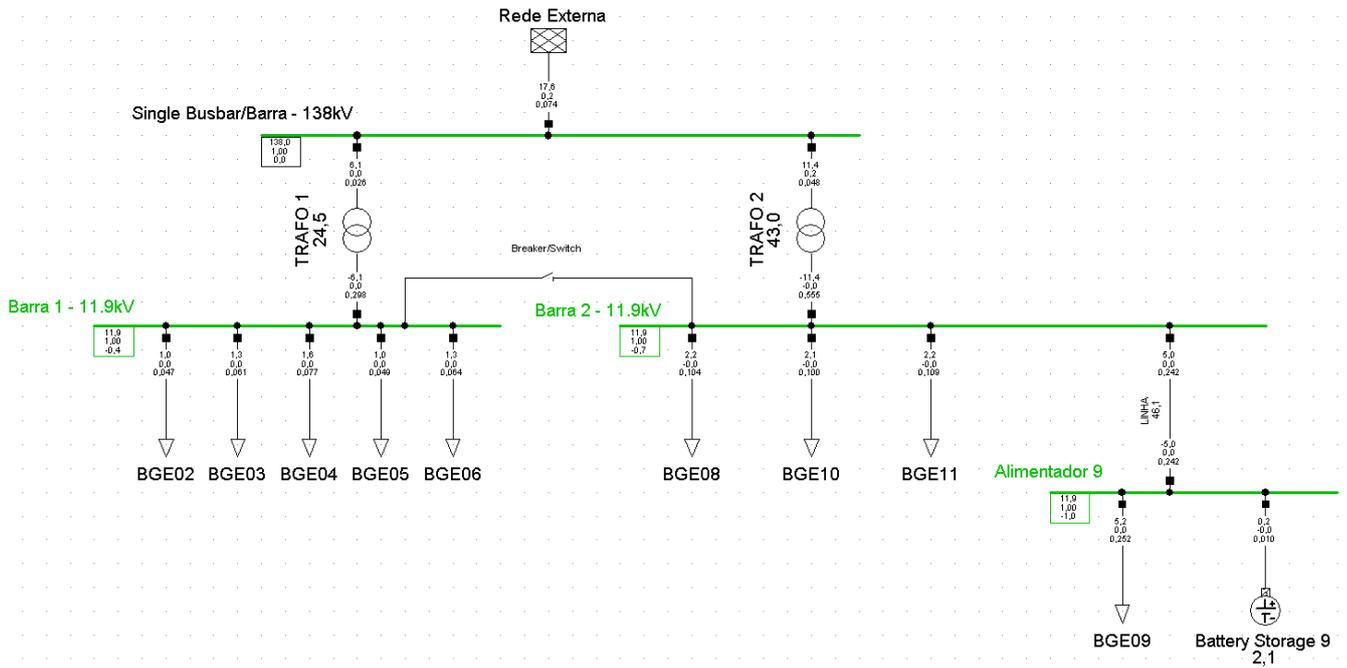
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 70 - Sistema de grande porte no Cenário 1 aos sábados



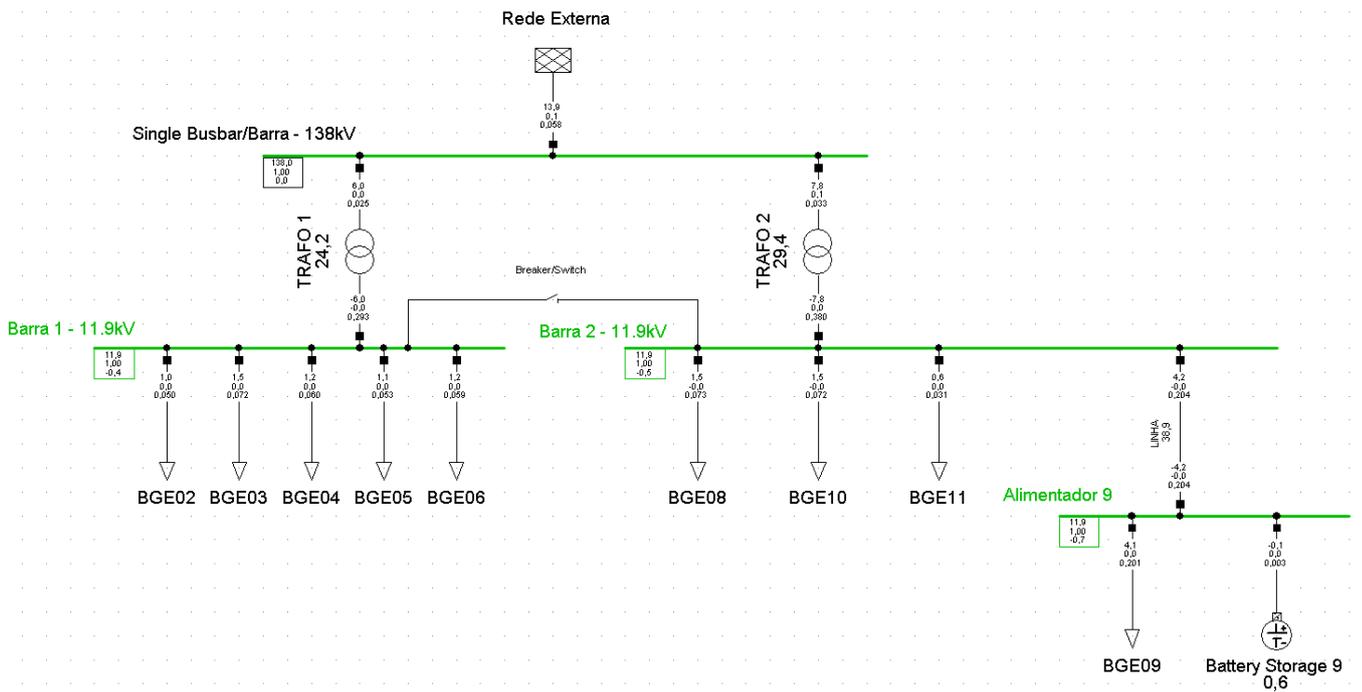
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 71 - Sistema de grande porte no Cenário 2 aos sábados



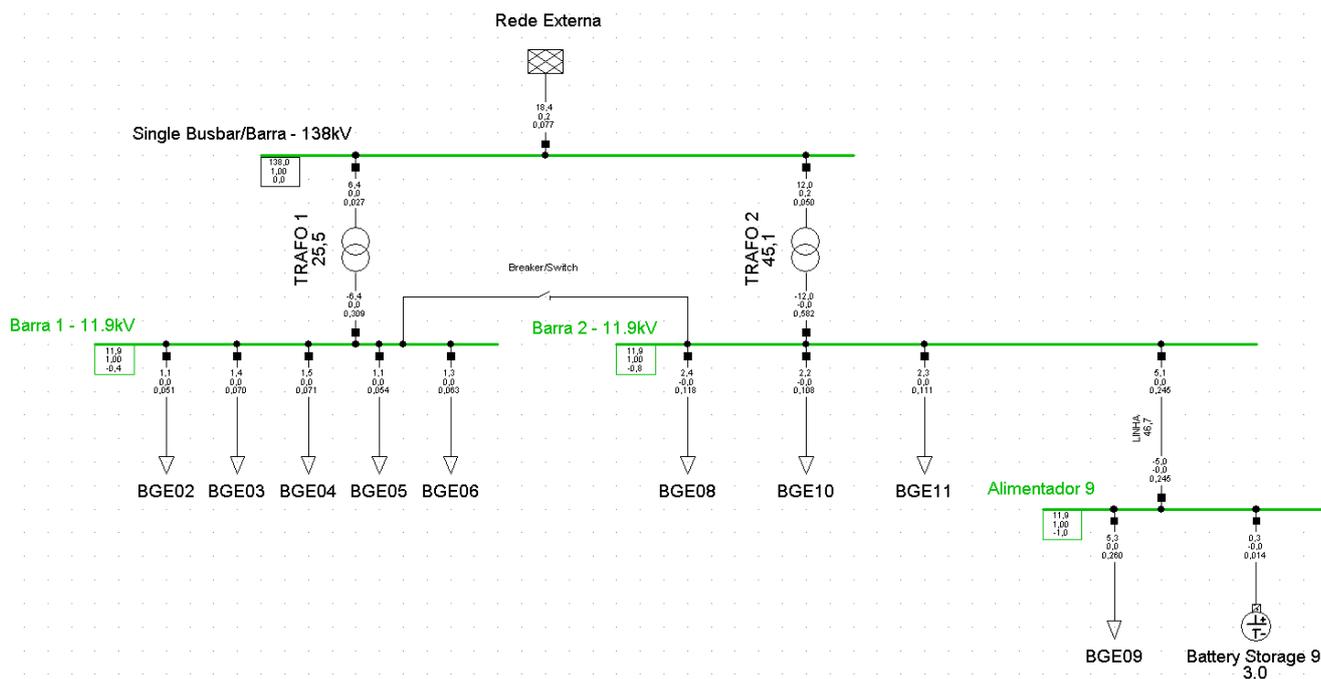
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 72 - Sistema de grande porte no Cenário 1 aos domingos



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 73 - Sistema de grande porte no Cenário 2 aos domingos



FONTE: A autora (2018)

As tabelas TABELA 36, TABELA 37 e TABELA 38 mostram com mais clareza os valores resultantes das simulações de fluxo de potência realizadas.

TABELA 36 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de grande porte durante dias úteis

Dias Úteis	Bateria carregando		Bateria descarregando	
	Potência Ativa (MW)	Tensão (pu)	Potência Ativa (MW)	Tensão (pu)
Trafo 2	-9	-	-13,3	-
Linha	-5,3	-	-5,6	-
Bateria	-0,7	-	0,8	-
Barra do Alimentador 9	-	1	-	1

FONTE: A autora (2018)

TABELA 37 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de grande porte aos sábados

Sábados	Bateria carregando		Bateria descarregando	
	Potência Ativa (MW)	Tensão (pu)	Potência Ativa (MW)	Tensão (pu)
Transformador	-8,6	-	-11,4	-
Linha	-4,8	-	-5	-
Bateria	-0,6	-	0,2	-
Barra do Alimentador 9	-	1	-	1

FONTE: A autora (2018)

TABELA 38 - Resumo dos resultados do fluxo de potência do sistema de grande porte aos domingos

Domingos	Bateria carregando		Bateria descarregando	
	Potência Ativa (MW)	Tensão (pu)	Potência Ativa (MW)	Tensão (pu)
Transformador	-7,8	-	-12	-
Linha	-4,2	-	-5	-
Bateria	-0,1	-	0,3	-
Barra do Alimentador 9	-	1	-	1

FONTE: A autora (2018)

Fazendo uma análise dos valores da TABELA 36, TABELA 37 e TABELA 38, pode-se concluir que com o tipo de comportamento estabelecido para a bateria, a rede elétrica da subestação sofre menos impactos do que se não houvesse a inserção do armazenamento de energia, principalmente o transformador que fica menos carregado nos momentos de descarga do equipamento de armazenamento. Se a bateria tivesse uma capacidade maior, o impacto sobre o sistema seria ainda menor, pois seria possível entregar ainda mais energia para aliviar a carga do sistema da subestação. Entretanto, há o viés de que também seria necessário aumentar a quantidade de energia importada para carregar a bateria, sendo um impasse que deve ser avaliado conforme as necessidades de cada projeto.

