

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

**FERRAMENTA PARA ANÁLISES ESTÁTICAS,
PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DE MICRO REDES EM
DIVERSOS MODOS OPERACIONAIS**

YURI REIS RODRIGUES

**ITAJUBÁ – MG
Fevereiro 2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

YURI REIS RODRIGUES

**FERRAMENTA PARA ANÁLISES ESTÁTICAS,
PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DE MICRO REDES EM
DIVERSOS MODOS OPERACIONAIS**

Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Antônio Carlos Zambroni de Souza

ITAJUBÁ – MG

Fevereiro 2017



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

ANEXO I

**FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Título da Dissertação: **“Ferramenta para análises estáticas, planejamento e operação de micro redes em diversos modos operacionais”.**

Autor: **Yuri Reis Rodrigues**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito		Rubrica
	A = Aprovado	R = Reprovado	
2º	A		
3º	A		

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado (A) se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
(2) O Trabalho será considerado Reprovado (R) se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
(3) O Trabalho será considerado no Conceito final como Insuficiente (I) se for atribuído um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.
Este documento terá a validade de 30 (trinta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito final: A ou seja, APROVADO

Observações: _____

Itajubá, 17 de fevereiro de 2017.

Prof. Dr. Paulo Fernando Ribeiro
2º Examinador – UNIFEI

Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza
3º Examinador (Orientador) – UNIFEI

AGRADECIMENTOS

Todo bom trabalho é bem fundamentado, e nesta seção agradeço aqueles que me foram fundação. Agradeço a Ele, pois sem Ele nada somos, aos meus pais Cristina e Paulo que além da dádiva da vida me proporcionam o maior amor do mundo, a minha irmã Yasmin por ser algo que somente ela é capaz, a Maíra por estar ao meu lado incondicionalmente, ao meu orientador Zambroni que sempre foi muito mais, aos meus familiares, amigos e colegas que estiveram comigo ao longo do caminho e a FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais e UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá pelo apoio financeiro que proporcionou a realização deste trabalho.

Aqui espero deixar uma pequena contribuição à *Construção do Conhecimento* de nossa humanidade.

" Eu não sei como eu posso parecer ao mundo, mas para mim eu pareço ser apenas uma criança brincando na beira do mar, divertindo-me neste momento e então encontrando um seixo mais liso ou uma concha mais bonita do que o normal, enquanto o grande oceano da verdade permanece completamente desconhecido diante de mim."

(Issac Newton)

RESUMO

O desenvolvimento e crescente inserção de geração distribuída despachável e fontes renováveis estão transformando o conceito de áreas operacionais autossustentáveis em uma realidade. Estas regiões comumente definidas como micro redes são capazes de operar conectadas e ilhadas à rede principal.

A presença de micro redes em um sistema de potência aumenta as complexidades de sua operação, sendo necessárias ferramentas e análises para garantia de condições operativas desejáveis. Deste modo, este trabalho aborda aspectos operacionais de micro redes sob a perspectiva estática, desenvolvendo e propondo diversas metodologias para a operação, análise e planejamento de micro redes.

Tais como, ferramenta para execução de fluxos de potência para micro redes considerando o método de controle *droop*, participação de geração local despachável, não despachável e inserção de veículos elétricos e híbridos (VEH); Metodologia de controle secundário baseada em *droop* aplicada a micro redes; Processo de carregamento controlado de unidades VEHs; Metodologia para operação de VEHs como unidades armazenadoras de energia despacháveis; Dispositivo inteligente para controle, medição, processamento, atuação e comunicação do conjunto VEH-Carregador com o agente operador do sistema; Política de gerenciamento de demanda para micro redes em situação de ilhamento baseada em grupos de prioridade e período funcional de operação; Interface gráfica para análises em tempo real.

A grande contribuição deste trabalho reside na união das metodologias propostas para *criação de uma ferramenta* capaz de executar análises estáticas, de planejamento e operação para micro redes conectadas à rede principal e/ou operando em modo ilhado.

Para validação e demonstração do potencial da ferramenta desenvolvida diversas configurações de micro redes submetidas aos mais adversos cenários foram executadas.

Os resultados apresentam uma ferramenta robusta capaz de operar micro redes com as mais diversas configurações dentro dos limites estabelecidos por norma ou pré-definidos pelo agente operador, por meio de uma variada gama de metodologias de controle e ferramentas para gerenciamento de demanda e despacho de unidades geradoras.

Palavras-chave: Análises estáticas; Micro redes; Operação; Planejamento.

ABSTRACT

The development and increasing insertion of dispatchable distributed generation and renewable sources are transforming the concept of self-sustaining operational areas into reality. These regions commonly defined as microgrids are capable of operating connected and islanded to the main network.

The presence of microgrids in power system increases the complexities of its operation, requiring tools and analysis to ensure proper operating conditions. In this sense, this work deals with the operational aspects of microgrids under static perspective, developing and proposing several methodologies for the operation, analysis and planning of microgrids.

Such as, a tool to perform power flows for microgrid networks considering droop control method, dispatchable and non-dispatchable local generation participation, and insertion of electric and hybrid vehicles (VEH); Droop-based secondary control methodology applied to microgrids; Controlled charging process for VEHs units; Methodology for the operation of VEHs as dispatchable energy storage units; Intelligent device for control, measurement, processing, actuation and communication of the VEH-Charger set with the system operator; Policy of demand management for micro networks in islanding situation based on priority groups and functional period of operation; Graphical interface for real-time analysis.

The great contribution of this work lies in the union of the proposed methodologies for the creation of a tool capable of performing static analyzes, planning and operation for micro-networks connected to the main network and / or operating in island mode.

For validation and demonstration of the potential of the tool developed, several configurations of microgrids submitted to the most adverse scenarios were executed.

The results present a robust tool capable of operating microgrids with the most diverse configurations within the limits established by standard or pre-defined by the operator agent, through a wide range of control methodologies, tools for demand management and dispatch generators units.

Keywords: Static analysis; Microgrids; Operation; Planning.

Sumário

AGRADECIMENTOS.....	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
1.2 MOTIVAÇÃO E PROPOSTAS	4
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	7
2. FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO DESEQUILIBRADO	9
2.1 METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO	13
2.2 FONTES RENOVÁVEIS	15
2.2.1 <i>Geração Solar</i>	15
2.2.1.1 Modelo Geração Solar	16
2.2.1.2 Dados Pannel Fotovoltaico	19
2.2.2 <i>Geração Eólica</i>	20
2.2.2.1 Modelo Geração Eólica.....	20
2.2.2.2 Dados Geração Eólica.....	22
3. MÉTODOS DE CONTROLE PARA MICRO REDES	23
3.1 CONTROLE PRIMÁRIO DROOP APLICADO A MICRO REDES	24
3.1.1 <i>Controle Droop</i>	24
3.1.2 <i>Metodologia para Implementação</i>	26
3.1.3 <i>Validação da Metodologia Proposta</i>	28
3.1.3.1 Sistema Teste	28
3.1.3.2 Estudo de Casos	29
3.1.3.2.1 Evolução do Sistema ao Longo dos Pontos de Operação.....	29
3.1.3.2.2 Análise das Variações do Sistema para um Ponto de Operação Específico	32
3.1.4 <i>Conclusões Parciais</i>	35
3.1.5 <i>Publicações</i>	35
3.2 CONTROLE SECUNDÁRIO DE FREQUÊNCIA BASEADO EM DROOP APLICADO A MICRO REDES ...	36
3.2.1 <i>Validação da Metodologia Proposta</i>	39
3.2.1.1 Sistema Teste	39
3.2.1.2 Estudo de Casos	40
3.2.1.2.1 Controle Droop Tradicional	40
3.2.1.2.2 Controle de Frequência Proposto Baseado na Metodologia Droop.....	43
3.2.2 <i>Conclusões Parciais</i>	45
3.2.3 <i>Publicações</i>	45

4. OPERAÇÃO, CONTROLE E CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS	46
4.1 PROCESSO DE CARREGAMENTO VEHS	50
4.1.1 Carregamento Não Controlado de VEHs.....	51
4.1.2 Carregamento Controlado de VEHs	52
4.2 OPERAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS COMO UNIDADES ARMAZENADORAS DE ENERGIA DESPACHÁVEIS.....	55
4.2.1 Metodologia para Implementação	56
4.2.1.1 Máxima Potência Despachável de cada unidade VEH.....	58
4.2.1.2 Máxima Potência Despachável por Barramento	60
4.2.1.3 Máxima Potência Despachável pelos VEHs para o Sistema	61
4.2.1.4 Parcela da Contribuição de cada VEH	62
5. DISPOSITIVO INTELIGENTE PARA CONTROLE, MEDIÇÃO, PROCESSAMENTO, ATUAÇÃO E COMUNICAÇÃO DO CONJUNTO VEH-CARREGADOR COM AGENTE OPERADOR DO SISTEMA.....	64
5.1 PROCESSO DE PARAMETRIZAÇÃO DO DISPOSITIVO INTELIGENTE	64
5.2 MODOS DE OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO INTELIGENTE.....	68
5.2.1 Processo de Carregamento Controlado de VEHs.....	68
5.2.2 Processo de Operação de Veículos Elétricos como Unidades Armazenadoras de Energia Despacháveis	69
6. POLÍTICA DE GERENCIAMENTO DE DEMANDA PARA MICRO REDES EM SITUAÇÃO DE ILHAMENTO BASEADA EM GRUPOS DE PRIORIDADE E PERÍODO FUNCIONAL DE OPERAÇÃO.....	72
6.1 PERÍODO FUNCIONAL DE OPERAÇÃO.....	73
6.2 METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO	73
6.2.1 Otimização do Processo de Suprimento Energético	74
6.2.1.1 Capacidade de Atendimento a Demanda da Micro Rede Durante cada Período de Integração..	76
6.2.1.1.1 Verificação na Perspectiva de Potência	76
6.2.1.1.2 Verificação na Perspectiva de Energia.....	77
6.2.1.2 Manutenção do Atendimento a Demanda do(s) Grupo(s) de Prioridade Superior ao Analisado Durante o(s) Completo(s) Período(s) de Funcionalidade	78
6.2.1.2.1 Verificação na Perspectiva de Potência	78
6.2.1.2.2 Verificação na Perspectiva de Energia.....	79
6.2.2 Fluxograma da Metodologia Proposta	80
7. INTERFACE GRÁFICA	84
7.1 GUIA PRINCIPAL – MICRO REDE.....	84
7.1.1 Modo de Operação: Micro Rede Conectada à Rede Principal.....	85
7.1.2 Modo de Operação: Micro Rede Ilhada Completamente suprida por Geração Local ...	89

7.1.3	<i>Modo de Operação: Micro Rede Ilhada em Modo de Gerenciamento de Demanda</i>	93
7.2	GUIA SECUNDÁRIA – VEHS	97
7.2.1	<i>VEH em Processo de Carregamento</i>	97
7.2.2	<i>VEH Operando como Unidade Armazenadora de Energia Despachável</i>	99
8.	RESULTADOS	101
8.1	SISTEMA TESTE	105
8.1.1	<i>Cargas Instaladas</i>	105
8.1.2	<i>Perfil da Demanda</i>	106
8.1.3	<i>Restrições Técnicas</i>	106
8.1.4	<i>Geração Local Despachável</i>	107
8.1.5	<i>Geração Local não Despachável</i>	109
8.1.6	<i>Veículos Elétricos e Híbridos - VEHS</i>	110
8.1.7	<i>Níveis de Prioridade de Carga</i>	111
8.1.8	<i>Período Funcional de Operação</i>	113
8.1.9	<i>Dispositivos Inteligentes</i>	113
8.1.10	<i>Diagrama Micro Rede</i>	115
8.2	OPERAÇÃO DA MICRO REDE EM MODO CONECTADO À REDE PRINCIPAL	116
8.2.1	<i>Demanda Micro Rede</i>	116
8.2.2	<i>Geração, Demanda e Perdas Trifásicas Micro Rede</i>	117
8.2.3	<i>Geração Micro Rede</i>	118
8.2.3.1	<i>Geração Suprida a Micro Rede – Rede Principal</i>	118
8.2.3.2	<i>Geração Suprida a Micro Rede – Geração Local</i>	119
8.2.4	<i>Processo de Carregamento VEHS</i>	120
8.2.4.1	<i>Unidades VEHS em Processo de Carregamento</i>	120
8.2.4.2	<i>Energia Armazenada nas Unidades VEHS</i>	121
8.2.4.3	<i>Potência Disponível para Despacho das Unidades VEHS</i>	121
8.2.5	<i>Perfil de Tensão – Micro Rede</i>	122
8.2.5.1	<i>Regulação de Tensão - LTCs</i>	122
8.2.6	<i>Frequência – Micro Rede</i>	123
8.2.7	<i>Grupo de Prioridade Atendido</i>	124
8.2.8	<i>Conclusões Parciais</i>	125
8.3	OPERAÇÃO DA MICRO REDE EM MODO ILHADO	126
8.3.1	<i>Micro Rede Autossuficiente – Geração Local</i>	127
8.3.1.1	<i>Demanda Micro Rede</i>	128
8.3.1.2	<i>Geração, Demanda e Perdas Trifásicas Micro Rede</i>	128
8.3.1.3	<i>Geração Micro Rede</i>	129
8.3.1.3.1	<i>Geração Suprida a Micro Rede – Rede Principal</i>	130
8.3.1.3.2	<i>Geração Suprida a Micro Rede – Geração Local</i>	131
8.3.1.4	<i>Processo de Carregamento VEHS</i>	132
8.3.1.4.1	<i>Unidades VEHS em Processo de Carregamento</i>	132

8.3.1.4.2	Energia Armazenada nas Unidades VEH	133
8.3.1.4.3	Potência disponível para despacho das unidades VEH	133
8.3.1.5	Perfil de Tensão – Micro Rede	134
8.3.1.5.1	Regulação de Tensão - LTCs	134
8.3.1.6	Frequência – Micro Rede	136
8.3.1.7	Grupo de Prioridade Atendido	136
8.3.1.8	Conclusões Parciais.....	137
8.3.2	<i>Micro Rede em modo de Gerenciamento de Demanda</i>	138
8.3.2.1	Controle Primário Provido por Controle Droop Aplicado a Micro Redes e Ausência de Controle Secundário	139
8.3.2.1.1	Demanda Micro Rede	140
8.3.2.1.2	Geração, Demanda e Perdas Trifásicas Micro Rede	141
8.3.2.1.3	Geração Micro Rede	141
8.3.2.1.3.1	Geração Suprida a Micro Rede – Rede Principal.....	142
8.3.2.1.3.2	Geração Suprida a Micro Rede – Geração Local	143
8.3.2.1.3.3	Geração Suprida a Micro Rede – VEHS.....	144
8.3.2.1.4	Operação VEHS	144
8.3.2.1.4.1	Processo de Carregamento VEHS	145
8.3.2.1.4.2	VEHS Operando como Armazenadores de Energia	145
8.3.2.1.4.3	Energia Armazenada - VEHS.....	146
8.3.2.1.4.4	Potência Disponível para Despacho - VEHS.....	147
8.3.2.1.5	Perfil de Tensão – Micro Rede	148
8.3.2.1.5.1	Regulação de Tensão - LTCs	149
8.3.2.1.6	Frequência – Micro Rede.....	150
8.3.2.1.7	Grupo de Prioridade Atendido	150
8.3.2.1.8	Conclusões Parciais	151
8.3.2.2	Controle Primário Provido por Controle Droop e Controle Secundário Provido pelo Método de Controle de Frequência baseado em Droop Aplicado a Micro Redes	152
8.3.2.2.1	Demanda Micro Rede	153
8.3.2.2.2	Geração, Demanda e Perdas Trifásicas Micro Rede	154
8.3.2.2.3	Geração Micro Rede	154
8.3.2.2.3.1	Geração Suprida a Micro Rede – Rede Principal.....	155
8.3.2.2.3.2	Geração Suprida a Micro Rede – Geração Local	156
8.3.2.2.3.3	Geração Suprida a Micro Rede – VEHS.....	157
8.3.2.2.4	Operação VEHS	158
8.3.2.2.4.1	Processo de Carregamento VEHS	158
8.3.2.2.4.2	VEHS Operando como Armazenadores de Energia	158
8.3.2.2.4.3	Energia Armazenada - VEHS.....	159
8.3.2.2.4.4	Potência Disponível para Despacho - VEHS.....	160
8.3.2.2.5	Perfil de Tensão – Micro Rede	161
8.3.2.2.5.1	Regulação de Tensão - LTCs	161
8.3.2.2.6	Frequência – Micro Rede.....	162
8.3.2.2.7	Grupo de Prioridade Atendido	163