### 5.3.2 Simulação de Curto-Circuito do Sistema de Grande Porte

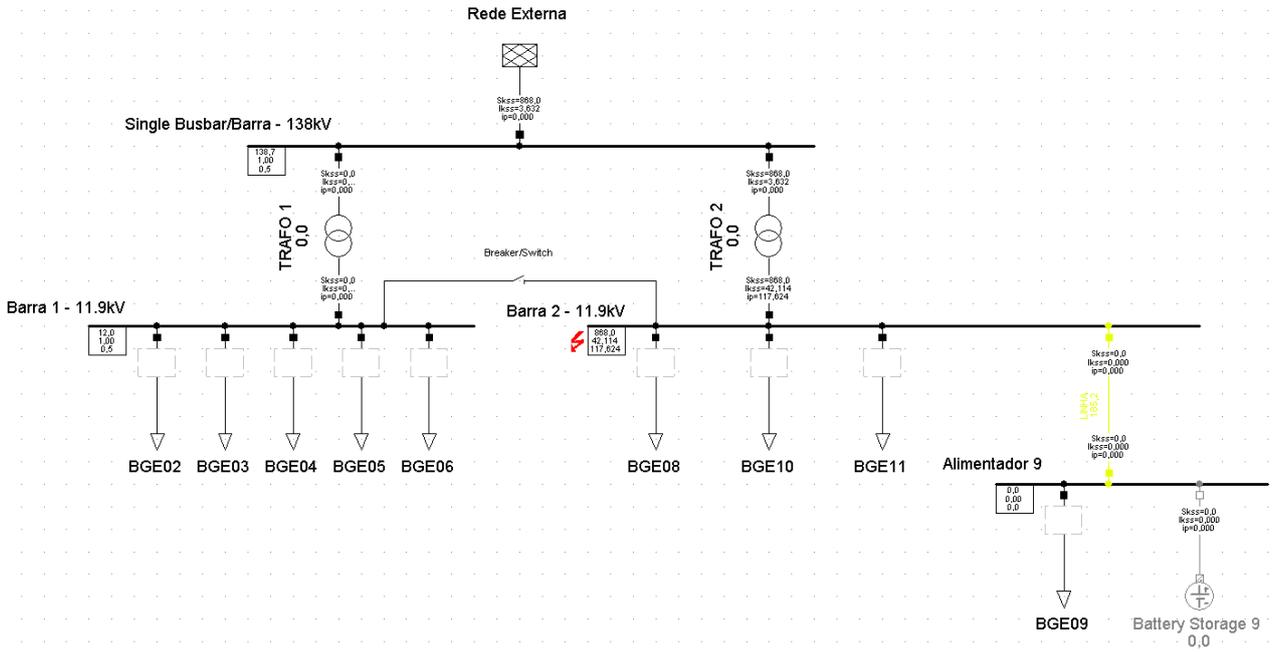
Os cálculos de curto-circuito foram realizados da mesma forma do sistema de médio porte, e aplicando-se a falta na "Barra 2 – 11,9kV". Afim de observar o impacto que a bateria causa no sistema elétrico da subestação no momento de um curto-circuito trifásico, foram feitas duas análises:

- Cenário 1: Sistema de médio porte SEM bateria;
- Cenário 2: Sistema de médio porte COM bateria.

Além disso, o curto trifásico é enquadrado na norma IEC 60909, sendo que a bateria age no momento da falta como se fosse um *static converter-fed drive* conforme define a norma e é explicado na seção 3.2.2

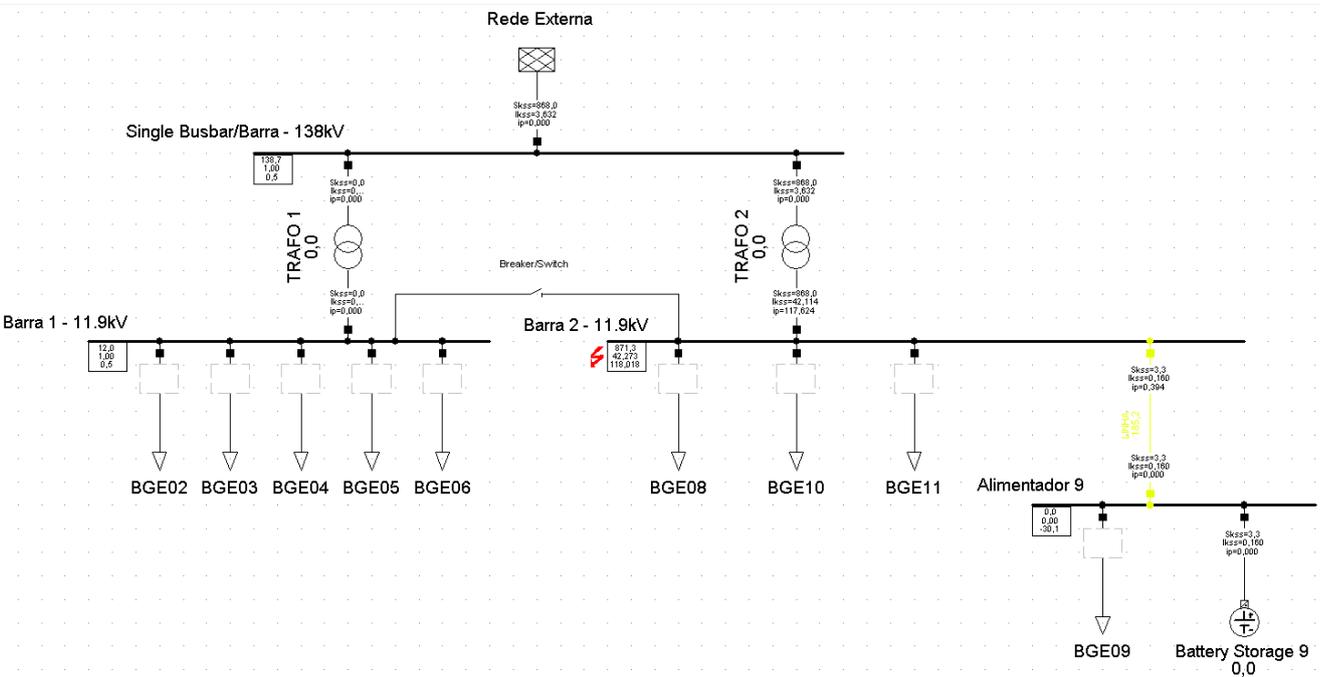
A seguir, na FIGURA 74 e na FIGURA 75, estão os resultados encontrados para cada cenário definido.

FIGURA 74 - Resultado do curto-circuito trifásico no sistema de grande porte sem armazenamento de energia



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 75 - Resultado do curto-circuito trifásico no sistema de grande porte com armazenamento de energia



FONTE: A autora (2018)

Para melhorar a visualização dos resultados, e por consequência, a análise deles também, os valores de interesse adquiridos na simulação de curto-circuito estão na TABELA 39.

TABELA 39 - Resultados do cálculo de curto-circuito trifásico para o sistema de grande porte

Curto-circuito trifásico		
	Skss da bateria (Potência de curto em regime permanente) [MVA]	Ikss da bateria (Corrente de curto em regime permanente) [kA]
Cenário 1	0	0
Cenário 2	3,3	0,16

FONTE: A autora (2018)

Pelos valores da TABELA 39, percebe-se uma contribuição significativa da bateria de forma a aumentar as correntes se curto-circuito do sistema, pois são valores que não contribuem diretamente para prejuízos da rede elétrica, mas podem alterar a proteção do sistema da subestação próximo ao alimentador BGE09.

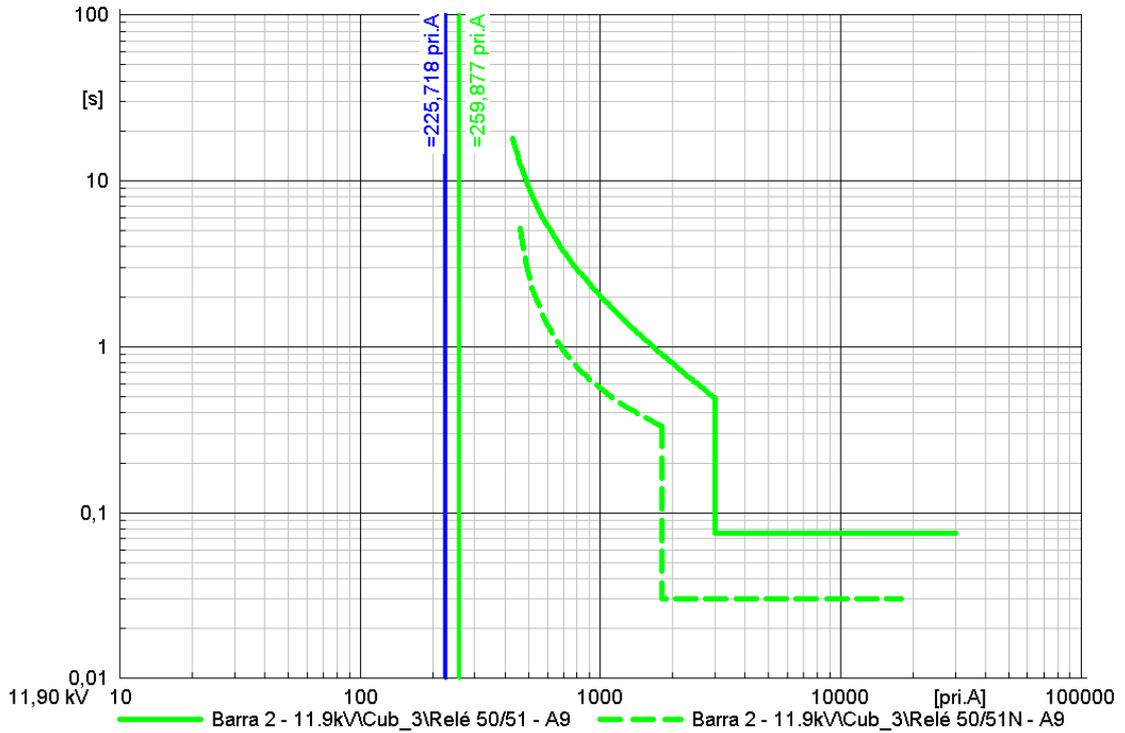
Sendo assim, uma análise do sistema de proteção focada na bateria, no alimentador BGE09 e na barra de 11,9 kV será realizada na seção 5.3.3.

### 5.3.3 Simulação do Esquema de Proteção do Sistema de Grande Porte

Nesta etapa de simulações, o objetivo foi avaliar como a bateria poderia alterar o esquema de proteção da região da subestação onde será inserida. Para isso foram analisadas as proteções de sobrecorrente temporizada de fase e de neutro (função 51 e 51N segundo a tabela ANSI) e de sobrecorrente instantânea de fase e de neutro (função 51 e 51N segundo a tabela ANSI) do alimentador BGE09 e da bateria, e a função de subtensão (função 27 segundo a tabela ANSI) da "Barra 2 – 11,9 kV".

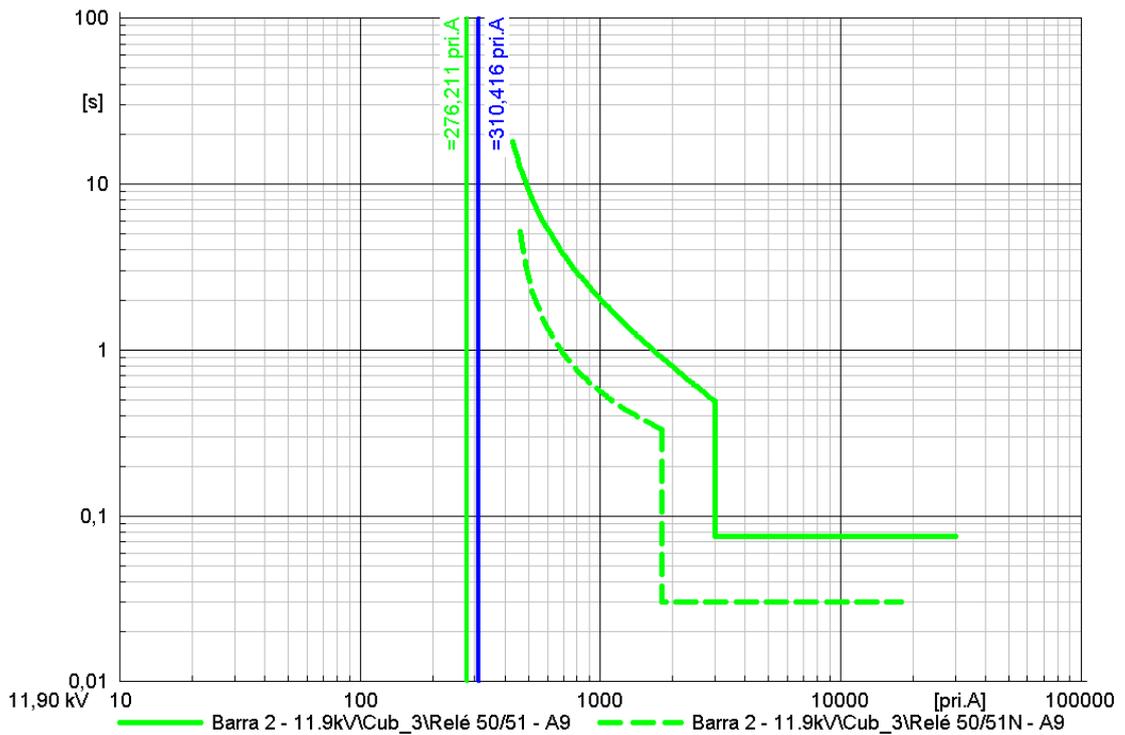
Em um primeiro momento foi avaliada a curva de "tempo (s) x corrente (A)" da proteção 51/51N e a corrente nominal do BGE09 para o sistema sem a bateria no horário de menor e maior demanda ( FIGURA 76 e FIGURA 77). Foi observado pelas curvas de carga da FIGURA 26, da FIGURA 27 e da FIGURA 28, que os horários correspondentes às menores demandas e aos picos da demanda de potência na subestação, são respectivamente em torno das 5h e das 16h.

FIGURA 76 - Gráfico mostrando a curva de proteção 51/51N e a corrente nominal do alimentador BGE09 sem e com a presença bateria às 5h



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 77 - Gráfico mostrando a curva de proteção 51/51N e a corrente nominal do alimentador BGE09 sem e com a presença bateria às 16h



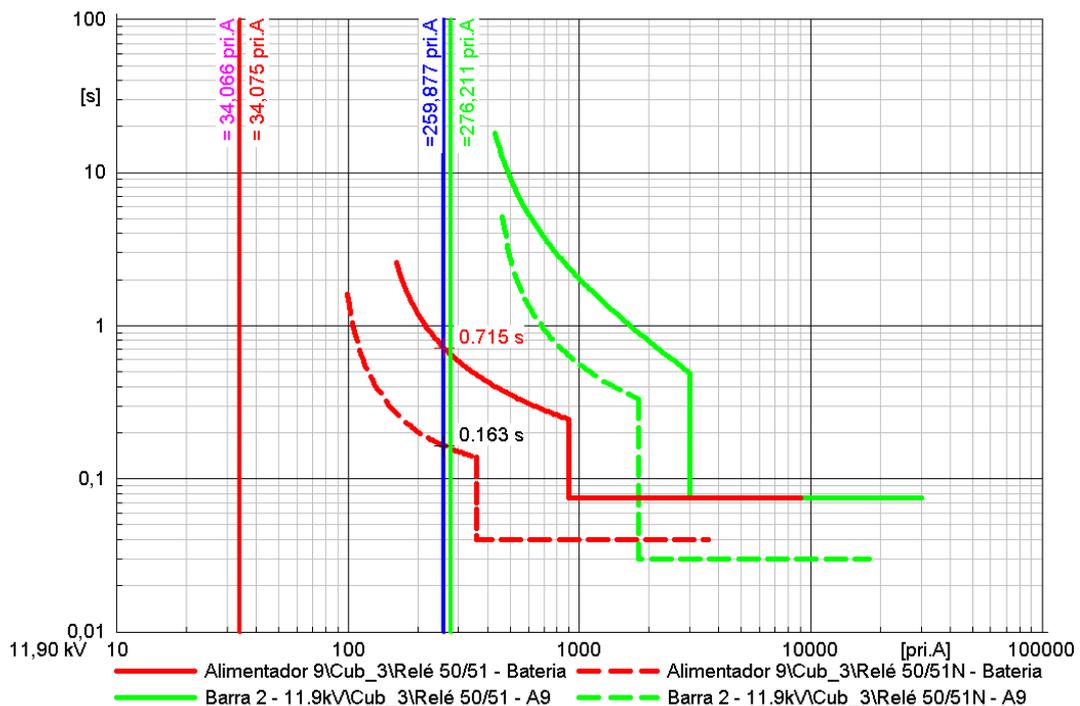
FONTE: A autora (2018)

Na FIGURA 76 e na FIGURA 77 estão representadas em verde as linhas relacionadas à proteção 50/50N e 51/51N do alimentador BGE09, e também a linha representando a corrente nominal que vista pelo transformador de corrente (TC) com a bateria, para os dois períodos do dia citados anteriormente. Em azul escuro está alinhada que representa a corrente em regime permanente detectada pelo TC sem a bateria.

Além disso, percebe-se que a corrente nominal percebida pelo transformador de corrente do alimentador de proteção da bateria aumenta com a inserção da bateria passando de 225,718 A para 259,877 A para o horário das 5h, pois a bateria está absorvendo potência ativa da rede nesse período. Já no horário das 16h, a corrente que passa pelo mesmo TC diminui de 288,465 A para 286,292 A. Isso se deve ao fato de que nesse momento a bateria está descarregando e, portanto, injetando potência na rede, sem precisar de uma contribuição tão grande da rede para alimentar as cargas do BGE09, sendo assim o valor de corrente que passa pelo TC é menor.

Na FIGURA 78, podem ser vistas as curvas de proteção 50/50N e 51/51N para o alimentador BGE09 e para a bateria, e as correntes nominais no horário das 5h e das 16h, que foram utilizadas para parametrizar os relés de sobrecorrente.

FIGURA 78 - Gráfico mostrando a curva de proteção 51/51N e 50/50N e a corrente nominal do alimentador BGE09 e da bateria às 5h e às 16h



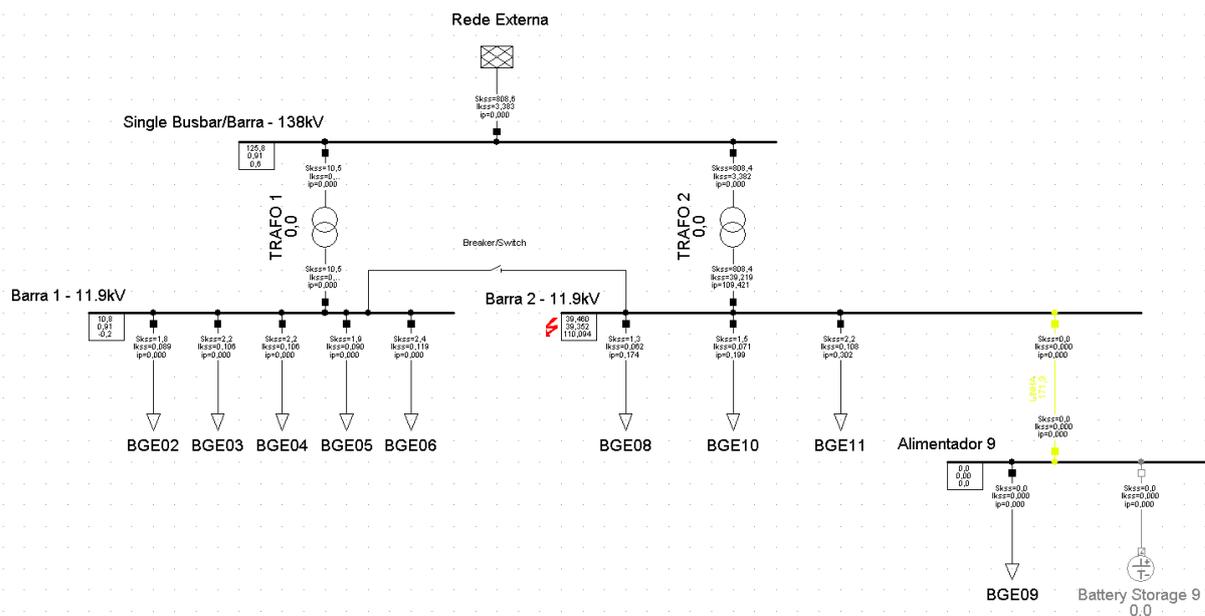
FONTE: A autora (2018)

Na FIGURA 78, as linhas rosa e azul representam a corrente nominal da bateria e do alimentador às 5h, em quanto as linhas representam a corrente nominal da bateria e do alimentador às 16h estão em vermelho e verde, respectivamente. Na mesma imagem, também podem ser vistas as curvas dos relés de proteção 50/50N e 51/51N, sendo que as vermelhas correspondem à bateria, e as verdes ao alimentador BGE09.

Dessa primeira análise percebe-se que a inserção da bateria não altera de forma significativa os parâmetros para configuração das curvas dos relés de sobrecorrente, fator que não precisa ser de grande preocupação quando a bateria é inserida no sistema.