8.3.2.2.8 Conclusões Parciais	164
9. CONCLUSÃO.....	165
ARTIGOS PUBLICADOS	168
APÊNDICE A	169
APÊNDICE B	175
REFERÊNCIAS	181
ANEXO A.....	187
ANEXO B.....	190

Lista de Figuras

Figura 2.1: Metodologia para implementação da técnica de varredura backward-forward	11
Figura 2.2: Modelo exponencial simples para uma célula fotovoltaica [41].....	16
Figura 2.3: Geração de energia elétrica em função da velocidade do vento [25].....	21
Figura 3.1: Projeto de uma micro rede com GDs [13]	23
Figura 3.2: Representação do método de controle droop	25
Figura 3.3: Fluxograma da metodologia de controle droop aplicada a micro redes	27
Figura 3.4: Sistema IEEE 34 barras utilizado para validação da metodologia.....	28
Figura 3.5: Demanda de potência ativa total do sistema	30
Figura 3.6: Demanda de potência ativa Barra 818	30
Figura 3.7: Tensões nas fases ‘a’, ‘b’, ‘c’ da Barra 818 para o Cenário 3	31
Figura 3.8: Variação da frequência do sistema para os três cenários	32
Figura 3.9: Tensões na fase ‘a’ de cada barra do sistema para todos os cenários	33
Figura 3.10: Perdas de potência ativa do sistema para os três cenários	34
Figura 3.11: Perdas de sobre a perspectiva de energia para os três cenários	34
Figura 3.12: Método droop com controle primário e secundário	37
Figura 3.13: Fluxograma simplificado da metodologia proposta.....	38
Figura 3.14: Perfil de demanda de potência ativa e reativa por fase da micro rede	40
Figura 3.15: Evolução da frequência da micro rede considerando apenas as GDs despacháveis	41
Figura 3.16: Evolução da frequência da micro rede considerando GDs despacháveis e não despacháveis fixas	42
Figura 3.17: Evolução da frequência da micro rede considerando GDs despacháveis e não despacháveis variáveis.....	42

Figura 3.18: Evolução da frequência da micro rede considerando GDs despacháveis e controle de geração	43
Figura 3.19: Evolução da frequência da micro rede considerando GDs despacháveis e não despacháveis com controle de geração	44
Figura 3.20: Evolução da frequência da micro rede considerando GDs despacháveis e GDs não despacháveis variáveis com controle de geração.....	44
Figura 4.1: Arquitetura de comunicação entre operador do sistema de distribuição e veículos elétricos [20], (a) por conexão individual, (b) por agentes intermediários.....	49
Figura 4.2: Tensões no sistema durante a carreamento não controlada [17].....	51
Figura 4.3: Fluxograma do processo de carregamento dos VEHs	53
Figura 4.4: Fluxograma do processo de operação de veículos elétricos como unidades armazenadoras de energia despacháveis.....	57
Figura 4.5: Determinação da máxima potência de despacho do VEH	59
Figura 4.6: Determinação da máxima potência despachável por barramento.....	60
Figura 5.1: Fluxograma do processo de parametrização do dispositivo inteligente responsável pelo controle do carregamento e despacho dos VEH – parte 1	66
Figura 5.2: Fluxograma do processo de parametrização do dispositivo inteligente responsável pelo controle do carregamento e despacho dos VEH – parte 2	67
Figura 5.3: Fluxograma do processo de controle, comunicação e tomada de decisão do dispositivo inteligente responsável pelo controle do carregamento e despacho dos VEH – parte 3	71
Figura 6.1: Política de gerenciamento de demanda para micro redes em situação de ilhamento baseada em grupos de prioridade e período funcional de operação – parte 1	81
Figura 6.2: Política de gerenciamento de demanda para micro redes em situação de ilhamento baseada em grupos de prioridade e período funcional de operação – parte 2	82
Figura 6.3: Política de gerenciamento de demanda para micro redes em situação de ilhamento baseada em grupos de prioridade e período funcional de operação – parte 3	83
Figura 7.1: Guia principal para o modo de operação micro rede conectada à Rede Principal.	85

Figura 7.2: Guia principal para o modo de operação ilhada completamente suprida por geração local	89
Figura 7.3: Guia principal para o modo de operação ilhado	93
Figura 7.4: Guia de monitoramento da malha de VEHs micro rede operando conectada à Rede Principal ou em modo ilhado completamente suprida por geração local	97
Figura 7.5: Guia de monitoramento da malha de VEHs para micro rede em operação ilhada	99
Figura 8.1: Perfil de carga da demanda do sistema	106
Figura 8.2: Perfil da velocidade do vento.....	109
Figura 8.3: Micro rede baseada no sistema teste IEEE 34 barras.....	115
Figura 8.4: Demanda de potência ativa micro rede – Cenário 1	117
Figura 8.5: Geração, demanda e perdas trifásicas micro rede – Cenário 1	117
Figura 8.6: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal, geração local e VEHs – Cenário 1	118
Figura 8.7: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal – Cenário 1.....	119
Figura 8.8: Potência ativa suprida a micro rede pela geração local – Cenário 1.....	119
Figura 8.9: Número de VEHs em processo de carregamento – Cenário 1.....	120
Figura 8.10: Energia armazenada nas unidades VEHs – Cenário 1	121
Figura 8.11: Potência ativa disponível para despacho nas unidades VEHs – Cenário 1.....	121
Figura 8.12: Tensões máximas e mínimas da micro rede por fase – Cenário 1	122
Figura 8.13: Posição dos taps do regulador 1 – Cenário 1	123
Figura 8.14: Posição dos taps do regulador 2 – Cenário 1	123
Figura 8.15: Nível de frequência da micro rede – Cenário 1	124
Figura 8.16: Grupo de Prioridade Atendido – Cenário 1	124
Figura 8.17: Demanda de potência ativa micro rede – Cenário 2	128
Figura 8.18: Geração, demanda e perdas trifásicas micro rede – Cenário 2	129

Figura 8.19: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal, geração local e VEHs – Cenário 2	130
Figura 8.20: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal – Cenário 2.....	131
Figura 8.21: Potência ativa suprida a micro rede pela geração local – Cenário 2.....	131
Figura 8.22: Número de VEHs em processo de carregamento – Cenário 2.....	132
Figura 8.23: Energia armazenada nas unidades VEHs – Cenário 2	133
Figura 8.24: Potência ativa disponível para despacho nas unidades VEHs – Cenário 2.....	133
Figura 8.25: Tensões máximas e mínimas da micro rede por fase – Cenário 2	134
Figura 8.26: Posição dos taps do Regulador 1 – Cenário 2	135
Figura 8.27: Posição dos taps do Regulador 2 – Cenário 2.....	135
Figura 8.28: Nível de frequência da micro rede – Cenário 2	136
Figura 8.29: Grupo de Prioridade Atendido – Cenário 2	137
Figura 8.30: Demanda de potência ativa micro rede – Cenário 3.1	140
Figura 8.31: Geração, demanda e perdas trifásicas micro rede – Cenário 3.1	141
Figura 8.32: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal, geração local e VEHs – Cenário 3.1	142
Figura 8.33: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal – Cenário 3.1.....	142
Figura 8.34: Potência ativa suprida a micro rede pela geração local – Cenário 3.1.....	143
Figura 8.35: Potência ativa suprida a micro rede pela geração VEHs – Cenário 3.1.....	144
Figura 8.36: Número de VEHs em processo de carregamento – Cenário 3.1.....	145
Figura 8.37: Número de VEHs operando como armazenadores de energia despacháveis – Cenário 3.1	146
Figura 8.38: Energia armazenada nas unidades VEHs – Cenário 3.1	147
Figura 8.39: Potência ativa disponível para despacho nas unidades VEHs – Cenário 3.1.....	148
Figura 8.40: Tensões máximas e mínimas da micro rede por fase – Cenário 3.1	148
Figura 8.41: Posição dos taps do Regulador 1 – Cenário 3.1.....	149

Figura 8.42: Posição dos taps do Regulador 2 – Cenário 3.1	149
Figura 8.43: Nível de frequência da micro rede – Cenário 3.1	150
Figura 8.44: Grupo de Prioridade Atendido – Cenário 3.1	151
Figura 8.45: Demanda de potência ativa micro rede – Cenário 4.2	153
Figura 8.46: Geração, demanda e perdas trifásicas micro rede – Cenário 4.2	154
Figura 8.47: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal, geração local e VEHs – Cenário 4.2	155
Figura 8.48: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal – Cenário 4.2.....	155
Figura 8.49: Potência ativa suprida a micro rede pela geração local – Cenário 4.2.....	156
Figura 8.50: Potência ativa suprida a micro rede pela geração VEHs – Cenário 4.2.....	157
Figura 8.51: Número de VEHs em processo de carregamento – Cenário 4.2.....	158
Figura 8.52: Número de VEHs operando como armazenadores de energia despacháveis – Cenário 4.2	159
Figura 8.53: Energia armazenada nas unidades VEHs – Cenário 4.2	160
Figura 8.54: Potência ativa disponível para despacho nas unidades VEHs – Cenário 4.2.....	160
Figura 8.55: Tensões máximas e mínimas da micro rede por fase – Cenário 4.2	161
Figura 8.56: Posição dos taps do Regulador 1 – Cenário 4.2.....	162
Figura 8.57: Posição dos taps do Regulador 2 – Cenário 4.2.....	162
Figura 8.58: Nível de frequência da micro rede – Cenário 4.2	163
Figura 8.59: Grupo de Prioridade Atendido – Cenário 4.2	164
Figura A.1: Demanda de potência ativa micro rede – Cenário 3.2	169
Figura A.2: Geração, demanda e perdas trifásicas micro rede – Cenário 3.2	170
Figura A.3: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal, geração local e VEHs – Cenário 3.2	170
Figura A.4: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal – Cenário 3.2.....	170
Figura A.5: Potência ativa suprida a micro rede pela geração local – Cenário 3.2.....	171

Figura A.6: Potência ativa suprida a micro rede pela geração VEHs – Cenário 3.2.....	171
Figura A.7: Energia armazenada nas unidades VEHs – Cenário 3.2	171
Figura A.8: Potência ativa disponível para despacho nas unidades VEHs – Cenário 3.2.....	172
Figura A.9: Número de VEHs em processo de carregamento – Cenário 3.2.....	172
Figura A.10: Número de VEHs operando como armazenadores de energia despacháveis – Cenário 3.2	172
Figura A.11: Tensões máximas e mínimas da micro rede por fase – Cenário 3.2	173
Figura A.12: Posição dos taps do regulador 1 – Cenário 3.2	173
Figura A.13: Posição dos taps do regulador 2 – Cenário 3.2	173
Figura A.14: Nível de frequência da micro rede – Cenário 3.2	174
Figura A.15: Grupo de Prioridade Atendido – Cenário 3.2.....	174
Figura B.1: Demanda de potência ativa micro rede – Cenário 4.1.....	175
Figura B.2: Geração, demanda e perdas trifásicas micro rede – Cenário 4.1.....	176
Figura B.3: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal, geração local e VEHs – Cenário 4.1	176
Figura B.4: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal – Cenário 4.1	176
Figura B.5: Potência ativa suprida a micro rede pela geração local – Cenário 4.1	177
Figura B.6: Potência ativa suprida a micro rede pela geração VEHs – Cenário 4.1	177
Figura B.7: Energia armazenada nas unidades VEHs – Cenário 4.1	177
Figura B.8: Potência ativa disponível para despacho nas unidades VEHs – Cenário 4.1	178
Figura B.9: Número de VEHs em processo de carregamento – Cenário 4.1	178
Figura B.10: Número de VEHs operando como armazenadores de energia despacháveis – Cenário 4.1	178
Figura B.11: Tensões máximas e mínimas da micro rede por fase – Cenário 4.1	179
Figura B.12: Posição dos taps do regulador 1 – Cenário 4.1.....	179
Figura B.13: Posição dos taps do regulador 2 – Cenário 4.1.....	179

Figura B.14: Nível de frequência da micro rede – Cenário 4.1.....	180
Figura B.15: Grupo de Prioridade Atendido – Cenário 4.1.....	180

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Dados do módulo BP SX 120.....	19
Tabela 2.2: Parâmetros calculados para $S = 1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$ e $T_c = 25 \text{ (}^\circ\text{C)}$	20
Tabela 2.3: Parâmetros de velocidade do vento	22
Tabela 8.1: Cenários fundamentais de operação da micro rede	104
Tabela 8.2: Dados geração local despachável	108
Tabela 8.3: Dados geração local despachável	108
Tabela 8.4: Dados geração local não despachável - Eólica.....	109
Tabela 8.5: Dados geração local não despachável - Solar.....	110
Tabela 8.6: Dados dos veículos utilizados [17].....	110
Tabela 8.7: Nível de Prioridade de consumidores [62]	111
Tabela 8.8: Nível e grupo de prioridade de cada barramento do sistema.....	112
Tabela 8.9: Nível de prioridade de cada barramento do sistema.....	113

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e crescente penetração de gerações distribuídas despacháveis, associadas a fontes de geração renovável e a prevista penetração em larga escala de veículos elétricos estão exercendo enormes transformações sobre o sistema elétrico.

A participação de gerações distribuídas despacháveis e renováveis estão transformando o conceito de áreas operacionais autossustentáveis em uma realidade. Estas regiões comumente definidas como micro redes são capazes de operar ilhadas à rede principal, com a ajuda de certos controles, podendo se transformar em *smartgrids* quando níveis mais elevado de comunicação e inteligência estão presentes. Deste modo, um sistema de distribuição torna-se uma micro rede, e um micro rede pode evoluir em uma *smartgrid*, sendo este um tópico mais amplo e aberto à discussão [1].