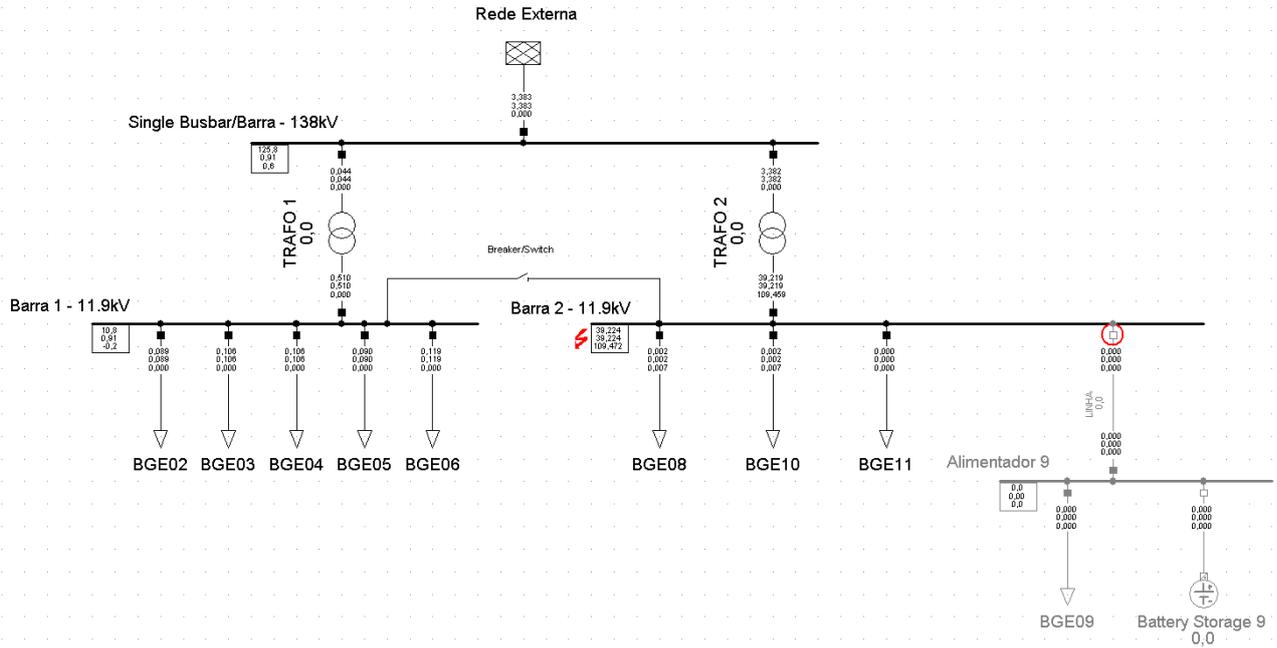
A segunda análise de proteção realizada foi voltada à mudança da corrente de curto-circuito quando ocorre uma falta trifásica na barra de 11,9 kV, quando a bateria é inserida no sistema. As figuras FIGURA 79 e FIGURA 80, apresentam o resultado do curto-circuito trifásico na Barra 2 - 11,9 kV relacionado à atuação da proteção antes da inserção da bateria. Na FIGURA 81, é apresentada uma imagem do que o *PowerFactory* apresenta das funções dos relés que foram atuadas após a falta.

FIGURA 79 - Gráfico mostrando a curva de proteção 51/51N e a corrente de curto-circuito trifásico do alimentador BGE09 antes da inserção da bateria para uma falta na "Barra 2 – 11,9 kV"



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 80 - Diagrama da subestação após a atuação da proteção para o curto-circuito trifásico antes da inserção da bateria para uma falta na "Barra 2 – 11,9 kV"



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 81 - Janela do programa mostrando o relé que atuou para o curto-circuito trifásico na "Barra 2 – 11,9 kV" sem a bateria

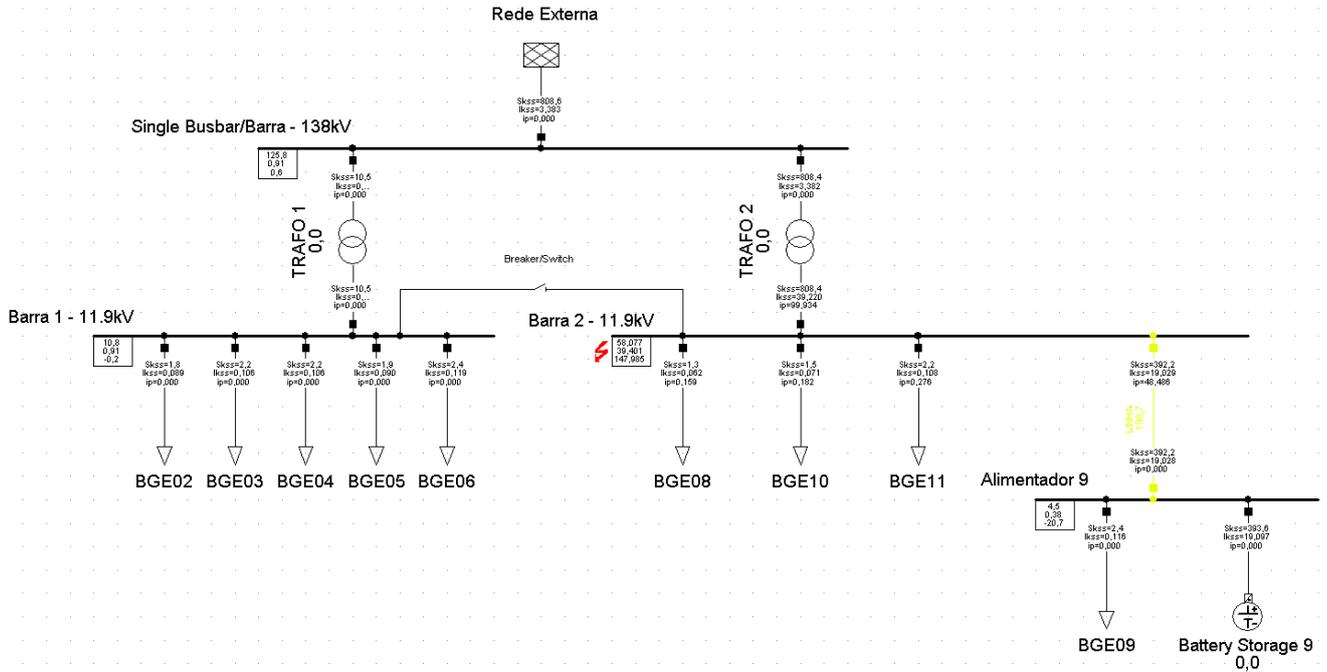
	Protection device	Protection device Time [s]	Switch	Switch Time [s]	Switch Blocked
▶ 1 ->	Subtensão	0,120	Switch	0,120	<input type="checkbox"/>

FONTE: A autora (2018)

Sendo assim, pode-se concluir que para o curto-circuito trifásico na "Barra 2 – 11,9 kV" sem a bateria, apenas a proteção 27 de subtensão irá atuar, pois considera-se que a carga do alimentador BGE09 não possui nenhum tipo de gerador que possa contribuir para a falta de forma atuar o relé de sobrecorrente.

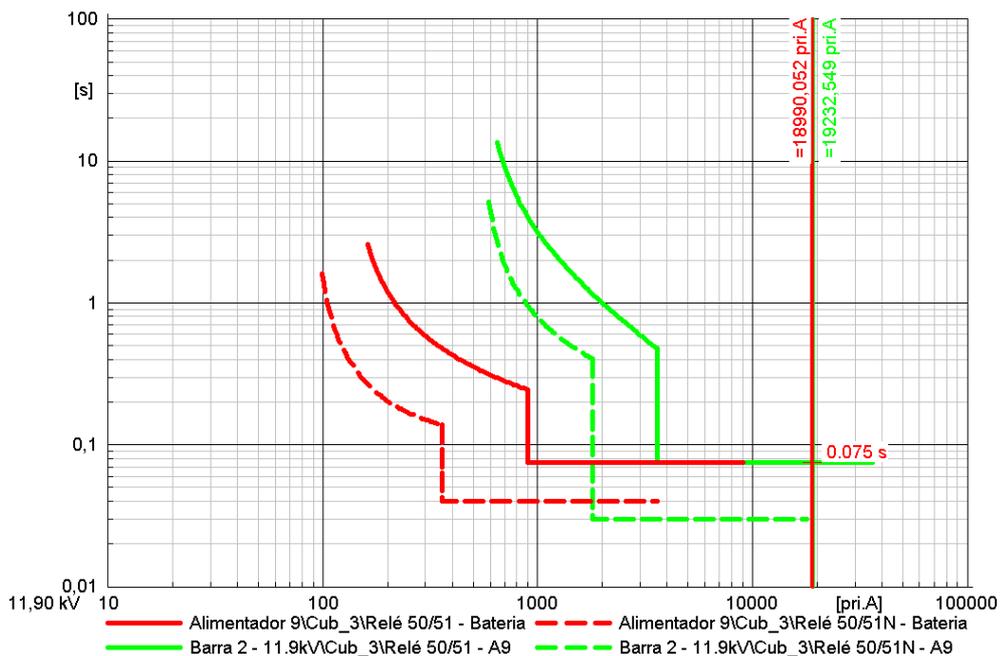
Agora as figuras FIGURA 82, FIGURA 83 e FIGURA 84, mostram a proteção atuando para um curto-circuito na mesma barra, porém com a bateria inserida no sistema.

FIGURA 82 - Diagrama da subestação mostrando o momento do curto-circuito trifásico com a bateria inserida no sistema para uma falta na "Barra 2 – 11,9 kV"



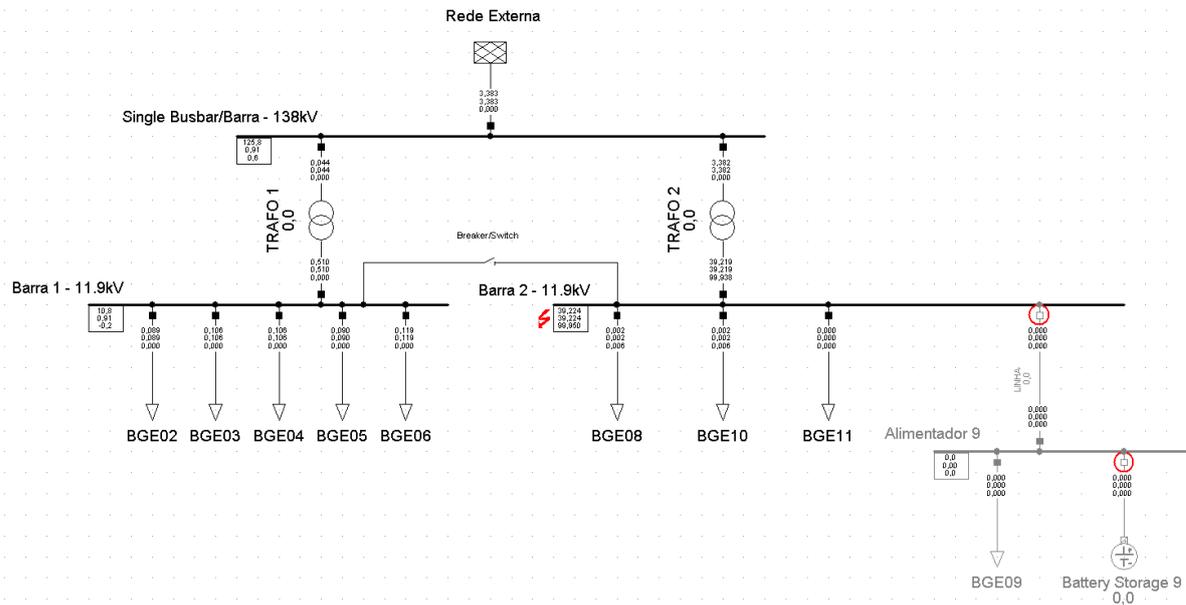
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 83 - Gráfico mostrando a curva de proteção 51/51N e a corrente de curto-circuito trifásico do alimentador BGE09 e da bateria para uma falta na "Barra 2 – 11,9 kV"



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 84 - Diagrama da subestação após a atuação da proteção para o curto-circuito trifásico com a bateria inserida no sistema para uma falta na "Barra 2 – 11,9 kV"



FONTE: A autora (2018)

Para o curto-circuito trifásico na "Barra 2 – 11,9 kV" inserindo a bateria, percebe-se que há uma grande contribuição deste equipamento na corrente de curto-circuito, o que faz os relés tanto do alimentador como da bateria atuarem de forma instantânea. Sendo assim, é importante prestar atenção nos valores das correntes de curto-circuito caso seja requerida uma atuação do relé de proteção 51 (temporizado) e não diretamente da proteção instantânea.

#### 5.3.4 Simulação Quase-Dinâmica do Sistema de Grande Porte

No caso do sistema de grande porte, não há um sistema de geração fotovoltaico que esteja impactando diretamente na curva de carga do alimentador. Sendo assim, o sistema de armazenamento de energia será recarregado em períodos do dia com menos consumo de energia elétrica, mas não em momentos em que haja energia elétrica sobrando e sendo exportada para a rede elétrica. Ou seja, a bateria terá como o objetivo diminuir a demanda apenas do alimentador BGE09 da subestação.

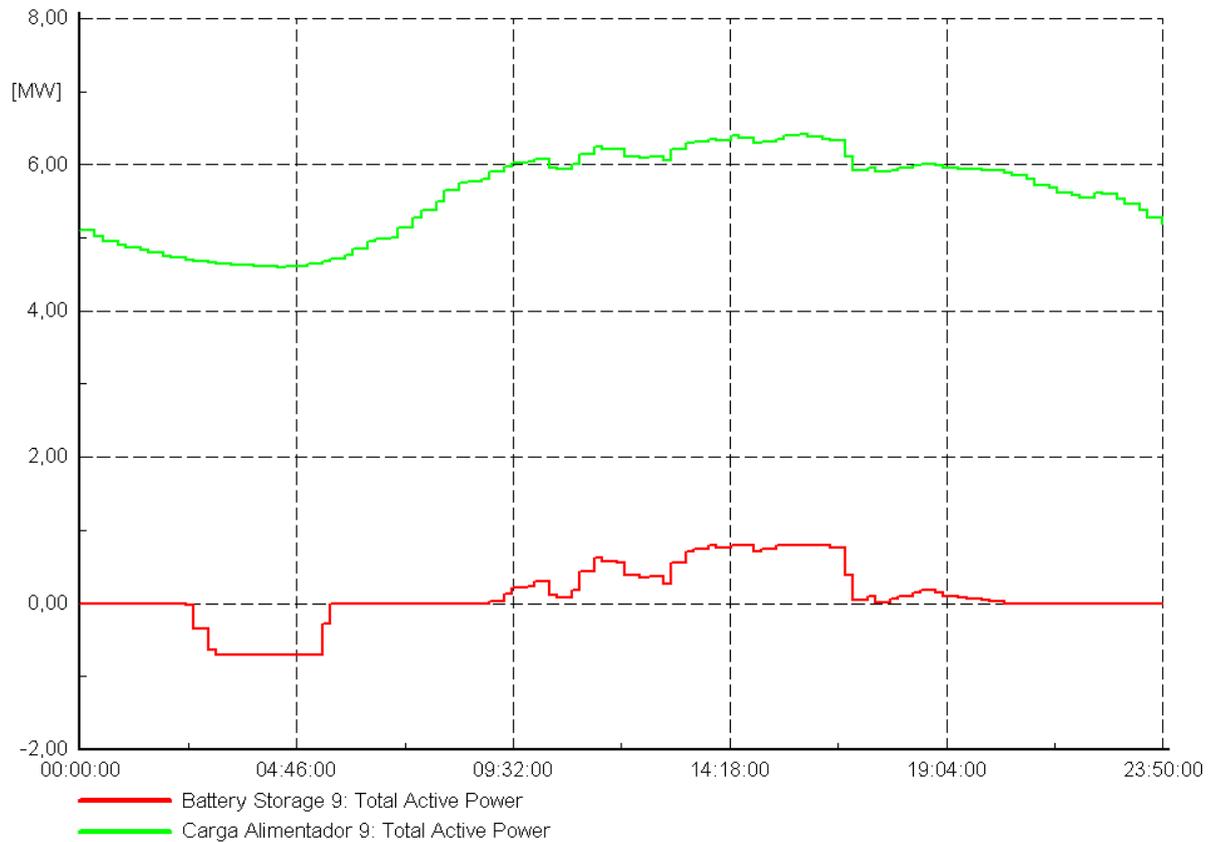
A seguir estão apresentadas as tabelas com os parâmetros utilizados e na sequência, as imagens com os resultados obtidos.

TABELA 40 - Valores dos parâmetros do modelo quase-dinâmico do sistema de grande porte para dias úteis

QDSL Model G - Dias Úteis		
Eini	1	MWh
SOCini	50	%
SOCmin	10	%
SOCmax	90	%
Pstore	0,7	MW
Qstore	0	MVAR
PFullStore	-4,65	MW
PStartStore	-4,7	MW
Pfeed	0,8	MW
Qfeed	0	MVAR
PStartFeed	5,9	MW
PFullFeed	6,35	MW
orientation	1	-

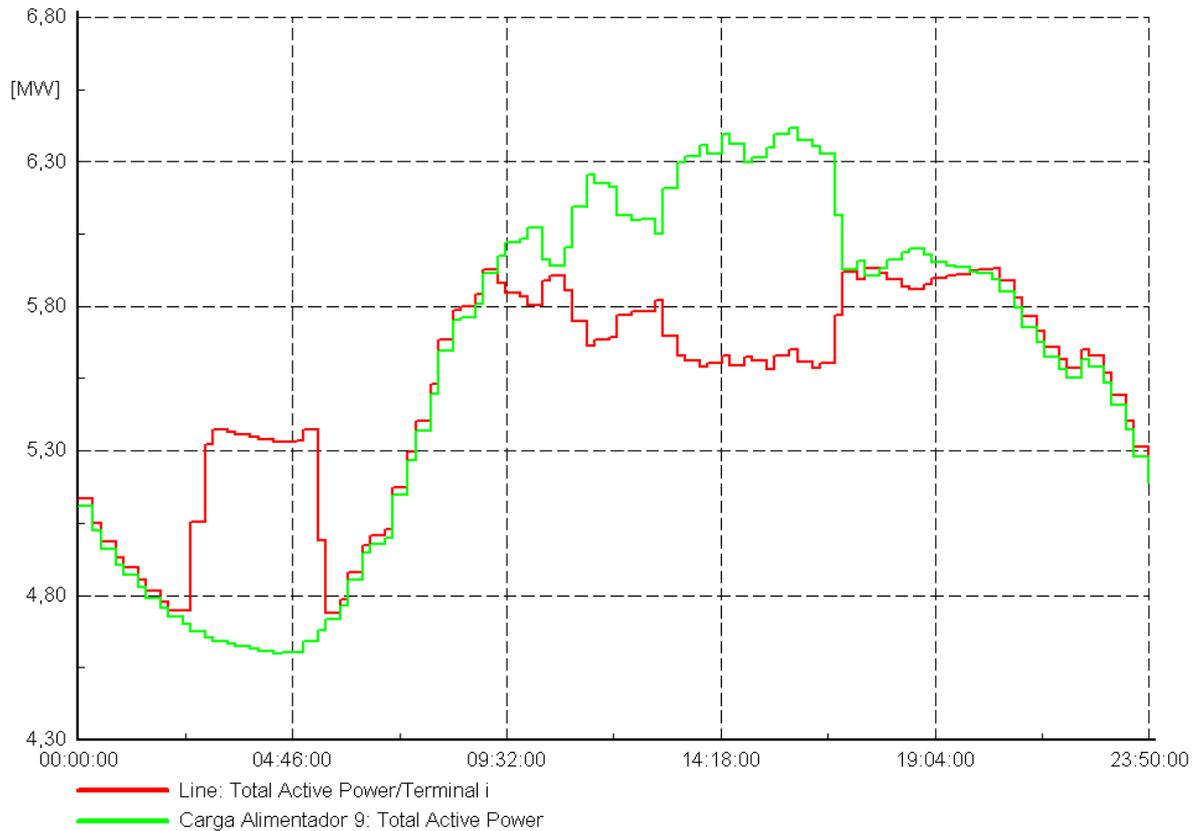
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 85 - Curvas do comportamento da potência ativa do alimentador BGE09 (verde) e da bateria (vermelha) ao longo de um dia útil



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 86 - Curva de potência ativa da carga para o sistema de grande porte demandada antes (verde) e após a implantação da bateria (vermelha) ao longo dos dias úteis



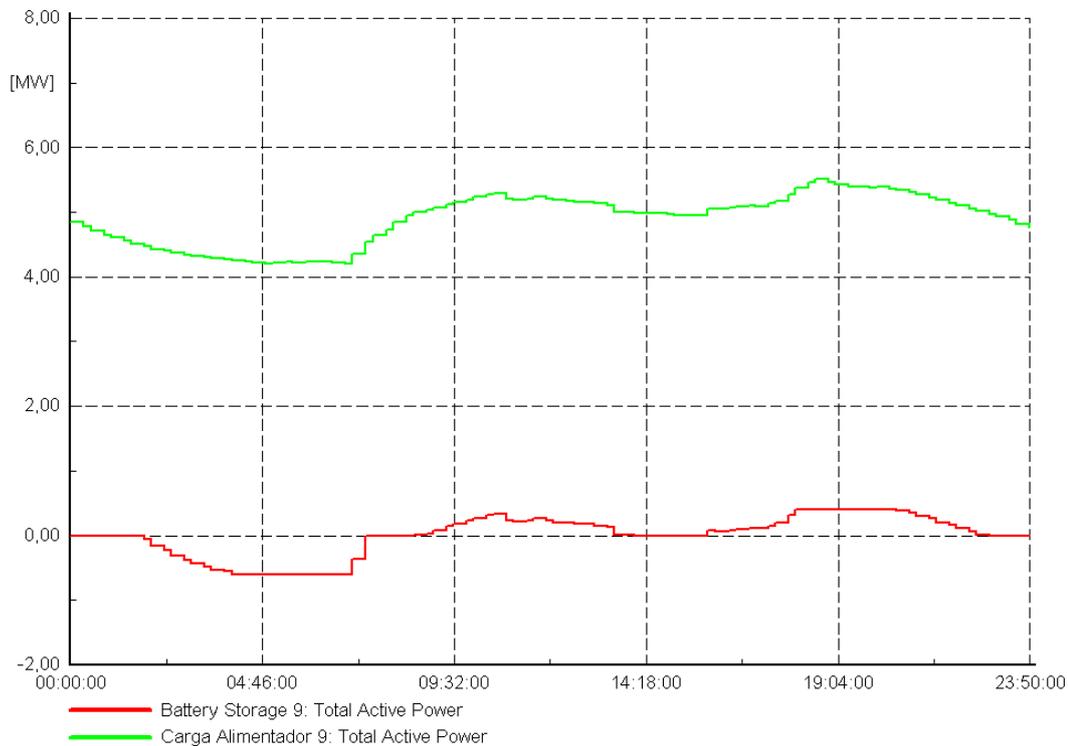
FONTE: A autora (2018)