Nesta perspectiva, a garantia de condições operacionais desejáveis é um dos principais objetivos dos planejadores e operadores de sistemas elétricos. Onde por desejável, pode-se entender tensão estável [2], [3], confiável [4] e dinamicamente estável [5], boa qualidade de energia [6], bem como ações para a melhoria das condições de operação do sistema, como redução de perdas, aumento da margem de carga, entre outras.

Contudo, ao se analisar o panorama de micro redes muitas das ferramentas disponíveis para a realização de tais análises em sistemas elétricos de potência tradicionais, precisam ser remodeladas para o atendimento as novas realidades de arquiteturas e necessidades impostas pelas micro redes. Tal como, muitas outras ainda estão por se desenvolver visando o atendimento a essa nova perspectiva de sistema elétrico. Sendo este o grande objetivo desta dissertação de mestrado.

1.1 Revisão Bibliográfica

A presença de micro redes em um sistema de potência aumenta as complexidades de sua operação, uma vez que micro gerações em corrente contínua (CC) necessitam de inversores para serem conectadas à rede [7], [8]. E a partir do momento que a micro rede não se encontra mais conectada a um sistema de grande porte, fornecendo uma referência de frequência, a região isolada necessariamente deve-se autorregular.

Nessa perspectiva, diferentes metodologias de controle podem ser empregadas para a manutenção da operação da micro rede dentro de seus limites operacionais. Porém, uma ferramenta capaz de representar as complexidades desse sistema faz-se necessária em um momento anterior.

Referências [9], [10] propõem metodologias de fluxo de potência para micro redes ilhadas baseadas em Newton-Raphson. Todavia, se um sistema de distribuição for considerado, o método de Newton pode deixar de ser eficaz. Isto ocorre devido a cargas desbalanceadas e a alta relação R/X que impedem que o processo de convergência funcione corretamente. Assim, outros métodos devem ser aplicados. Em [11] uma proposta de fluxo de potência para micro redes considerando o método de controle *droop*, fontes intermitentes em modo PQ e unidades despacháveis é apresentada. Contudo, a abordagem considera um sistema equilibrado, portanto, embora aplicado a uma micro rede, a estrutura considerada é adequada para sistemas de transmissão. Assim, se um sistema de distribuição desequilibrado é considerado, a metodologia proposta em [11] não é passível de aplicação. Já [12] permite a resolução do problema de fluxo de potência em redes de distribuição trifásicas desequilibradas com topologia radial, considerando penetração de fontes de geração distribuída, por meio do processo de varredura *backward-forward*.

Considerações sobre a capacidade de controle da micro rede precisam ser executadas para viabilização da autorregulação quando em modo ilhado. Neste sentido, o método de controle *droop* pode desempenhar o nível primário no controle de frequência e tensão nas fontes [13]. Entretanto, se a geração da micro rede é substancialmente baseada em fontes variáveis, como geração renovável, e variações de

carga significativa são enfrentadas, a autorregulação se torna um grande desafio sendo necessário algum tipo de controle secundário [14].

Outro fator muito pertinente a micro redes reside na evolução tecnológica do setor de veículos elétricos, que associada a políticas governamentais [15], [16] estão acelerando o processo de inserção de VEHs em larga escala no sistema elétrico. Nesta perspectiva, a consideração da participação de veículos elétricos e híbridos no contexto de micro redes é essencial para garantia da pertinência deste trabalho em um futuro de médio a longo prazo.

Associada a inserção de veículos elétricos em larga escala, diversas possibilidades de auxílio ao sistema nos mais distintos níveis podem ser obtidas a partir da flexibilização do processo de carregamento [17] e habilitação do uso de sua energia armazenada pelo agente operador do sistema. Para tanto, há de existir uma infraestrutura na qual os proprietários, desde que dispostos, possam habilitar o despacho da energia armazenada em seu veículo mediante uma compensação financeira por parte do agente operador do sistema.

Deste modo, por meio da aplicação do conceito *vehicle-to-grid* [18], [19], [20], tais veículos poderão atuar como unidades armazenadoras de energia despacháveis para o auxílio sistema em situações de emergência e de regulação operativa de curto prazo.

Em situações de ilhamento políticas de corte de carga podem ser necessárias para manutenção da capacidade de operação do sistema. Na literatura, diversas são as abordagens para corte de carga. A referência [21] apresenta uma metodologia de corte de carga por subtensão, a partir da modificação e introdução de uma nova variável relacionada ao corte de carga na matriz jacobiana. Para [22] o corte de carga deve ser executado primeiramente para cargas sujeitas a interrupção visando a manutenção do suprimento a cargas essenciais. Já [23]-[24] adotam como critério de corte de carga a subfrequência propondo políticas baseadas em redes neurais. Enquanto [25] apresenta políticas de corte de carga visando à manutenção dos níveis de frequência e tensão em valores aceitáveis para segurança operativa.

1.2 Motivação e Propostas

Tendo em vista os diversos aspectos relativos a operação e planejamento de micro redes. Este trabalho propõe metodologias sob a perspectiva estática para análise, operação e planejamento de micro redes com capacidades de operação conectada e ilhada à rede principal. Além de viabilizar sua autorregulação e sobrevivência quando em modo ilhado.

Para tanto, a incorporação do método de controle *droop* ao fluxo de potência de distribuição por retropropagação [12] é executada proporcionando a consideração de controle primário à micro redes em operação ilhada. Para validação da metodologia proposta, simulações com o sistema IEEE 34 barras modificado considerando unidades despacháveis e micro gerações renováveis foram realizadas.

Entretanto, em situações nas quais a geração da micro rede é substancialmente baseada em fontes variáveis, como geração renovável, e variações de carga significativa são enfrentadas, a autorregulação se torna um grande desafio sendo necessário algum tipo de controle secundário.

Posto isso, este trabalho propõe um método de controle de frequência baseado na demanda nodal de baixo custo e fácil implementação para ajuste da participação das unidades de geração distribuída despacháveis e auxílio a autoregulação da micro rede. Os dados necessários para a execução do controle podem ser obtidos por medições nodais do sistema real ou com base em previsões.

À vista dos novos desafios ocasionados pela inserção de veículos elétricos e híbridos (VEH) em larga escala no sistema elétrico de potência, e interessados em uma solução prática e simplificada para garantia de condições operativas satisfatórias dentro dos limites técnicos do sistema, uma política de carregamento de veículos elétricos baseada na disponibilidade de potência dos barramentos é desenvolvida.

Sendo também proposta uma metodologia para despacho de VEHs de maneira coordenada aos critérios técnicos e limitações do sistema, que venha a atender aos requisitos de sobrevivência da micro rede, e as condições limitantes impostas pelos proprietários para despacho das unidades VEH.

Haja vista a necessidade de comunicação entre um agente do sistema e as unidades VEH para execução das ações de regulação do processo de carregamento e operação de veículos elétricos como unidades armazenadoras de energia despacháveis, uma modelagem de dispositivo inteligente é proposta. Essa modelagem é capaz de executar ações de controle, medição, processamento, atuação e comunicação considerando ambas as políticas, carregamento e despacho, e possibilitando ao usuário a inserção de maneira amigável dos parâmetros do conjunto VEH-Carregador, ajuste do nível de carregamento pretendido, determinação da participação, ou não participação, na política de auxílio a rede associada ao nível máximo permitido de descarregamento do VEH, entre outras funcionalidades. Esse dispositivo vem a complementar o conjunto VEH-Carregador fornecendo a infraestrutura necessária para habilitação dos processos de carregamento controlado e despacho das unidades VEHs.

Em situações de ilhamento políticas de corte de carga podem ser necessárias para manutenção da capacidade de operação do sistema, estando propostas diversas abordagens na literatura. Todavia, esse trabalho se propõe a dar um passo além, buscando não somente o atendimento a grupos de prioridade e garantia de níveis de frequência e tensão dentro de limites operacionais, mas assume como critério fundamental o conceito de períodos funcionais de operação a vista da otimização do uso do potencial energético disponível.

Deste modo, uma metodologia de gerenciamento de demanda que busca a maximização do volume de cargas atendidas e consequentemente gera maior bem-estar social e menores perdas econômicas a sociedade, quando comparada a metodologias tradicionais que visam apenas a manutenção de limites operativos e/ou atendimento a cargas específicas em situações de ilhamento, é proposta.

Para melhor observação das potencialidades e resultados apresentados pelas metodologias propostas neste trabalho, uma interface gráfica foi desenvolvida para monitoramento dos estados e ações que estão ocorrendo no sistema ao longo do intervalo de operação considerado.

A interface conta com uma guia principal que apresenta três estados distintos em função do modo de operação da micro rede, sendo eles:

- Micro rede conectada à Rede Principal;
- Micro rede Ilhada completamente suprida por geração local;
- Micro rede Ilhada em modo de gerenciamento de demanda.

Associada a guia principal, uma guia secundária para o monitoramento da malha de VEHs, apresentando os parâmetros e estados de cada veículo conectado a micro rede pode ser acessada.

Ao fim, este trabalho aborda diversos aspectos operacionais de micro redes sob a perspectiva estática, desenvolvendo e propondo diversas metodologias para a operação, análise e planejamento de micro redes. Cada uma das metodologias propostas apresentam uma significativa contribuição para a análise e operação de micro redes.

Entretanto, a grande contribuição deste trabalho reside na união das metodologias propostas para *criação de uma ferramenta* capaz de desenvolver análises estáticas, de planejamento e operação para micro redes conectadas à rede principal e/ou operando em modo ilhado.

Para validação e demonstração do potencial da ferramenta desenvolvida na realização de atividades de análise, operação e planejamento de micro redes, diversas configurações de micro redes foram testadas. Dentre elas destacam-se a micro rede conectada à rede principal, micro rede ilhada com autossuficiência energética, micro rede ilhada sem autossuficiência energética, submetidas a situações de ilhamento com reconexão a rede principal, ilhamento sem reconexão a rede principal e os diversos métodos de controle disponibilizados, controle primário executado por barra de referência, controle primário por método *droop*, controle secundário executado por barra de referência, controle de frequência baseado em método *droop* para micro redes ou ausência de controle secundário.

Ao todo, 13 modos operacionais fundamentais são possibilitados, gerando incontáveis cenários quando distintas perspectivas são adotadas como foco de estudo.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho apresenta um total de 13 capítulos, 2 apêndices e 2 anexos desenvolvidos dentro da seguinte perspectiva.

No Capítulo 1 é executada uma introdução apresentando os conceitos fundamentais utilizados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 2 são apresentadas a conceituação e metodologia para implementação do fluxo de potência trifásico desequilibrado aplicado a micro redes considerando a partição de geração local despachável, fontes renováveis e veículos elétricos. Sendo também executada a conceituação das fontes renováveis e apresentados os modelos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 3 são apresentados os conceitos e metodologias para implementação e validação do método de controle *droop* para regulação primária e método de controle secundário de frequência baseado em *droop* aplicados a micro redes.

No Capítulo 4 a conceituação de veículos elétricos e infraestruturas de comunicação é desenvolvida. Sendo apresentado o processo de carregamento de VEHs controlado e a influência causada pelo carregamento não controlado de VEHs no sistema de distribuição. Tal como a conceituação e metodologia para implementação da operação de veículos elétricos como unidades armazenadoras de energia despacháveis.

No Capítulo 5 a conceituação de dispositivos inteligentes para controle, medição, processamento, atuação e comunicação do conjunto VEH-Carregador com o agente operador do sistema é executada.

No Capítulo 6 a política de gerenciamento de demanda para micro redes em situação de ilhamento baseada em grupos de prioridade e período funcional de operação é conceituada e formulada.

No Capítulo 7 são apresentadas as funcionalidades da interface gráfica para monitoramento da micro rede.

No Capítulo 8 são apresentados e discutidos os resultados para validação da ferramenta para análise, planejamento e operação de micro redes para diversas configurações e cenários.

No Capítulo 9 conclui-se o trabalho apresentando as potencialidades da ferramenta desenvolvida e as publicações geradas durante o período de desenvolvimento do trabalho.

O Apêndice A apresenta os resultados para uma configuração de micro rede em situação de ilha operando em modo de gerenciamento de demanda com controle primário provido pelo método *droop*, ausência de controle secundário e sem reconexão com a rede principal.

O Apêndice B apresenta os resultados para uma configuração de micro rede em situação de ilha operando em modo de gerenciamento de demanda com controle primário provido pelo método *droop*, controle secundário pelo método de controle de frequência baseado em *droop* e com reconexão com a rede principal

O Anexo A apresenta as condições iniciais e parâmetros do sistema teste em formato *IEEE Common Data Format (CDF)*.

O Anexo B apresenta o perfil de carga utilizado durante as simulações.

2. Fluxo de Potência Trifásico Desequilibrado

Uma das ferramentas mais requisitadas para estudos do sistema elétrico de potência, algoritmos de fluxo de potência são responsáveis pela identificação de condições operativas do sistema em regime permanente, fornecendo o ponto inicial para análises de operação, planejamento, expansão, transitórios, proteção, comissionamento, entre tantas outras. Suas grandezas de interesse são as tensões e ângulos nas barras, fluxos de potência ativa e reativa nas linhas, perdas relacionadas aos diversos segmentos do sistema produzida por condutores e transformadores, entre tantas outras variáveis que sejam pertinentes ao estudo de interesse.

Sua aplicação, porém, não se limita ao fornecimento de condições iniciais de operação para estudos subsequentes. Quando associado a outras ferramentas como algoritmos inteligentes [26], redes neurais [27], regras fuzzy [27], vetor tangente [28] método da continuação [2], determinação de monopólio pelo fator *Herfindahl-Hirschman Index* (HHI) [29], produz ações de otimização e ferramentas para análise do sistema como alocação ótima de compensação, ajuste de taps de transformadores por *Load Tap Changers* (LTC), identificação de barras críticas, áreas de segurança, monopólio de geração, regiões sensíveis a perdas, determinação de margem de carga, ponto de colapso de tensão, curvas PV e QV entre tantas outras aplicações já desenvolvidas e a serem proposta, pela academia e agentes do setor.

Entre os métodos mais populares podemos destacar os algoritmos baseados em técnicas numéricas como os métodos de Gauss-Seidel, Newton-Raphson e suas versões desacopladas como *Constrained Reactive Implicit Coupling* (CRIC).

Contudo a modelagem de tais algoritmos leva em consideração características como, baixa razão R/X, sistema majoritariamente transposto, equilíbrio de carregamento entre fases e grandes susceptâncias capacitivas nas linhas de transmissão, sendo tais características intrínsecas aos sistemas de transmissão.

Dado que o foco deste trabalho se encontrar em micro redes desenvolvidas em sistemas de distribuição de energia, estas condições por sua vez, em geral, não estão presentes, sendo os mesmos caracterizados por uma topologia radial ou fracamente

malhada, múltiplas derivações em ramos, desbalanceamento entre fases, ausência de transposição de fases e alta razão R/X.

Deste modo, algoritmos tradicionais de fluxo de potência baseados na solução por meio da matriz Jacobiana possuem dificuldades de convergência devido ao mau condicionamento das matrizes ocasionado pela alta relação R/X.

Tendo em vista este problema, a literatura apresenta diversos procedimentos para solução do fluxo de potência em redes de distribuição. As primeiras abordagens propostas utilizavam o fato da topologia do sistema de distribuição ser radial para aplicação de métodos de varredura de rede, uma vez que antes da inserção de geração local o fluxo da potência ocorria unidirecionalmente entre o suprimento e cada barra de carga [30].