TABELA 41 - Valores dos parâmetros do modelo quase-dinâmico do sistema de grande porte para os sábados

QDSL Model G - Sábados		
Eini	1	MWh
SOCini	20	%
SOCmin	10	%
SOCmax	90	%
Pstore	0,6	MW
Qstore	0	MVAR
PFullStore	-4,25	MW
PStartStore	-4,5	MW
Pfeed	0,4	MW
Qfeed	0	MVAR
PStartFeed	5	MW
PFullFeed	5,35	MW
orientation	1	-

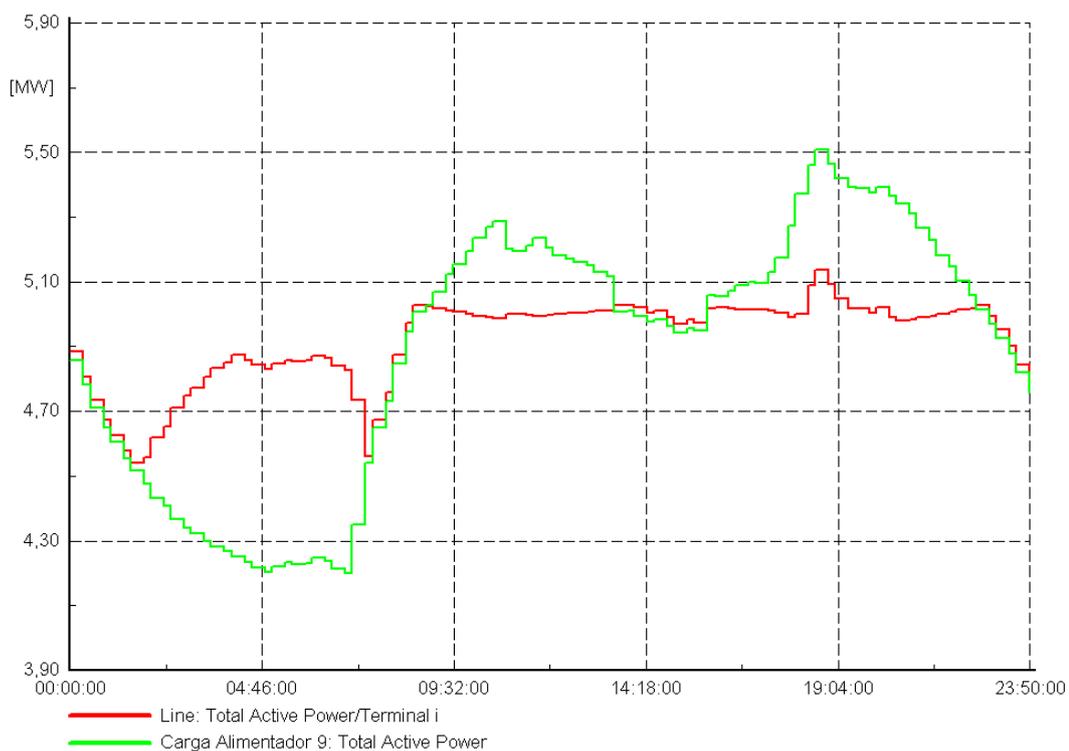
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 87 - Curvas do comportamento da potência ativa do alimentador BGE09 (verde) e da bateria (vermelha) aos sábados



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 88 - Curva de potência ativa da carga para o sistema de grande porte demandada antes (verde) e após a implantação da bateria (vermelha) aos sábados



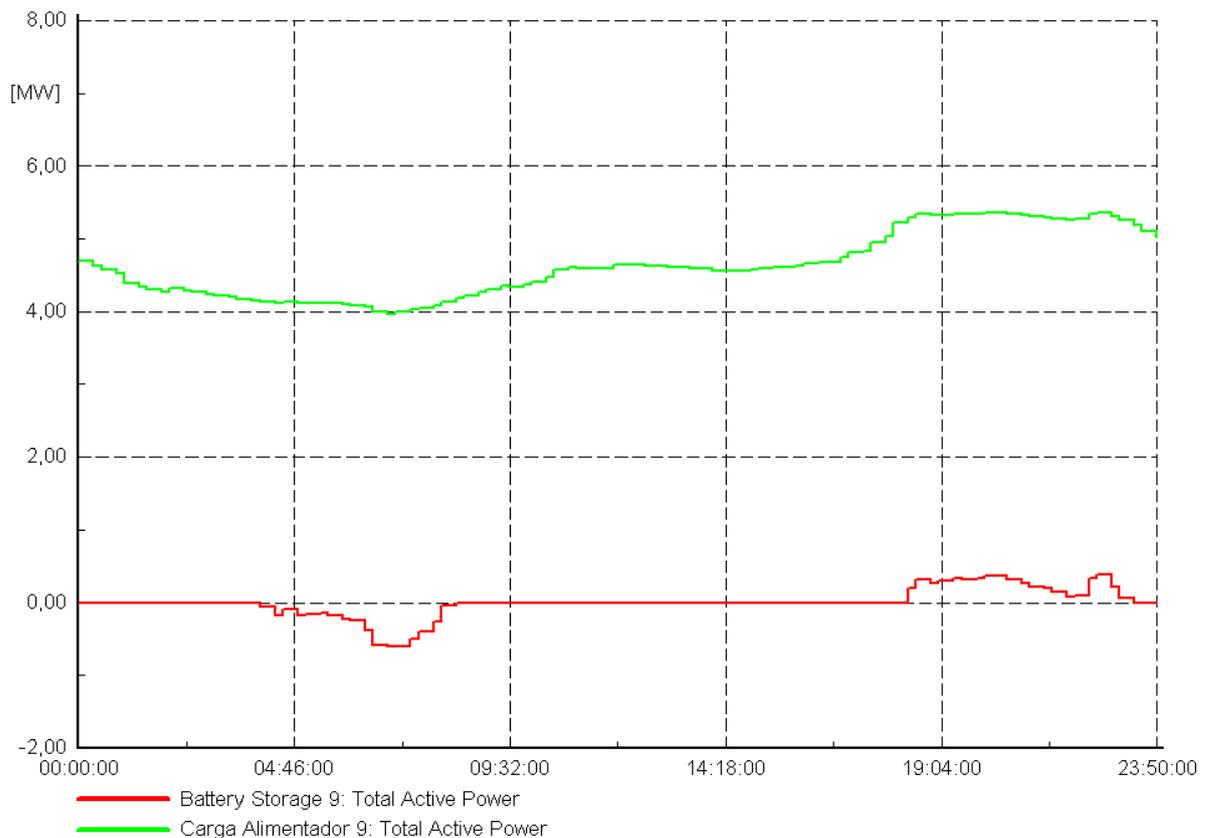
FONTE: A autora (2018)

TABELA 42 - Valores dos parâmetros do modelo quase-dinâmico do sistema de grande porte para os domingos

QDSL Model G - Domingos		
Eini	1	MWh
SOCini	20	%
SOCmin	10	%
SOCmax	90	%
Pstore	0,6	MW
Qstore	0	MVAR
PFullStore	-4	MW
PStartStore	-4,15	MW
Pfeed	0,4	MW
Qfeed	0	MVAR
PStartFeed	5,23	MW
PFullFeed	5,37	MW
orientation	1	-

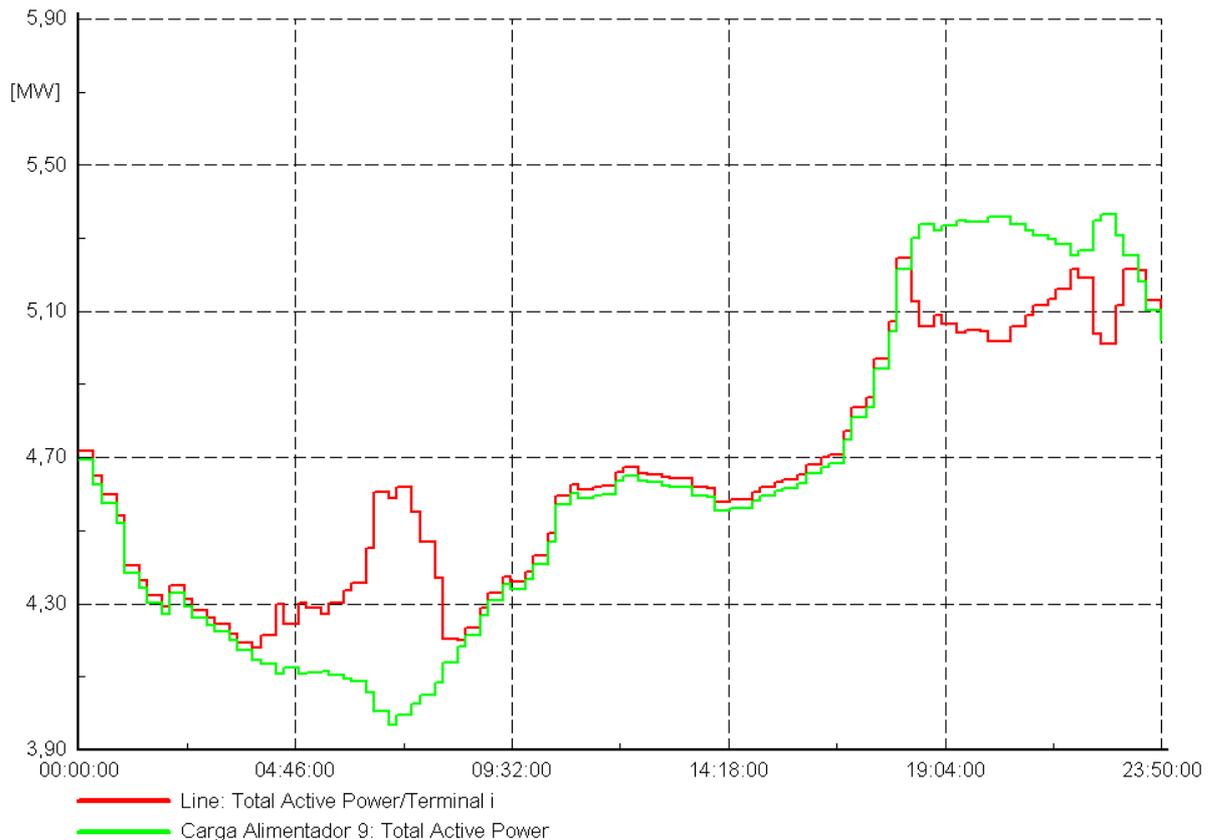
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 89 - Curvas do comportamento da potência ativa do alimentador BGE09 (verde) e da bateria (vermelha) aos domingos



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 90 - Curva de potência ativa da carga para o sistema de grande porte demandada antes (verde) e após a implantação da bateria (vermelha) aos domingos



FONTE: A autora (2018)

Assim como verificado para as análises do modelo quase-dinâmico de pequeno e médio porte, o objetivo de realizar o corte dos picos da carga foi atingido, mas no caso do grande porte não há geração fotovoltaica, então a bateria irá carregar importando energia da rede elétrica em momento de menor consumo das cargas dos alimentadores, principalmente do BGE09.