Em 1967, a técnica de varredura *backward-forward* aplicada a solução de fluxo de potência foi proposta, sendo até hoje a base fundamental para a solução do problema de fluxo de potência para sistemas de distribuição.

O algoritmo geral consiste em dois passos básicos. A varredura inversa, *backward*, em que o processo começa nas barras terminais caminhando até o nó de suprimento, realizando a adição das correntes ou potências ao longo do percurso. E o passo de varredura direta, *forward*, realizado posteriormente que executada a atualização das tensões nodais começando pela barra de suprimento até as barras terminais.

A seguir os passos detalhando o procedimento para implementação do algoritmo são detalhados pelo fluxograma descrito na Figura 2.1.

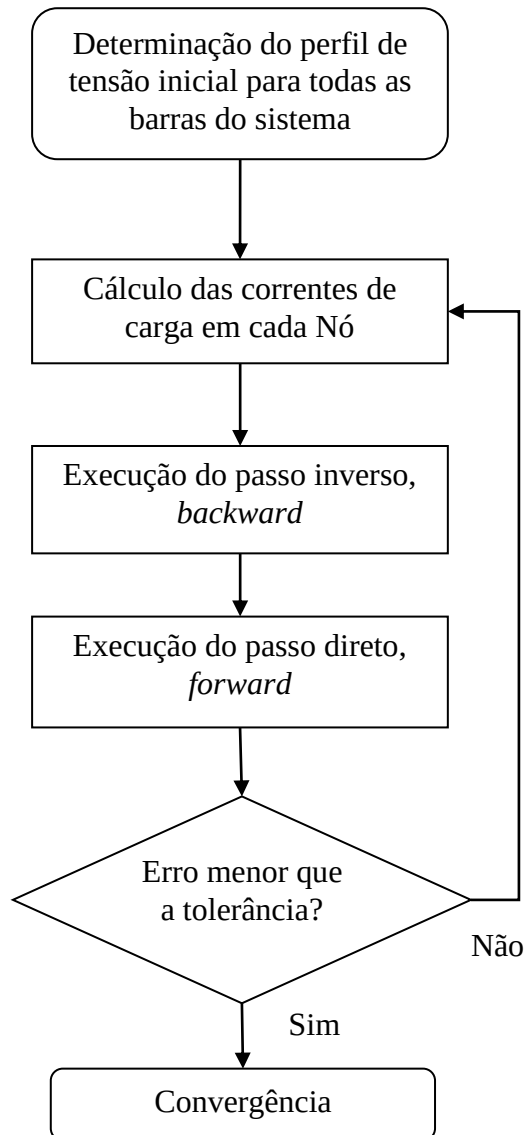


Figura 2.1: Metodologia para implementação da técnica de varredura *backward-forward*

Apresentando uma revisão do estado da arte, a referência [31] propõe a determinação de potências nodais em frente as correntes, apresentando boa precisão, tempo de processamento e facilidade de modelagem. Em [32] um algoritmo baseado em um método de compensação, com enfoque em reguladores de tensão, capacitores com chaveamento automático e na modelagem de cargas distribuídas e desbalanceadas é apresentado.

Posteriormente, [33] utilizara a metodologia proposta por [32] para investigação da instalação de geração distribuída modeladas como barras de tensão controlada para

sistemas de distribuição trifásicos fracamente malhados. Já [34] apresenta um algoritmo baseado na fatoração triangular com ordenação ótima da matriz admitância Y , ou método de Gauss com matriz impedância Z implícita aproveitando a esparsidade característica da matriz Y .

O método de Gauss com matriz de impedância Z utiliza a matriz admitância Y bifatorada e injeções de corrente equivalentes para representação dos componentes do sistema, baseando-se nos princípios de superposição. A convergência do método é diretamente dependente do número de barras com tensão constante, barras PV. Se a única barra com tensão especificada do sistema for a de referência, a taxa de convergência é comparável ao do método de Newton-Raphson [34].

Como alternativas para solução do fluxo de potência de distribuição a partir dos métodos desacoplados de Newton-Raphson, [35] propõe uma formulação para aumento da razão R/X aplicando uma rotação geométrica nos eixos. Esse aumento é executado por meio da adição de um ângulo tal que a razão X/R se torne satisfatória, determinando neste momento as grandezas da rede em regime. Em seguida a rotação é desfeita, e os fluxos de potência e perdas são determinados para a rede original. Sendo a extensão para o problema do fluxo de potência trifásico em sistemas de distribuição abordada posteriormente em [36]. Em [37] uma metodologia baseada nos fluxos de corrente nas linhas em coordenadas retangulares é proposta, de modo que os mesmos são linearizados ao redor de um ponto de operação e transformados em uma matriz constante visando a eliminação dos elementos fora da diagonal principal da matriz Jacobiano.

A metodologia adotada neste trabalho permite a resolução do problema de fluxo de potência em redes de distribuição trifásicas com topologia radial considerando penetração de fontes de geração distribuída. Proposta em [12] a partir da consideração de matrizes de incidência, o processo de varredura *backward-forward* passa a ser completamente executado em uma única etapa.

2.1 Metodologia para Implementação

O método proposto é baseado na relação entre as correntes nodais e correntes de ramo do sistema.

Considerando um sistema radial de ‘n’ nós, são possíveis ‘n-1’ correntes de ramo. A corrente nodal ‘j’ pode ser definida pela corrente de entrada do ramo ‘i-j’ subtraída das correntes dos nós conectados a barra ‘j’, ‘k(j)’. Estando esta relação expressa pela Equação (2.1)

$$I_j = I_{ij} - \sum I_{jk(j)} \quad (2.1)$$

As correntes nodais e de ramo são relacionadas pela matriz incidência de elementos, chamada de ‘K’. Trata-se de uma matriz quadrada não-singular de ordem ‘n-1’ na qual os elementos da diagonal principal K(j,j) são iguais a ‘1’, e os demais elementos incidentes, entre os nós ‘i’ e ‘j’, são definidos por K(i,j) igual a ‘-1’. Todos os demais elementos são nulos [12]. Essa relação é representada nas equações (2.2) e (2.3).

$$I_{nó} = K \cdot I_{ramo} \quad (2.2)$$

$$I_{ramo} = K^{-1} \cdot I_{nó} \quad (2.3)$$

Generalizando a formulação para uma rede de distribuição trifásica, são obtidas três matrizes de incidência, uma para cada fase, com dimensões (NA-1 x NA-1), (NB-1 x NB-1) e (NC-1 x NC-1), em que NA, NB e NC são os números de nós existentes em cada fase. As correntes nodais de cada fase são obtidas aplicando a Equação (2.4).

$$\begin{aligned} I_{nó}^A &= I_L^A + I_{sh}^A - I_G^A \\ I_{nó}^B &= I_L^B + I_{sh}^B - I_G^B \\ I_{nó}^C &= I_L^C + I_{sh}^C - I_G^C \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$I_L^{A,B,C} = \frac{abs(V_{nó}^{A,B,C})^n \times conj(S_{especificado}^{A,B,C})}{conj(V_{nó}^{A,B,C})} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} I_{sh}^A \\ I_{sh}^B \\ I_{sh}^C \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Y_{AA} & Y_{AB} & Y_{AC} \\ Y_{BA} & Y_{BB} & Y_{BC} \\ Y_{CA} & Y_{CB} & Y_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{nó}^A \\ V_{nó}^B \\ V_{nó}^C \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$I_G^{A,B,C} = \frac{(P_{G,especificado}^{A,B,C} - jQ_{G,especificado}^{A,B,C})}{conj(V_{nó}^{A,B,C})} \quad (2.7)$$

Em que:

$I_L^{A,B,C}$ são calculadas de acordo com a Equação (2.5), na qual o índice ‘n’ representa o modelo de carga empregado (‘0’ para potência constante, ‘1’ para corrente constante e ‘2’ para impedância constante);

$I_{sh}^{A,B,C}$ são calculadas de acordo com a Equação (2.6);

$I_G^{A,B,C}$ são calculadas de acordo com a Equação (2.7).

De posse das correntes nodais, as correntes de ramo de cada fase são calculadas de acordo com a Equação (2.3). Em seguida, as quedas de tensão nos ramos são calculadas de acordo com a Equação (2.8), e finalmente, as tensões nodais são calculadas utilizando a Equação (2.9) [12].

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{ramo\ ij}^A \\ \Delta V_{ramo\ ij}^B \\ \Delta V_{ramo\ ij}^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA_ramoij} & Z_{AB_ramoij} & Z_{AC_ramoij} \\ Z_{BA_ramoij} & Z_{BB_ramoij} & Z_{BC_ramoij} \\ Z_{CA_ramoij} & Z_{CB_ramoij} & Z_{CC_ramoij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ramo\ ij}^A \\ I_{ramo\ ij}^B \\ I_{ramo\ ij}^C \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} V_{nó\ j}^A \\ V_{nó\ j}^B \\ V_{nó\ j}^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{nó\ i}^A \\ V_{nó\ i}^B \\ V_{nó\ i}^C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta V_{ramo\ ij}^A \\ \Delta V_{ramo\ ij}^B \\ \Delta V_{ramo\ ij}^C \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

O processo ocorre de maneira iterativa até que se atinja o limite de tolerância adotado.

2.2 Fontes Renováveis

Destacando-se pelo crescente amadurecimento tecnológico e expansão dos sítios de aplicação que veem a consolidar esse novo modelo de geração. Foram primeiramente incentivadas a vista de possíveis crises na produção do petróleo e posteriormente devido a fatores ambientais, apresentando uma grande alternativa a geração tradicional de energia.

Contudo, devido a imprevisibilidade da geração garantida por tais fontes, ações extras devem ser tomadas para o atendimento de critérios como qualidade de energia, estabilidade, confiabilidade e segurança operativa. Sendo estes alguns dos novos desafios a serem abordados pela academia e agentes do setor.

Nesta perspectiva e a vista das considerações futuras deste trabalho, uma breve discussão seguida da apresentação dos modelos de regime permanente das duas principais e mais difundidas fontes de geração renovável da atualidade, solar e eólica, são descritas de modo a situar o leitor sobre suas capacidades e limitações.

2.2.1 *Geração Solar*

A radiação proveniente de reações químicas solares pode ser utilizada para a geração de energia térmica, mecânica ou elétrica [38]. A geração de energia elétrica ocorre a partir de painéis fotovoltaicos, fitas finas ou até mesmo aplicações de tintas que devido ao efeito fotovoltaico, convertem diretamente os fótons contidos na radiação solar em energia elétrica. A nível de absorção de energia depende da incidência de radiação em sua superfície, estando esta relacionada a fatores como localização geográfica, período do dia, estação do ano, inclinação e clima [39].

Devido a maior difusão e aplicabilidade, neste estudo a geração de energia a partir de radiação solar será considerada proveniente de painéis fotovoltaicos.

2.2.1.1 Modelo Geração Solar

Um painel fotovoltaico pode ser definido como um conjunto de células fotovoltaicas compostas por uma junção semicondutora tipo p-n que ao serem expostas a irradiação solar, a partir do efeito fotovoltaico, executam o processo de geração de energia elétrica. Tais células podem ser fabricadas a partir de diferentes tipos de semicondutores e processos de manufatura [40].

Dentre as modelagens de painéis fotovoltaicos destacam-se os modelos exponencial simples e exponencial duplo. O modelo exponencial duplo apresenta uma abordagem complexa que produz esforços computacionais relativamente expressivos. Enquanto, o modelo exponencial simples é capaz de produzir uma resposta satisfatória com baixo custo computacional, estando este modelo ilustrado pela Figura 2.2.

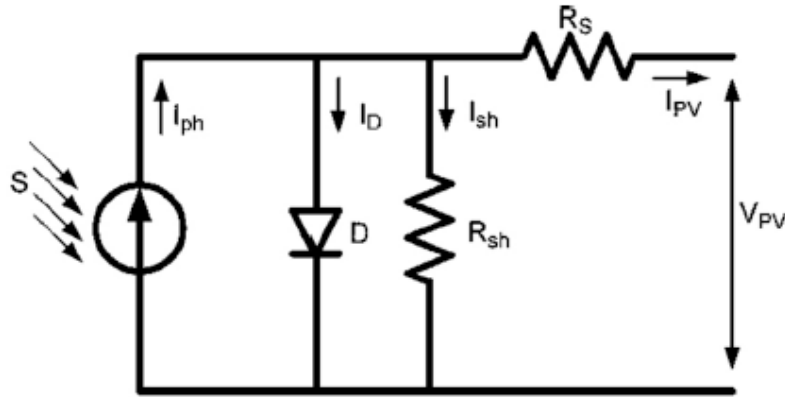


Figura 2.2: Modelo exponencial simples para uma célula fotovoltaica [41]

As correntes apresentadas pelo modelo são expressadas pelas seguintes formulações.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (3.1)$$

$$I_D = I_0 \left[e^{\frac{q(V_{PV} + R_s I_{PV})}{AK_B T}} - 1 \right] \quad (3.2)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{R_{sh}} \quad (3.3)$$

Em que:

I_{PV} : corrente da carga (A);	R_{sh} : resistência shunt (Ω);
I_{ph} : corrente gerada pelo efeito fotoelétrico (A);	V_{PV} : tensão da carga (V);
I_D : corrente do diodo (A);	A: fator de qualidade da junção p-n;
I_{sh} : corrente shunt (A);	KB: constante de Boltzmann's – $1,38 \times 10^{-23}$ (J/K);
I_0 : corrente de saturação reversa do diodo (A);	T: temperatura da junção (K);
R_S : resistência série (Ω);	q: carga do elétron – $1,602 \times 10^{19}$ (C).