### 5.3.5 Simulação RMS/Transitória do Sistema de Grande Porte

A simulação transitória para o sistema de grande porte, utilizando o modelo dinâmico introduzido na seção 4.2.2.2, foi realizada seguindo o mesmo método utilizado para os sistemas de pequeno e médio porte, alterando-se apenas os parâmetros do modelo, além da capacidade e da potência, 1 MWh e 1MVA, respectivamente. Os valores utilizados para parametrizar os *Composite models* do equipamento para o grande porte podem ser vistos na TABELA 43, TABELA 44 e TABELA 45.

TABELA 43 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o *Common model PQ-Control-G*

PQ-Control-G		
Tr	2	s
Trq	0,2	s
Kp	2	pu
Tip	2	s
AC_deadband	0,1	pu
Kq	1	pu
Tiq	0,1	s
id_min	-1	pu
iq_min	-1	pu
id_max	1	pu
iq_max	1	pu

FONTE: A autora (2018)

TABELA 44 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o *Common model Charge Control-G*

Charge Control-G		
ChargeCur	0,5	pu
minSOC	0,1	pu
maxSOC	0,9	pu
deltaU	0,8	pu

FONTE: A autora (2018)

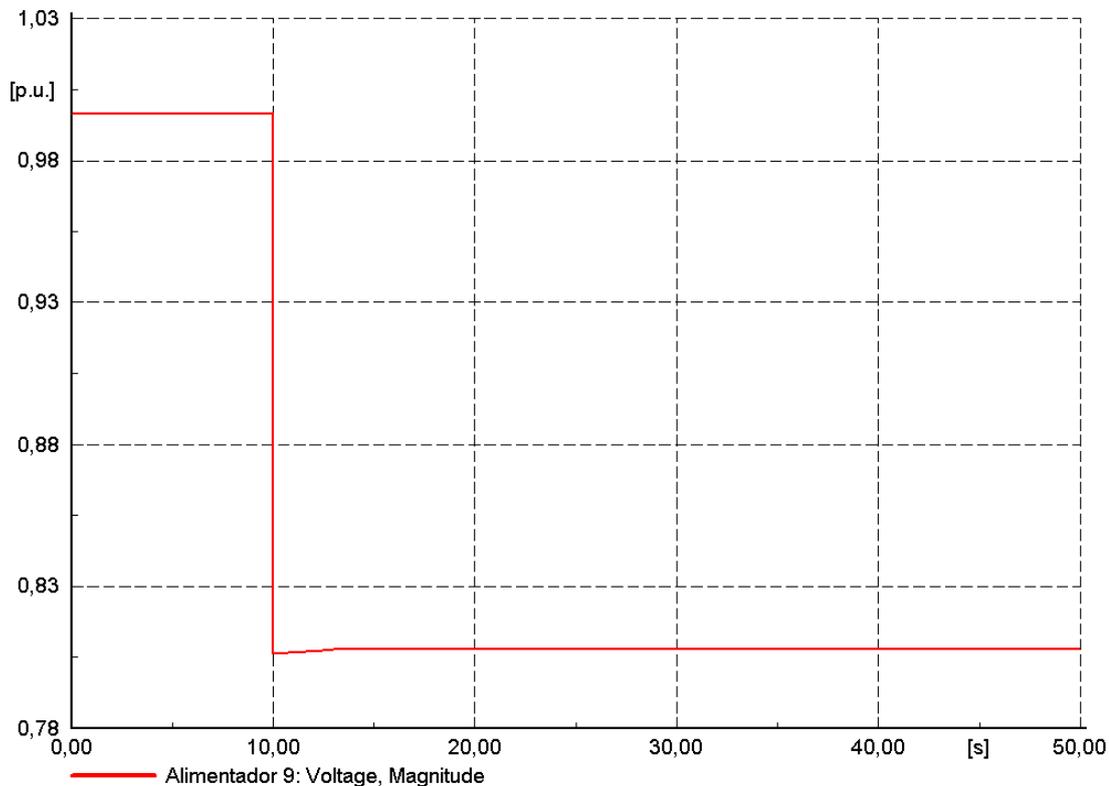
TABELA 45 - Valores dos parâmetros do modelo dinâmico para o *Common model Simple Battery-G*

Simple Battery-G		
SOC0	0,8	-
CellCapacity	65	Ah
u_min	12	V
u_max	13,85	V
CellsParallel	40	-
CellsInRow	30	-
RiCell	0,001	ohm

FONTE: A autora (2018)

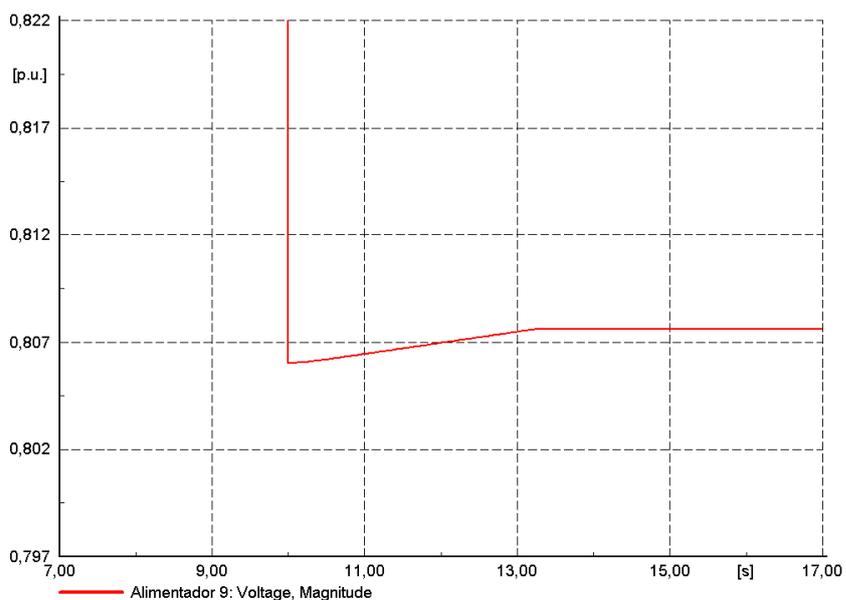
Tendo-se o modelo dinâmico de controle da bateria parametrizado conforme as tabelas acima, foi aplicado um curto-circuito trifásico na "Barra 2 – 11,9 kV" com uma impedância de 1 ohm, e em um primeiro momento com uma bateria de potência igual a 1 MVA. O resultado da variação da tensão na barra do alimentador BGE09 com a falta e sua recuperação através do controle da bateria pode ser vista na FIGURA 91, e na FIGURA 92 com um aumento da imagem para ser possível visualizar a tensão quando há atuação do equipamento de armazenamento.

FIGURA 91 - Tensão na barra do alimentador BGE09 quando aplicado um curto-circuito trifásico na "Barra 2 – 11,9 kV" com uma bateria de 1 MVA



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 92 - Imagem aumentada da FIGURA 91



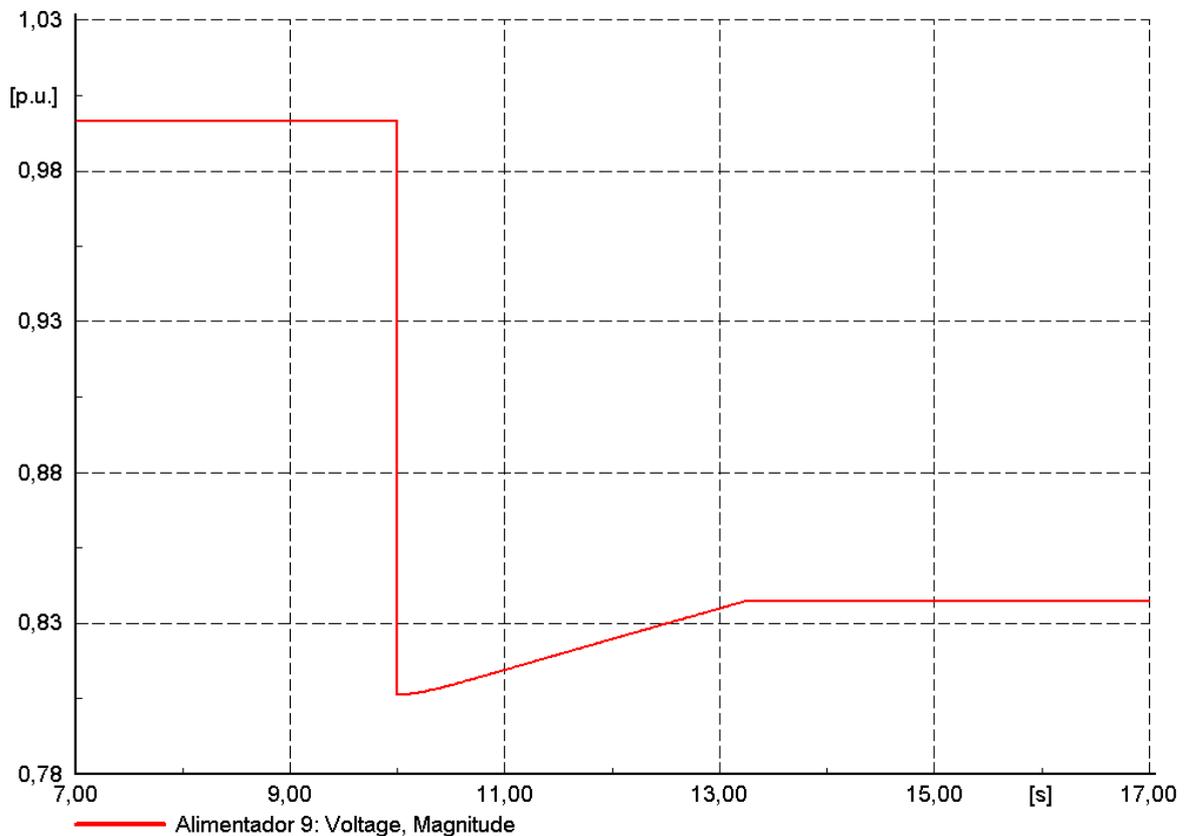
FONTE: A autora (2018)

Com uma bateria de potência 1 MVA no sistema de grande porte não é possível fazer a tensão voltar ao valor que possuía antes do afundamento da tensão. O valor que a bateria consegue recuperar é insignificante, menor do que 0,005 p.u.

Conforme já citado nas seções 5.1.3 e 5.2.4, isso se deve ao fato do equipamento não conseguir entregar potência suficiente para a rede elétrica no momento do curto-circuito.

Sendo assim, modificou-se o valor da potência da bateria para 15 MVA, afim de verificar qual o efeito na regulação da tensão e se há melhorias significativas em relação à bateria de 1 MVA. O comportamento da tensão obtido após essa mudança pode ser visto na FIGURA 93.