Os parâmetros - I_{ph} , I_0 , R_S , R_{sh} e A são determinados pelos pontos de curto circuito, máxima potência e circuito aberto apresentados pela curva I(V):

Deste modo, substituindo os pontos de curto circuito ($I_{PV} = I_{sc}$ e $V_{PV} = 0$), máxima potência ($I_{PV} = I_{mpp}$ e $V_{PV} = V_{mpp}$) e circuito aberto ($I_{PV} = 0$ e $V_{PV} = V_{oc}$) na Equação (3.1), e derivando-a em relação à tensão fornecida pelo painel fotovoltaico, temos:

$$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = -I_0 \frac{q}{AK_B T} \left(1 + R_S \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \right) e^{\frac{q(V_{PV} + R_S I_{PV})}{AK_B T}} - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 + R_S \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \right) \quad (3.4)$$

$$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = -I_0 \frac{q}{AK_B T} \left(1 + R_S \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \Big|_{V_{PV}=0} \right) e^{\frac{qR_S I_{sc}}{AK_B T}} - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 + R_S \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \Big|_{V_{PV}=0} \right) \quad (3.5)$$

$$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \Big|_{I_{PV}=0} = -I_0 \frac{q}{AK_B T} \left(1 + R_S \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \Big|_{I_{PV}=0} \right) e^{\frac{qV_{oc}}{AK_B T}} - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 + R_S \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \Big|_{I_{PV}=0} \right) \quad (3.6)$$

Sendo a potência fornecida pelo painel fotovoltaico dada por (3.7) e sua derivada em relação à tensão expressa por (3.8):

$$P_{PV} = V_{PV}I_{PV} \quad (3.7)$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (3.8)$$

Sabe-se que para o ponto de máxima potência $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0$, assim temos:

$$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} = -\frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} \quad (3.9)$$

$$\frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} = I_0 \frac{q}{AK_B T} \left(1 - R_S \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}}\right) e^{\frac{q(V_{mpp} + R_S I_{mpp})}{AK_B T}} + \frac{1}{R_{sh}} \left(1 - R_S \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}}\right) \quad (3.10)$$

Deste modo, os parâmetros dependentes do ponto de máximo carregamento podem ser obtidos pelas equações apresentadas a seguir.

$$A = \frac{V_{mpp} + \frac{1}{G_{so}} I_{mpp} - V_{oc}}{V_t \left[\ln(I_{sc} - V_{mpp} G_{sho} - I_{mpp}) - \ln(I_{sc} - V_{oc} G_{sho}) + \frac{I_{mpp}}{I_{sc} - V_{oc} G_{sho}} \right]} \quad (3.11)$$

$$R_{sh} = \frac{1}{G_{sho}} \quad (3.12)$$

$$I_o = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_S} \right) e^{-\frac{V_{oc}}{AV_t}} \quad (3.13)$$

$$R_S = \frac{1}{G_{so}} - \frac{AV_t}{I_o} e^{-\frac{V_{oc}}{AV_t}} \quad (3.14)$$

$$I_{ph} = I_{sc} \left(1 - \frac{R_S}{R_{sh}} \right) + I_o \left(e^{\frac{R_S I_{sc}}{AV_t}} - 1 \right) \quad (3.15)$$

Em que:

$$G_{so} = \left. \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \right|_{I_{PV}=0} \quad (3.16)$$

$$G_{sho} = \left. \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \right|_{V_{PV}=0} \quad (3.17)$$

$$V_t = \frac{K_B T}{q} \quad (3.18)$$

2.2.1.2 Dados Painel Fotovoltaico

Os dados de catálogo do painel fotovoltaico utilizado neste trabalho estão apresentados na Tabela 2.1, enquanto os parâmetros calculados são ilustrados pela Tabela 3.2, para condição de radiação solar de 1000 (W/m²) e temperatura de referência 25 (°C).

Ressalta-se que para condições diferentes das anteriormente apresentadas, há a necessidade de recálculo dos parâmetros apresentados pela Tabela 2.2.

Tabela 2.1: Dados do módulo BP SX 120

Dados	
Máxima potência ($P_{máx}$)	120 (W)
Tensão em $P_{máx}$ (V_{mp})	33,7 (V)
Corrente em $P_{máx}$ (I_{mp})	3,56 (A)
$P_{máx}$ mínimo garantido	110 (W)
Corrente de curto circuito (I_{sc})	3,87 (A)
Tensão de curto aberto (V_{oc})	42,1 (V)
Coeficiente de temperatura de I_{sc}	(0,065 ± 0,015) %/oC
Coeficiente de temperatura de V_{oc}	(160 ± 10) %/oC
NOCT	47 ± 2 (oC)
Tensão máxima do sistema	600 (V)

Tabela 2.2: Parâmetros calculados para $S = 1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$ e $T_c = 25 \text{ (}^\circ\text{C)}$

Dados	
I_{ph}	3,871 (A)
I_o	7,9672e-7 (A)
R_s	0,3996
R_{sh}	1.500,8 (Ω)
A	1,4776

2.2.2 Geração Eólica

A partir da utilização de turbinas, a energia cinética de translação existente em massas de ar em movimento pode ser convertida em energia cinética de rotação, que por sua vez associadas a um gerador pode ser convertida em energia elétrica, sendo dado a esse conjunto o nome de aerogerador.

2.2.2.1 Modelo Geração Eólica

Para estudos transitórios e análises de estabilidade angular um modelo de turbina que reproduza o comportamento entre a incidência de vento e a potência mecânica produzida no eixo pela turbina, associado a relação de transformação do gerador de potência mecânica em elétrica é de essencial importância. Existindo diversas modelagens na literatura [42].

Contudo, para análises estáticas uma aproximação sem perdas relevantes [43], [42], [44], [45], desse sistema a partir da relação não linear entre a saída de potência do aerogerador e a velocidade do vento pode ser obtida pelo seguinte equacionamento.

$$P_{wt} = \begin{cases} 0, & \text{para } 0 \leq \omega \leq \omega_{ci} \\ (A + B\omega + C\omega^2)P_n, & \text{para } \omega_{ci} < \omega \leq \omega_r \\ P_n, & \text{para } \omega_r < \omega \leq \omega_{co} \\ 0, & \text{para } \omega > \omega_{co} \end{cases} \quad (3.19)$$

Em que:

ω : velocidade do vento;

P_n : potência nominal da turbina;

ω_r : velocidade nominal ($\omega > \omega_r$, turbina gera P_n);

ω_{ci} : velocidade de *cut in* (velocidade mínima para início do movimento);

ω_{co} : velocidade de *cut off* ($\omega > \omega_{co}$, potência gerada nula);

A, B e C: coeficientes responsáveis pelo comportamento parabólico da turbina, sendo fixos e definidos de acordo com as equações.

$$A = \frac{1}{(\omega_{ci} - \omega_r)^2} \left[\omega_{ci}(\omega_{ci} + \omega_r) - 4\omega_{ci}\omega_r \left(\frac{\omega_{ci} + \omega_r}{2\omega_r} \right)^3 \right] \quad (3.20)$$

$$B = \frac{1}{(\omega_{ci} - \omega_r)^2} \left[4(\omega_{ci} + \omega_r) \left(\frac{\omega_{ci} + \omega_r}{2\omega_r} \right)^3 - (3\omega_{ci} + \omega_r) \right] \quad (3.21)$$

$$C = \frac{1}{(\omega_{ci} - \omega_r)^2} \left[2 - 4 \left(\frac{\omega_{ci} + \omega_r}{2\omega_r} \right)^3 \right] \quad (3.22)$$

A resposta do modelo ao longo de sua faixa de operação é demonstrada pela Figura 2.3.

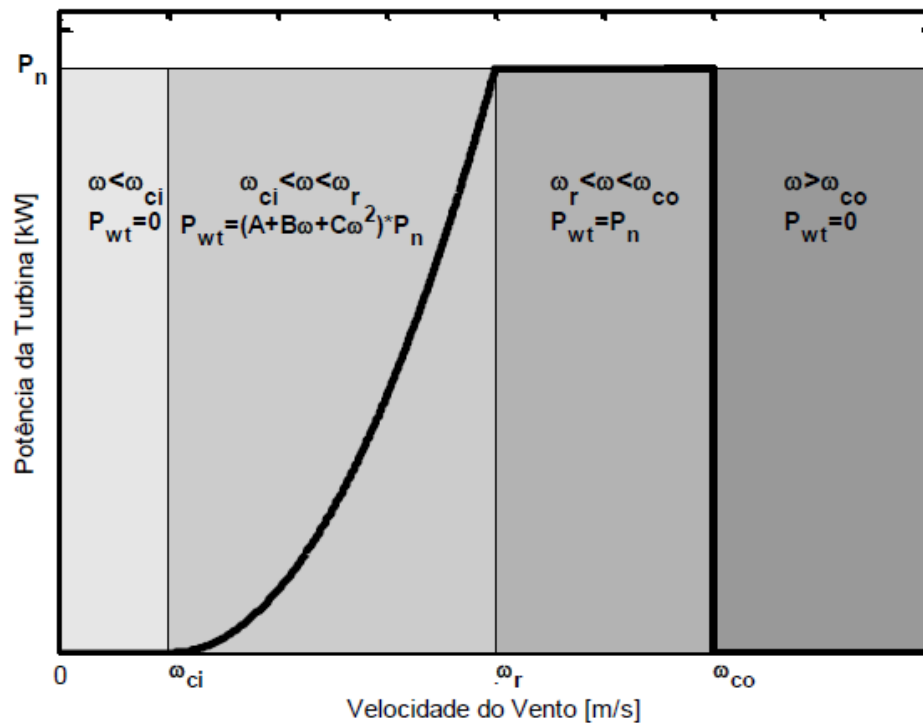


Figura 2.3: Geração de energia elétrica em função da velocidade do vento [25]

2.2.2.2 *Dados Geração Eólica*

Os parâmetros de velocidade mínima para início do movimento do modelo, velocidade de corte de entrada e máxima utilizadas neste estudo foram obtidos em [46] estando apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Parâmetros de velocidade do vento

Dados	
ω_r	8 (m/s)
ω_{ci}	4(m/s)
ω_{co}	12(m/s)

3. Métodos de Controle para Micro Redes

Micro redes autossustentáveis habilitadas a operação isolada à rede principal estão se tornando uma realidade no sistema elétrico, dada a crescente penetração de geração distribuída despachável (DG) e geração de energia por fontes renováveis. Assim, um sistema de distribuição torna-se uma micro rede, e uma micro rede pode evoluir para smart grid, se controle e comunicações são consideradas.

Neste tipo de configuração o sistema perde a referência de frequência da rede principal sendo necessárias estratégias para execução de ações de controle visando o despacho da geração disponível na micro rede.

Uma representação de micro rede com partição de geração distribuída (GD) é apresentada pela Figura 3.1.

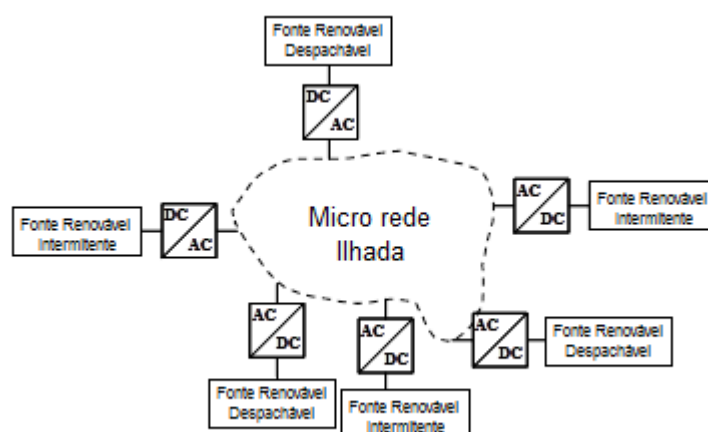


Figura 3.1: Projeto de uma micro rede com GDs [13]

Nesta perspectiva o despacho de geração em micro redes pode ser executado a partir da aplicação do método de controle *droop*, possuindo fácil implementação e bons resultados, para regulação dos níveis de potência ativa e reativa que os geradores injetam no sistema [13].

Todavia, determinadas configurações e condições operativas ao qual o sistema é exposto fazem com que por vezes a implementação do controle *droop*, por si só, não seja suficiente para a manutenção da micro rede dentro dos limites operativos [14]. Esta

condição pode ser observada em casos nos quais a geração da micro rede é substancialmente baseada em fontes variáveis, geração renovável, e significativas variações de carga são enfrentadas.

Deste modo, esta seção apresenta a proposta de um método de controle secundário de frequência baseado em *droop* para o ajuste da participação das GDs despacháveis e auxílio à autorregulação da micro rede. Sendo sua implementação facilmente realizável e possuindo baixo custo associado.

Três contribuições são desenvolvidas nesta seção, a primeira consiste na identificação da capacidade de controle primário em micro redes, a segunda na verificação da necessidade de implementação de controle secundário em micro redes, e a terceira uma proposta de método de controle de frequência baseado em *droop* para a execução do controle de frequência em micro redes.

3.1 Controle Primário *Droop* Aplicado a Micro Redes

3.1.1 Controle Droop

O método de controle *droop* é uma estratégia de controle descentralizada na qual a frequência do sistema é definida a partir da demanda de potência ativa, e a tensão regulada em função das variações de potência reativa. Quando adotado em geradores não síncronos, a lógica de controle é executada por meio de modulação PWM (*Pulse Width Modulation*), produzindo uma rápida resposta para o controle de tensão, ângulo e frequência [52] da unidade geradora.

Nesta perspectiva, duas topologias podem ser assumidas. A primeira, *Single Master Operation* (SMO), consiste em um gerador mestre que regula a frequência para os demais geradores escravos. A segunda propõe a operação conjunta de todos os geradores despacháveis, *Multi Master Operation* (MMO) [53], onde todos participam do compartilhamento de carga de acordo com o seu *droop* individual [54], [55], sendo esta a metodologia adotada para este trabalho. Esta capacidade de contribuição distribuída é um dos principais benefícios da operação interligada da rede, uma vez que quanto maior for o

número de unidades geradoras participantes, melhor será sua regulação primária e reposta a perturbações.

O controle *droop* pode ser realizado utilizando as Equações (5.1) e (5.2), estando seu comportamento ilustrado na Figura 3.2.

$$w = w^* - m \cdot P \quad (5.1)$$

$$V = V^* - n \cdot Q \quad (5.2)$$

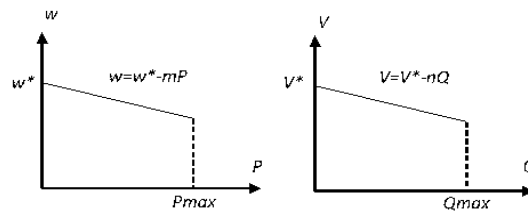


Figura 3.2: Representação do método de controle *droop*

Em que:

- ‘ w^* ’: frequência a vazio;
- ‘ w ’: frequência para uma potência ativa ‘ P ’ injetada;
- ‘ m ’: proporção de potência ativa que o inversor absorve;
- ‘ V^* ’: nível de tensão em vazio;
- ‘ V ’: nível de tensão para uma energia reativa ‘ Q ’ injetada;
- ‘ n ’: proporção da potência reativa que o inversor absorve.

3.1.2 Metodologia para Implementação

Visando a determinação de condições operativas para sistemas trifásicos desequilibrado com inserção de geração distribuída e com capacidade de operação conectada e/ou ilhada à rede principal, um fluxo de potência trifásico desequilibrado considerando controle *droop* é proposto.

Nesse contexto, para a solução do problema de fluxo de potência a metodologia anteriormente apresentada [14] é empregada, e na ocorrência da verificação de isolamento do sistema o método *droop* é adotado como parâmetro corretor.

Assim, após a execução do fluxo de potência o método *droop* é considerado, ajustando o nível de tensão nas unidades geradoras, os taps dos transformadores são variados a fim de controlar o nível de tensão nas barras PQ, a atualização dos níveis de tensão é executada em todas as barras, e finalmente, o erro é determinado.

O processo é repetido até a convergência ser atingida. Após o termino deste processo, as perdas do sistema são computadas.

Um fluxograma representativo da metodologia proposta é apresentado pela Figura 3.3.

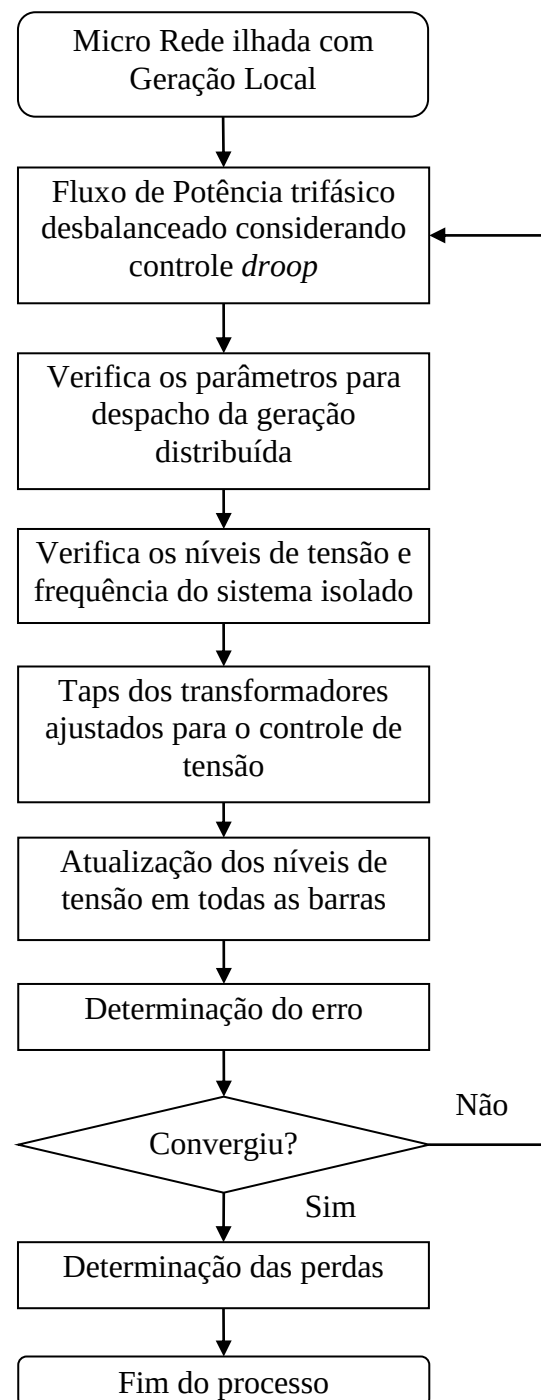


Figura 3.3: Fluxograma da metodologia de controle *droop* aplicada a micro redes

3.1.3 Validação da Metodologia Proposta

Para validação da metodologia três diferentes cenários de geração foram considerados para o sistema.

1. Apenas GD despachável;
2. Participação de GD despachável e não despachável;
3. Participação de GD despachável e não despachável com inserção de veículos elétricos em processo de carregamento.

O primeiro cenário em estudo considera GDs despacháveis e demanda variável. No segundo caso são acrescentadas GDs não despacháveis com geração variável. Enquanto o terceiro cenário considera todas as condições anteriores mais o carregamento de veículos elétricos.

3.1.3.1 Sistema Teste

O sistema teste utilizado foi o IEEE 34 barras representado pela Figura 3.4, estando suas modificações e definições descritas a seguir.

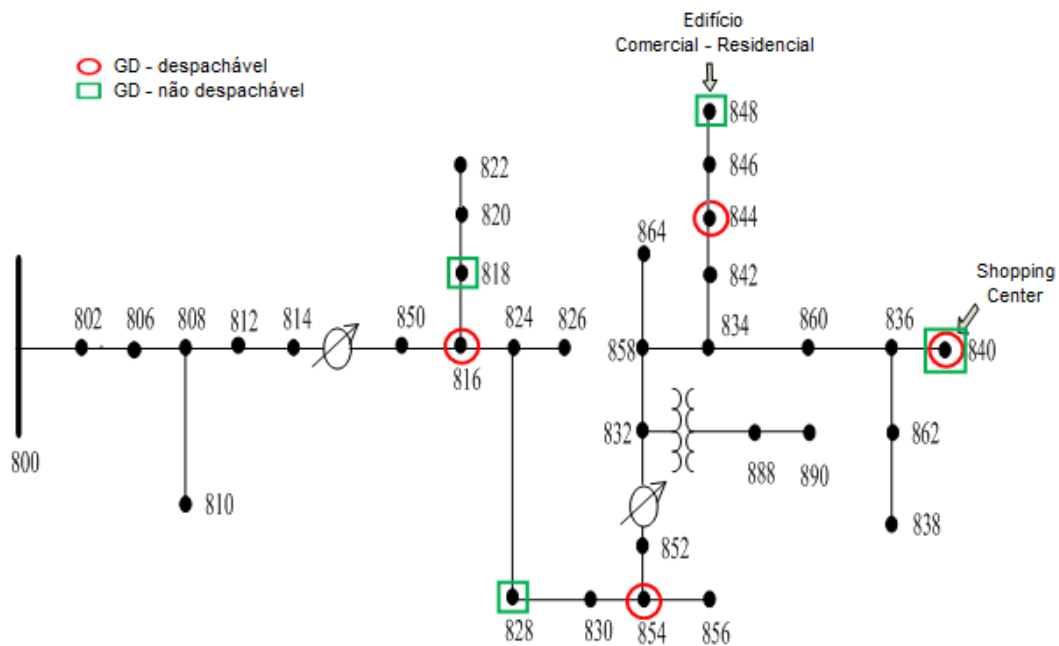


Figura 3.4: Sistema IEEE 34 barras utilizado para validação da metodologia

Os nós trifásicos representam 15 consumidores residenciais, nós monofásicos representam 5 consumidores residenciais, todos possuindo um veículo elétrico. O nó 800 representa uma subestação, nó 848 considera um prédio residencial/comercial composto por 60 apartamentos, dotados de um VEH por apartamento e o nó 840 é um Shopping Center, permitindo ao todo o carregamento de 445 veículos durante o período noturno, 22:00h à 6:00h, período sob análise nesse estudo.

Totalizando 24 nós trifásicos, 8 nós monofásicos, 2 reguladores de tensão, 4 GDs despacháveis e 4 GDs não despacháveis com respectivas potências instaladas de 150kW e 300kW.

3.1.3.2 *Estudo de Casos*

Para o estudo proposto duas análises foram executadas. A primeira consiste na adoção de uma barra como referência para análise da evolução do sistema ao longo dos pontos de operação. A segunda assume um ponto de operação como referência visando a análise das variações ao longo do sistema.

3.1.3.2.1 *Evolução do Sistema ao Longo dos Pontos de Operação*

A análise da evolução do sistema ao longo dos pontos de operação busca a compreensão do comportamento do sistema frente as variações de demanda. Essa análise é desenvolvida para os três cenários propostos, sendo adotada como referência a *Barra 818* devido a presença de GD não despachável.

Uma vez que o período sob análise ocorre entre 22:00h e 6:00h, a demanda de potência apresenta um perfil decrescente como ilustrado na Figura 3.5 para o sistema e na Figura 3.6 para a *Barra 818*.

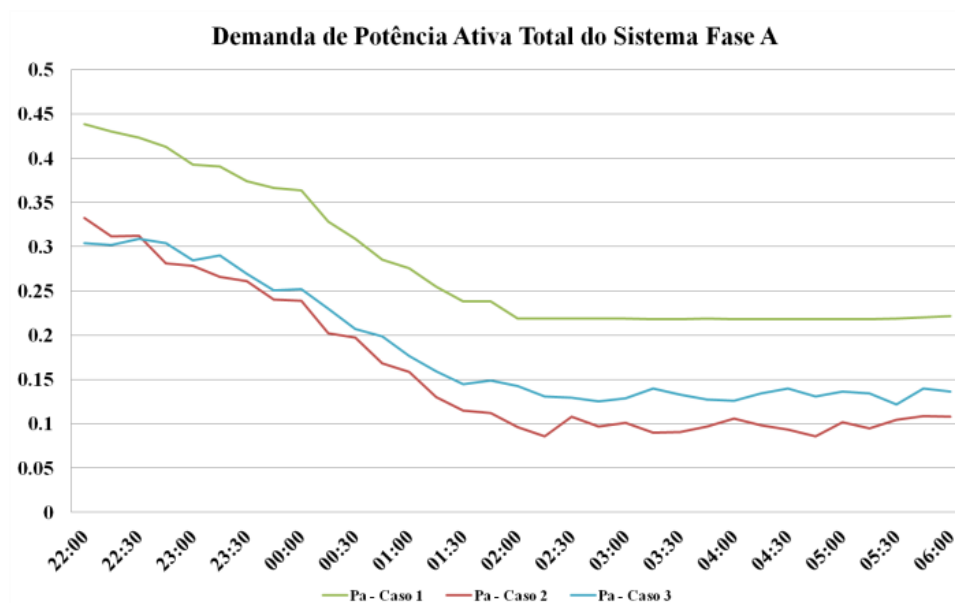


Figura 3.5: Demanda de potência ativa total do sistema

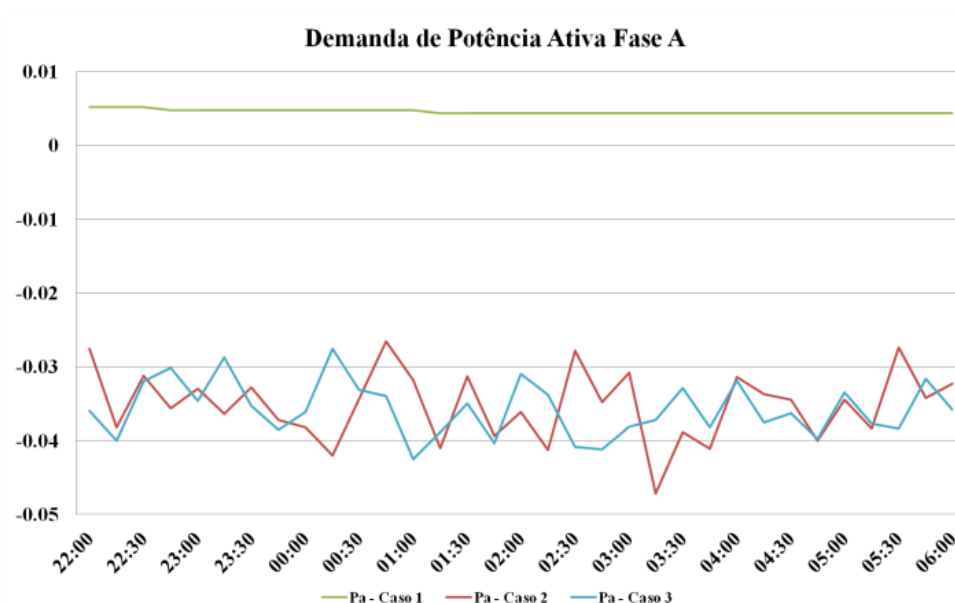


Figura 3.6: Demanda de potência ativa *Barra 818*

Quando os *Cenário 2 e 3* são considerados, a GD não despachável alocada na *Barra 818* opera de maneira ativa fornecendo potência ao sistema, sendo claramente observada sua atuação na Figura 3.6.

A análise das variações de tensão para os diferentes pontos de operação é demonstrada na Figura 3.7, por meio da qual é possível a verificação de desequilíbrio no sistema.

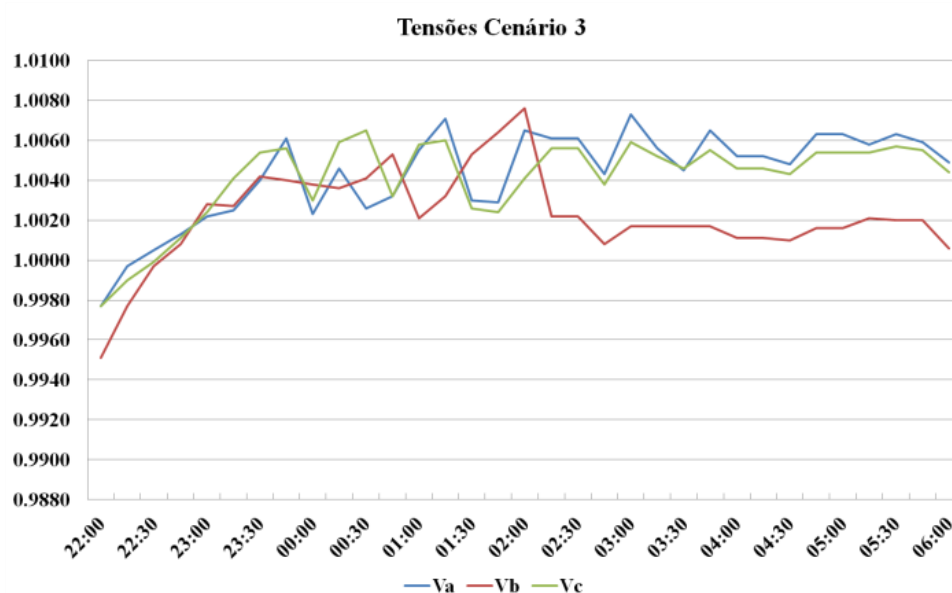


Figura 3.7: Tensões nas fases ‘a’, ‘b’, ‘c’ da Barra 818 para o Cenário 3

Devido a aplicação do método de controle *droop*, a frequência do sistema é diretamente proporcional a variação de demanda entre o ponto de operação do sistema no momento do ilhamento e o respectivo ponto de operação sob análise.

Essa afirmação é facilmente constatada quando comparadas as diferenças entre a demanda inicial e final para os distintos cenários expressos na Figura 3.5, com os valores de frequência relacionados ao último ponto de operação apresentados pela Figura 3.8.

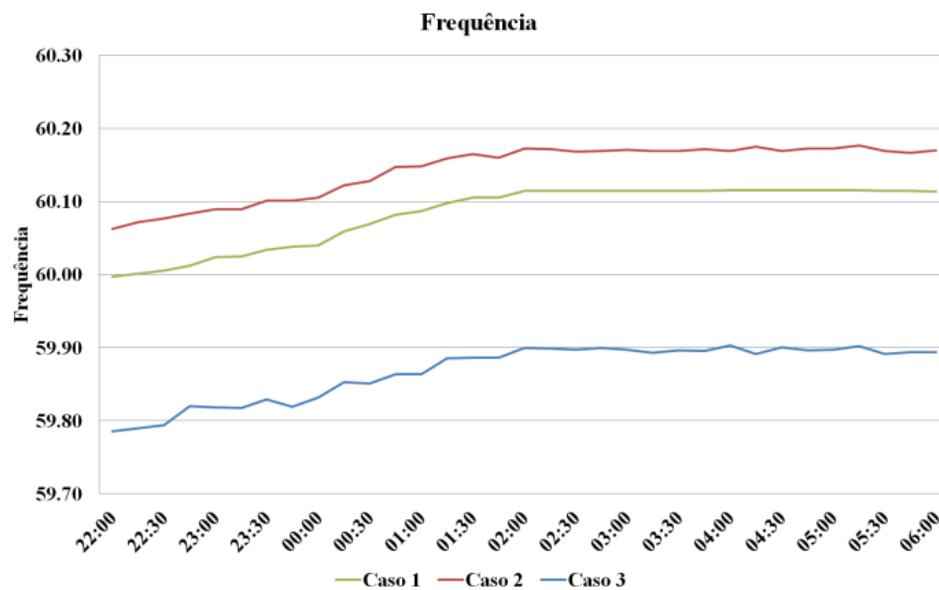


Figura 3.8: Variação da frequência do sistema para os três cenários

A maior diferença de demanda é apresentada para *Cenário 1*, causando ao mesmo a maior variação de frequência 0,12 [Hz]. Contudo, o maior valor de frequência é observado para o *Cenário 2*, esse fato ocorre devido ao excesso de GD não despachável frente a demanda a ser suprida pelo sistema. O *Cenário 3* apresenta o menor valor de frequência em função da elevada quantidade de VEHs em carregamento, porém eleva sua frequência à medida que os VEHs completam o processo de carregamento. Medidas de controle, como propostas em [14], podem ser tomadas para minimizar essa contingência.