FIGURA 93 - Tensão na barra do alimentador BGE09 quando aplicado um curto-circuito trifásico na "Barra 2 – 11,9 kV" com uma bateria de 10 MVA



FONTE: A autora (2018)

Da resposta apresentada na FIGURA 91 para a resposta da FIGURA 93, é possível perceber uma melhora na resposta da bateria em relação ao curto-circuito para regularizar a tensão na barra do alimentador. Para o equipamento de 15 MVA, esse valor aumenta de 0,005 p.u. para aproximadamente 0,030 p.u.

Comparando esses resultados com os obtidos para o modelo de médio porte da seção 5.2.4, as respostas são muito parecidas. Entretanto, para o de grande porte, a potência da bateria é aumentada até quinze vezes mais, mesmo assim a tensão

atingida pelo controle da bateria não chega a ser significativa, enquanto para o médio porte a potência é aumentada em apenas 50% por conta da limitação do transformador de distribuição.

## **6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

Após os desenvolvimentos dos objetivos traçados nos primórdios do presente trabalho de conclusão de curso, passando por um estudo do contexto e da situação atual dos sistemas de armazenamento de energia, realizando uma revisão da literatura já existente sobre o tema afim de obter bases sólidas para o desenvolvimento do estudo, apresentando os materiais e as metodologias utilizados para desenvolver as análises propostas, chegou-se enfim a resultados capazes de fornecerem dados suficientes para verificar os impactos elétricos que sistemas de armazenamento de energia eletroquímicos podem causar quando inseridos nos três pontos da rede elétrica que foram tratados.

Observando os resultados obtidos nas seções 5.1.1, 5.2.1 e 5.3.1, pode-se perceber que dependendo da estrutura do sistema elétrico onde a bateria é inserida, os impactos relacionados ao fluxo de potência podem ser diferentes. Para o sistema de pequeno porte (5.1.1), desconsiderando a presença da geração fotovoltaica em paralelo com a carga da residência, dependendo da quantidade de potência importada ou exporta pela bateria, há uma pequena alteração da tensão na barra onde ela se encontra. Já para o médio porte (5.2.1), onde a geração fotovoltaica foi considerada, a bateria não causa impactos negativos para o sistema, uma vez que o objetivo do conjunto sistema fotovoltaico e armazenamento de energia é diminuir a necessidade de importação de energia elétrica da rede. Por fim, na subestação (5.3.1), é possível observar que a bateria ajuda a diminuir o carregamento do transformador, mas ajudaria ainda mais se tivesse uma capacidade maior.

Nas seções 5.2.2 e 5.3.2, podem ser encontrados os resultados referentes aos cálculos de curto circuito para o sistema de médio porte e para o de grande porte, respectivamente. Para ambos se percebe uma diferença dos valores de curto-circuito após a inserção da bateria, sendo que para o sistema elétrico do condomínio a corrente durante a falta é considerada prejudicial para o transformador de distribuição. Já para o sistema da subestação, o fluxo da corrente de curto mostra-se relevante para o sistema de proteção que é analisado no tópico 5.3.3.

O modelo quase-dinâmico da bateria mostrado na seção 4.2.2.1, é aplicado aos sistemas do consumidor residencial, do condomínio dos Ipês e da SE de Barão Geraldo, e seus resultados são mostrados nos tópicos 5.1.2, 5.2.3 e 5.3.4. Os resultados com a inserção da bateria apresentam grandes benefícios para os três sistemas, uma vez que o objetivo de cortar o pico da demanda das cargas é atingido.

A análise do sistema de proteção para as funções 50/50N, 51/51N e 27 é realizada apenas para o sistema de grande. Em um primeiro momento é verificado se as correntes nominais medidas pelo TC do relé de proteção do alimentador BGE se alteram com a entrada da bateria no sistema, resultando em mudança muito pequena nessas correntes. Entretanto, para o caso de um curto-circuito, a corrente aumenta para valores bastantes significativos após a inserção da bateria. Isso deve ser levado em conta na hora de projetar o sistema de proteção do sistema de armazenamento, e dependendo da filosofia de proteção adotada, deve-se modificar os parâmetros da proteção do alimentador.

Para a simulação RMS/Transitória realizada com os modelos de bateria de médio e pequeno porte, verificou-se uma ineficiência para atender o objetivo inicialmente proposto de corrigir a tensão em um curto período de tempo após um afundamento de tensão. Chega-se à conclusão que o aumento da potência dos equipamentos é um fator determinante para conseguir alcançar o resultado esperado, porém seriam necessárias baterias com potências extremamente elevadas e tecnicamente inviáveis. Além disso, também existe o fato de que descargas de energia em períodos de tempo tão curtos causariam problemas no equipamento, como diminuição da sua vida útil. No sistema de pequeno porte tratado no tópico 5.1.3, a bateria proposta primeiramente também não consegue regular a tensão da forma esperada, mas após aumentar em dez vezes sua potência o objetivo é atingido. Nesse caso, por ser o sistema de um consumidor residencial, considera-se um caso economicamente inviável.

No trabalho apresentado foram mostrados alguns impactos positivos ou negativos causados com a inserção de sistema de armazenamento de energia com bateria em três partes da rede elétrica de distribuição. Com os resultados apresentados conclui-se que alguns cuidados devem ser tomados antes de aplicar baterias no sistema elétrico, mas se o projeto for realizado levando em consideração alguns impasses, os benefícios podem ser inúmeros. Como trabalhos futuros, propõe-se:

- Utilizar o modelo de bateria dinâmico para realizar o controle de outros tipos de variáveis do sistema ou para outras aplicações, por exemplo, para frequência e para sistemas industriais que possuam máquinas elétricas, respectivamente;
- Para o modelo quase-dinâmico seria interessante modifica-lo afim de realizar a regulação da tensão durante longos períodos de tempo, para sistemas que possuam fonte de geração de energia elétrica que variem durante o dia, como sistemas fotovoltaicos e geração eólica;
- Desenvolver um algoritmo para o modelo quase-dinâmico capaz de fazer o controle adaptar-se aos valores de qualquer sistema onde fosse inserido, sem a necessidade de parametrizar o modelo toda vez que é preciso adiciona-lo a uma nova rede elétrica;
- Realizar uma análise mais aprofundada da proteção do sistema elétrico da subestação – aplicar curtos-circuitos de alta impedância ou faltas que possam alterar de forma significativa o tempo de atuação do relé do alimentador.

## REFERÊNCIAS

AKINYELE, D. O.; RAYUDU, R. K. Review of energy storage technologies for sustainable power networks. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 8, p. 74–91, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2014.07.004>>.

ALHAMALI, A.; FARRAG, M. E.; BEVAN, G.; ... Review of energy storage systems in electric grid and their potential in distribution networks. **Power Systems ...**, 2016. [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7836945/>>.

ASSUN, O. Modelagem matemática de baterias redox de vanádio. **Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - USP**, , n. Master's Dissertation, 2015.

BILA, M.; OPATHELLA, C.; VENKATESH, B. Grid connected performance of a household lithium-ion battery energy storage system. **Journal of Energy Storage**, 2016. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X16300500>>.

BLASI, T. M. **ANÁLISE ELÉTRICA DOS IMPACTOS DA CONEXÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM BATERIAS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO**, 2017.

CALDERARO, V.; GALDI, V.; LAMBERTI, F.; ... Co-located storage systems with renewable energy sources for voltage support in distribution networks. **Power & Energy Society ...**, 2015. [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7286486/>>.

CHEN, H.; CONG, T. N.; YANG, W.; et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review. **Progress in Natural Science**, v. 19, n. 3, p. 291–312, 2009. National Natural Science Foundation of China and Chinese Academy of Sciences. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>>.

DIGSILENT. Application Guide Battery Energy Storing System Template. , p. 28, 2010.

DIGSILENT. PowerFactory User Manual. , 2017a.

DIGSILENT. Battery Technical Reference Documentation. , 2017b.

DIGSILENT. Static Generator Technical Reference Documentation. , 2017c.

DUGAN, R. C.; TAYLOR, J. A.; ... Energy storage modeling for distribution planning. **Rural Electric Power** ..., 2016. [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7515648/>>.

ENSSLIN , L ., ENSSLIN , S . R ., LACERDA , R . T . O . & TASCA, J . E. Seleção do Banco de Artigos Brutos Processo para Selecionar artigos para formar o Portfólio Bibliográfico. , p. 2011, 2011.

ESA. Energy Storage Association. , 2018. Disponível em: <<http://energystorage.org/>>.

FANG, X.; MISRA, S.; XUE, G.; YANG, D. Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 14, n. 4, p. 944–980, 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6099519>>.

FORTENBACHER, P.; MATHIEU, J. L.; ANDERSSON, G. Modeling and Optimal Operation of Distributed Battery Storage in Low Voltage Grids. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 32, n. 6, p. 4340–4350, 2017

HARTMANN, B.; LIPTÁK, S. Development of steady state and dynamic energy storage models for DlgSILENT PowerFactory. **PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven**, 2015. [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7232631/>>.

KERSTING, W. H. **Distribution system modelling and analysis**. 2002.

KOLLER, M.; BORSCHE, T.; ULBIG, A.; ANDERSSON, G. Review of grid applications with the Zurich 1 MW battery energy storage system. **Electric Power Systems ...**, 2015. Elsevier. Disponible em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779614002326>>.

LAMBERTI, F.; CALDERARO, V.; GALDI, V.; ... Impact analysis of distributed PV and energy storage systems in unbalanced LV networks. **PowerTech, 2015 ...**, 2015. [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org). Disponible em: <<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7232717/>>.

LIANGZHONG, Y. A. O.; BO, Y.; HONGFEN, C. U. I.; ZHUANG, J.; ... Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems. **...Modern Power Systems ...**, 2016. Springer. Disponible em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40565-016-0248-x>>.

LUO, X.; WANG, J.; DOONER, M.; CLARKE, J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. **Applied Energy**, 2015. Elsevier. Disponible em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914010290>>.

LUO, X.; WANG, J.; DOONER, M.; CLARKE, J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. **Applied Energy**, v. 137, p. 511–536, 2015. Elsevier Ltd. Disponible em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>>.

PIMM, A. J.; COCKERILL, T. T.; TAYLOR, P. G. The potential for peak shaving on low voltage distribution networks using electricity storage. **Journal of Energy Storage**, v. 16, p. 231–242, 2018. Elsevier Ltd. Disponible em: <<https://doi.org/10.1016/j.est.2018.02.002>>.

VEERASHEKAR, K.; SETA, P. LA; ... Impact of distributed battery energy storage systems on low voltage grids with high amount of photovoltaics. **... ETG Congress 2015; Die ...**, 2015. [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org). Disponible em: <<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7388470/>>.

WORTHMANN, K.; KELLETT, C. M.; BRAUN, P.; ... Distributed and decentralized control of residential energy systems incorporating battery storage. ...**on Smart Grid**, 2015. ieeexplore.ieee.org. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7031445/>>.

YUNUSOV, T.; FRAME, D.; HOLDERBAUM, W.; POTTER, B. The impact of location and type on the performance of low-voltage network connected battery energy storage systems. **Applied Energy**, 2016. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915016189>>.