Ao final, observa-se que a variação de frequência se encontra dentro dos limites aceitáveis de operação para todos os cenários considerados.

3.1.3.2.2 Análise das Variações do Sistema para um Ponto de Operação Específico

Essa análise visa a compreensão do comportamento do sistema de modo geral para um ponto de operação específico. A análise foi executada para os três cenários, sendo os resultados apresentados para o último ponto de operação sob análise, 6:00h.

Primeiramente, o perfil de tensão do sistema para a fase ‘a’ do ponto de operação sob análise são exibidos na Figura 3.9.

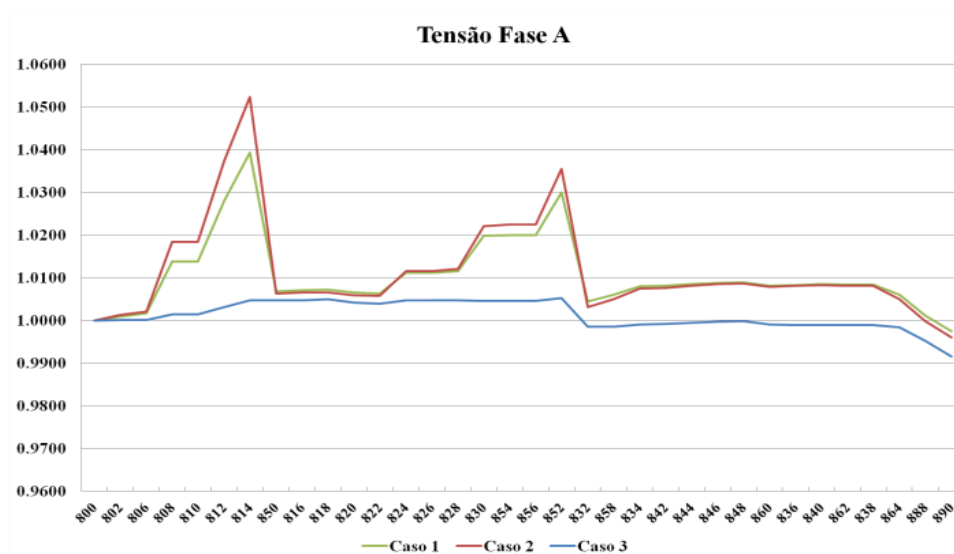


Figura 3.9: Tensões na fase ‘a’ de cada barra do sistema para todos os cenários

As grandes variações de tensão estão associadas micro rede se referem a atuação dos reguladores de tensão, enquanto a pequena queda de tensão corresponde aos nós ligados ao ramal suprido pelo secundário do transformador alocado entre as *Barras 832-888*. Pode-se constatar que o método de controle *droop* apresenta bom desempenho no controle de frequência e valores de tensão dentro dos limites de operação. A ressalva fica a cargo da *Barra 850* que se encontra logo após o regulador de tensão, apresentando uma levíssima superação do limite superior de tensão, 0,1%.

A análise das perdas de potência ativa do sistema é descrita pela Figura 3.10.

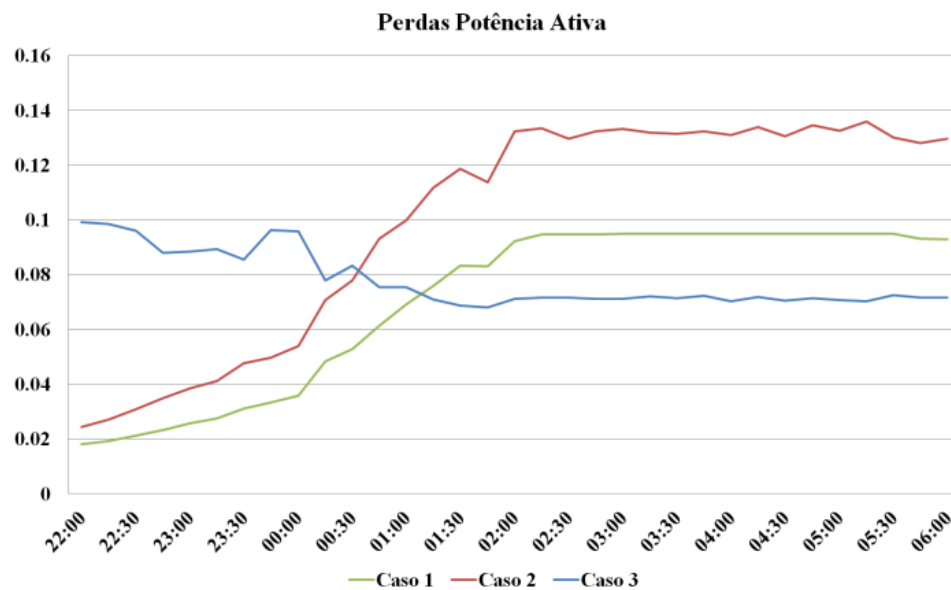


Figura 3.10: Perdas de potência ativa do sistema para os três cenários

Verifica-se que o maior grau de perda está associado ao *Cenário 2*, à vista que o mesmo possui os maiores valores de tensão para o sistema devido ao excesso de GD não despachável.

A análise de perdas sob a perspectiva de energia é apresentada na Figura 3.11.

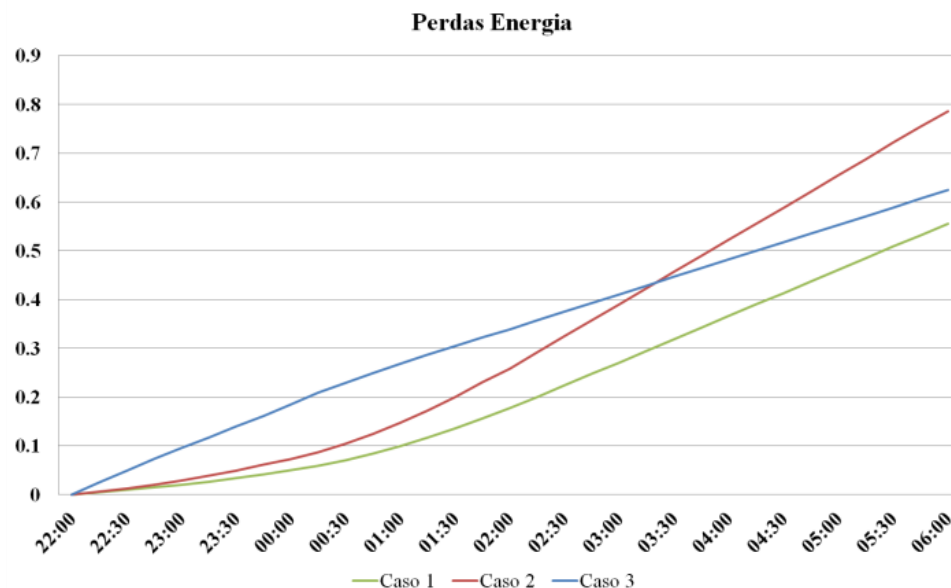


Figura 3.11: Perdas de sobre a perspectiva de energia para os três cenários

Essa análise executa a integração das perdas de potência ativa ao longo do tempo para cada cenário simulado. Inicialmente relaciona-se ao *Cenário 3* o maior nível de perdas ocasionado pelo processo de carregamento de VEHs. Entretanto, ao decorrer da noite a diminuição da demanda do sistema leva o *Cenário 2* a excesso de geração, fazendo com que o mesmo supere os níveis de perda do *Cenário 3* e apresente a maior perda global.

3.1.4 Conclusões Parciais

O algoritmo proposto permite a variação de frequência e tensão nas fontes de geração. A ideia foi testada para o sistema IEEE 34 barras considerando a inserção de unidades GDs despacháveis e não despacháveis e VEHs em processo de carregamento.

Para validação e constatação da potencialidade da metodologia proposta, três distintos cenários de geração com cargas desequilibradas foram executados. O comportamento do sistema foi avaliado ao longo de um período noturno, de modo que as intermitências das fontes renováveis não despacháveis fossem testadas.

Os resultados obtidos permitem a aplicação da metodologia proposta a qualquer sistema de distribuição sem as limitações de convergência apresentadas por técnicas baseadas em Newton-Raphson.

3.1.5 Publicações

Esta seção gerou a publicação:

Rodrigues, Y. R.; Souza, M. F. Z.; Zambroni De Souza, Antonio Carlos; Lopes, B. I. L., “Unbalanced Load Flow for Microgrids Considering Droop Method”, *IEEE PES General Meeting*, Boston, 2016.

3.2 Controle Secundário de Frequência baseado em *Droop* Aplicado a Micro Redes

O controle secundário é responsável pela execução do controle de frequência do sistema elétrico após a ocorrência de um distúrbio. Este controle permite que colaboradores pré-definidos, uma pequena parcela dos geradores do sistema, ajustem seus parâmetros *droop*, a fim de manter a frequência da rede no nível de referência.

Para sua implementação, primeiramente um fluxo de potência trifásico desequilibrado considerando a participação de GD despacháveis e não despacháveis com metodologia de controle primário precisa ser considerado¹. Deste modo, viabilizando o despacho de geração distribuída e regulação de tensão e frequência do sistema ilhado.

Posteriormente diferentes configurações de geração são propostas para a micro rede, sendo cada uma delas estressada até que o sistema atinja a fronteira do limite operacional de frequência, executando o registro do fator de carregamento máximo que o mesmo é capaz de suportar para cada configuração de geração.

Este teste permite identificar a influência que a participação de diferentes tipos de fontes de geração implica no controle de frequência da micro rede. Fornecendo a primeira contribuição desta metodologia.

Caso a autorregulação se torne um grande desafio e alguma espécie de controle secundário passe a ser mandatória, a segunda contribuição desta seção entra em ação, o método de controle de frequência baseado na demanda da micro rede.

A capacidade de controle é descrita na Figura 3.12.

¹ Esta metodologia esta descrita pela seção *Controle Primário Droop Aplicado a Micro Redes*

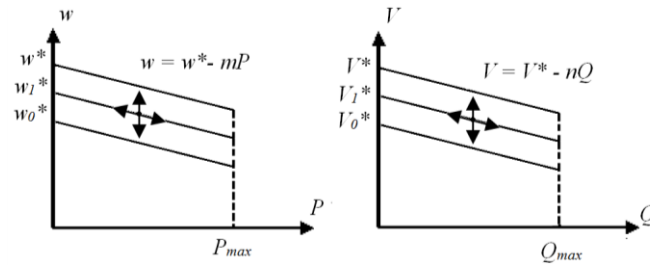


Figura 3.12: Método *droop* com controle primário e secundário

Além do movimento em 2 sentidos, deslizando para cima e para baixo nas curvas *droop* pré-definidas dos geradores, tal como descrito na Figura 5.2. O controle secundário proposto, demonstrado na Figura 3.12, permite a transição entre as diferentes curvas *droop* por meio de atualizações nos parâmetros ' m ' e ' n ' com base na demanda real ou prevista da micro rede. Esta característica permite atingir os níveis de referência do sistema, estressando a segunda contribuição e inovação desta seção.

Este processo é descrito pelo fluxograma apresentado na Figura 3.13.

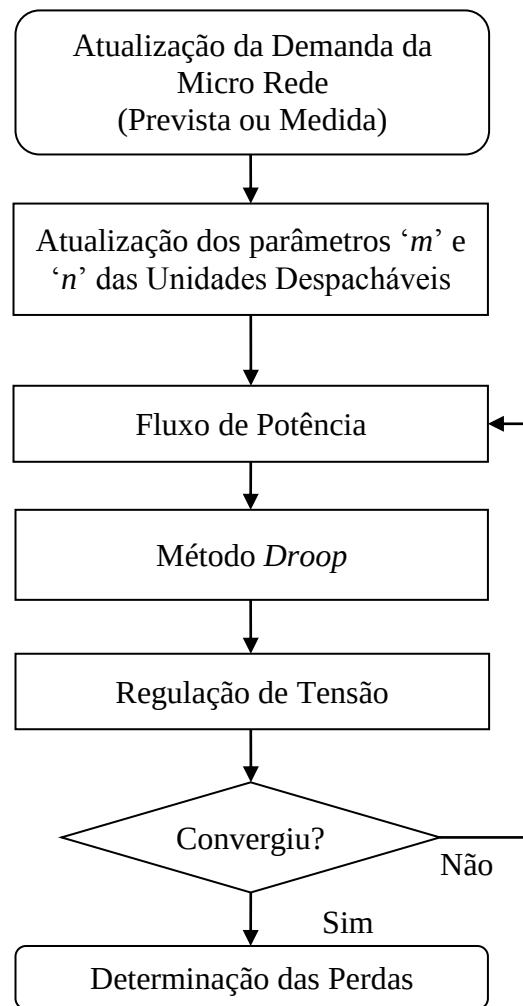


Figura 3.13: Fluxograma simplificado da metodologia proposta

Primeiramente a demanda da micro rede (medida ou prevista) é atualizada para execução do controle de frequência, o ajuste dos parâmetros ' m ' e ' n ' é efetuado e consequentemente as unidades GDs são redespachadas. O fluxo de potência é realizado e o método *droop* considerado. Na sequência, a regulação de tensão é fornecida pelos comutadores (LTC) e o erro calculado. Este processo é repetido até que seja obtida a convergência. Sendo posteriormente executado o cálculo das perdas do sistema e um novo ponto de operação analisado.

3.2.1 Validação da Metodologia Proposta

Para validação da metodologia de controle de frequência proposta, três configurações de geração para micro rede foram consideradas.

1. Apenas GD despachável;
2. Associação de GD despachável e GD não despachável com contribuição fixa;
3. Associação de GD despachável e GD Renovável não despachável com contribuição variável.

Os resultados estão divididos em duas seções. Primeiramente, uma micro rede dotada apenas de controle primário provido pela metodologia *droop* tradicional é submetida a três diferentes cenários de geração e estressada até que a fronteira dos limites operacionais de frequência para sistemas de distribuição seja atingida, variando entre 59,9 e 60,1 Hz. A segunda seção apresenta os resultados para as mesmas configurações de micro redes, no entanto considerando o método de controle de frequência proposto.

3.2.1.1 Sistema Teste

O sistema teste adotado é o sistema de distribuição trifásico desequilibrado IEEE 34 barras modificado similar ao utilizado para validação da metodologia de controle *droop* apresentado pela Figura 5.4. A particularidade para este estudo se restringe a modificação na configuração da geração, na qual as configurações com GDs não despacháveis podem ser representadas por uma geração de contribuição fixa ou geração de contribuição variável (quando considera a inserção de geração renovável).

O intervalo analisado é compreendido de 22:00h às 6:00h, estando o perfil de demanda de potência ativa e reativa por fase do sistema para o caso base apresentado na Figura 3.14.

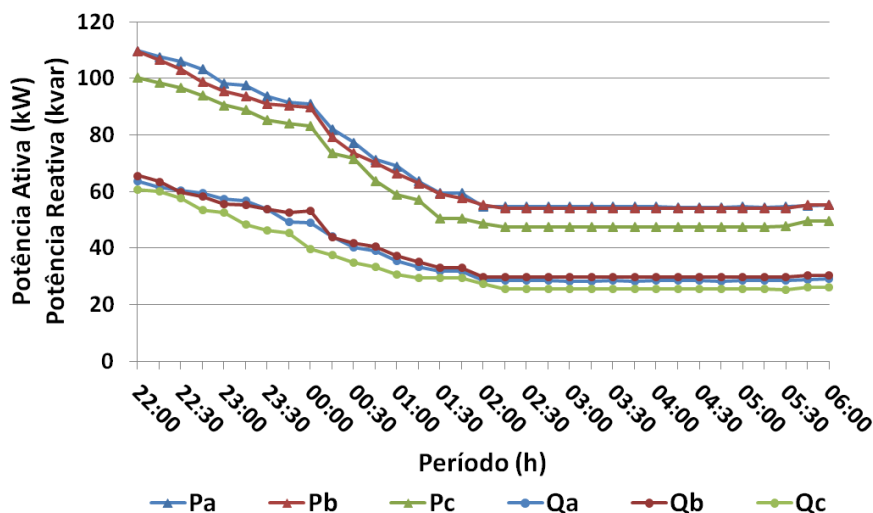


Figura 3.14: Perfil de demanda de potência ativa e reativa por fase da micro rede

3.2.1.2 Estudo de Casos

Este estudo visa a obtenção de informações sobre quando um controle secundário se torna obrigatório para a sobrevivência e atendimento dos limites operativos da micro rede. E apresenta os resultados da implementação da metodologia de controle de frequência proposta.

3.2.1.2.1 Controle Droop Tradicional

Dado que o perfil da demanda é compreendido de 22:00h às 6:00h, uma diminuição significativa da demanda é apresentada e um aumento de frequência é esperado.

Aplicando esses dados para a primeira configuração de micro rede considerando apenas GDs despacháveis, os limites de frequência do sistema foram preservados até um fator de carregamento, ' f_c ', de 8,6, o que significa que o sistema não ultrapassou os limites de frequência até um aumento de demanda equivalente a 8,6 vezes o cenário base, indicando uma grande capacidade de regulação de frequência.

Esta boa capacidade de atendimento a variações de demanda é possível de ser alcançada uma vez que a geração da micro rede é completamente despachável. A evolução da frequência da micro rede para este cenário é ilustrada pela Figura 3.15.

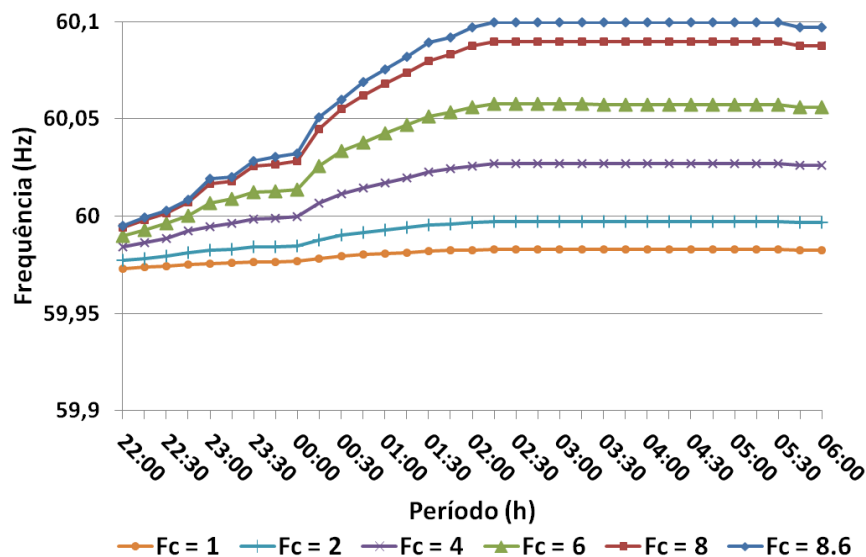


Figura 3.15: Evolução da frequência da micro rede considerando apenas as GDs despacháveis

A segunda configuração é uma associação de GDs despacháveis e não despacháveis com contribuição fixa, os resultados obtidos estão representados na Figura 3.16, sendo muito semelhantes aos apresentados para a primeira configuração. Este resultado se deve à capacidade de geração despachável que ainda se encontra disponível na micro rede e ao fato da demanda ser superior a contribuição da geração fixa.

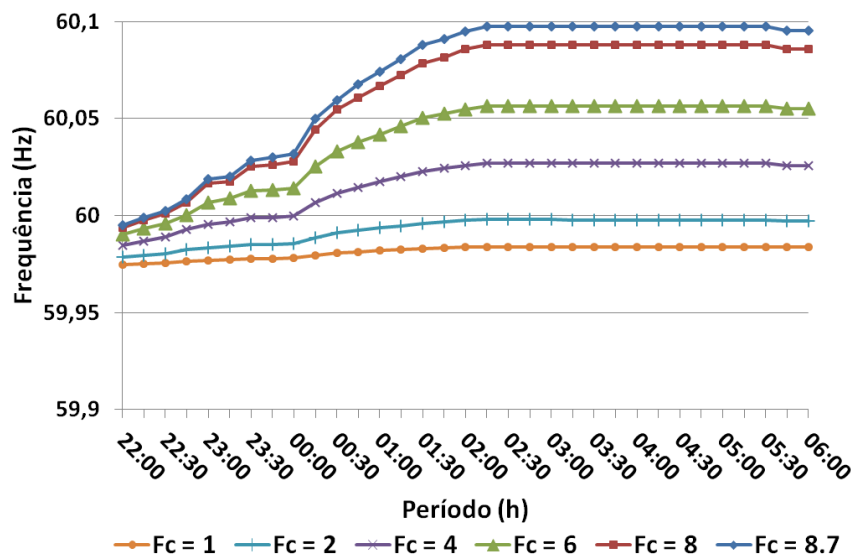


Figura 3.16: Evolução da frequência da micro rede considerando GDs despacháveis e não despacháveis fixas

A terceira configuração apresenta uma associação de GDs despacháveis e GDs renováveis não despacháveis com contribuição variável. Para este cenário, o fator de carregamento máximo que não viola os limites operacionais de frequência, $f_c = 6$, é menor do que os das configurações anteriores. Essa condição se deve a contribuição variável dos geradores renováveis, deste modo, quanto maior for a penetração de geração renovável, menor é a capacidade de controle de frequência da micro rede.

Os resultados referentes a esta configuração estão descritos pela Figura 3.17.

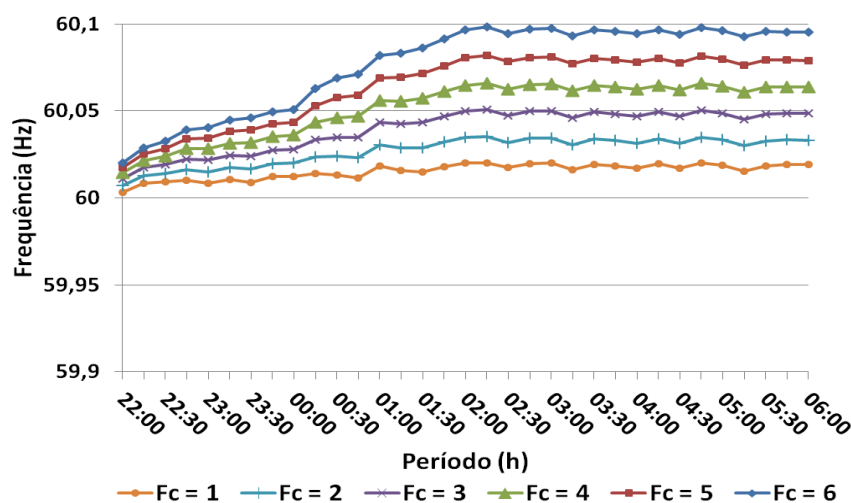


Figura 3.17: Evolução da frequência da micro rede considerando GDs despacháveis e não despacháveis variáveis

3.2.1.2.2 Controle de Frequência Proposto Baseado na Metodologia Droop

Como os resultados da seção anterior indicam, desvios significativos de frequência são confrontados quando micro redes ilhadas são submetidos a grandes variações de demanda, especialmente quando a penetração de geradores renováveis é considerada.

A metodologia de controle de frequência proposta com base no ajuste iterativo de parâmetros *droop* gera grandes resultados, quando uma previsão de demanda consistente do sistema está disponível ou quando a medição de demanda dos nós é fornecida.

Para apresentar a eficácia da metodologia, todas as diferentes configurações de geração da micro rede foram simuladas, estando os resultados descritos pelas Figura 3.18-Figura 3.20.

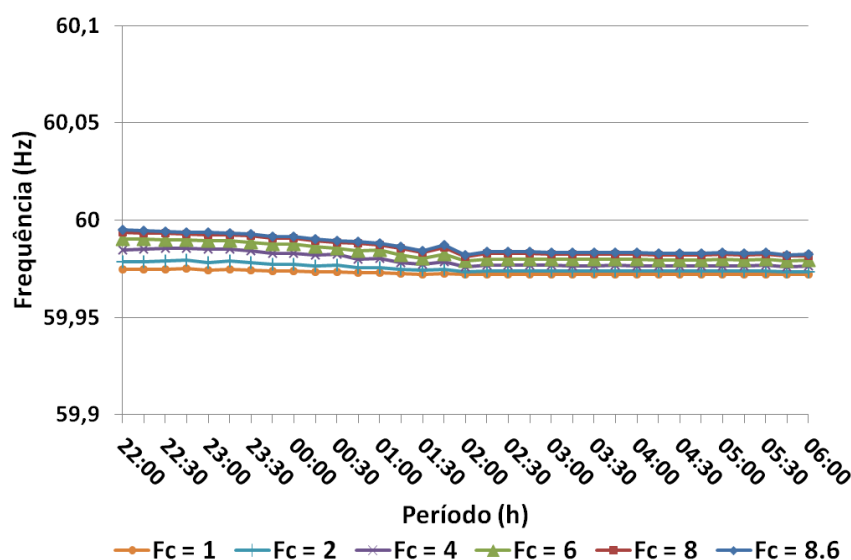


Figura 3.18: Evolução da frequência da micro rede considerando GDs despacháveis e controle de geração

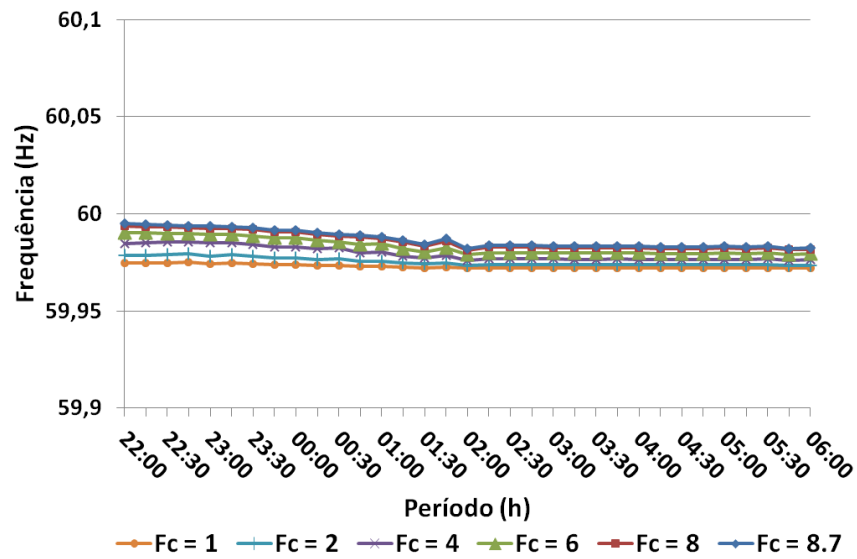


Figura 3.19: Evolução da frequência da micro rede considerando GDs despacháveis e não despacháveis com controle de geração

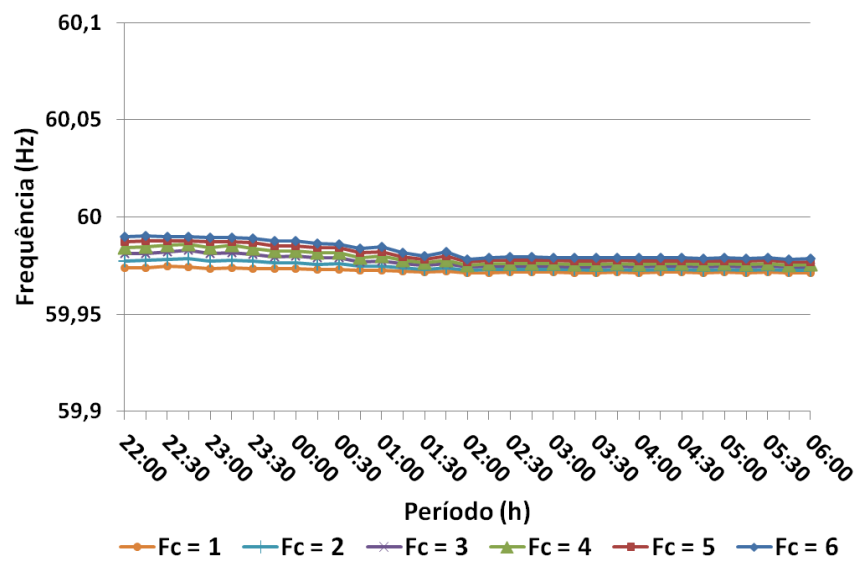


Figura 3.20: Evolução da frequência da micro rede considerando GDs despacháveis e GDs não despacháveis variáveis com controle de geração

Analisando os resultados é claramente observável que um comportamento de frequência semelhante para todas as configurações de geração da micro rede, e nenhuma variação significativa de frequência é produzida quando aumentados os fatores de carregamento.

Deve-se notar que a frequência da micro rede apresenta um ligeiro deslocamento do valor de referência de frequência. Este desvio é pertinente as perdas do sistema, de modo que o quão mais preciso for a estimativa de perdas do sistema, mais próxima ao valor de referência será a resposta.

3.2.2 Conclusões Parciais

Os resultados indicam que micro redes com significativa capacidade de geração despachável são capazes da realização de um controle de frequência satisfatório, mesmo para grandes variações de demanda. No entanto, quando a penetração de fontes variáveis como geradores renováveis são considerados, o nível de controle da micro rede é diminuído e algum tipo de controle secundário pode ser necessário. Nesta perspectiva, os resultados apresentam o método de controle de frequência baseado na demanda nodal de micro redes como um candidato viável, dado seu desempenho satisfatório perante as distintas configurações de geração consideradas para a micro rede, sua fácil implementação e baixo custo associado.

3.2.3 Publicações

Esta seção gerou a publicação:

Rodrigues, Y. R.; Souza, M. F. Z.; Zambroni De Souza, A. C., “Considerations on islanded microgrid frequency control capability within different generation configurations”, *12th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, Curitiba, 2016.

4. Operação, Controle e Carregamento de Veículos Elétricos e Híbridos

Os veículos elétricos são automóveis que a partir de um motor elétrico associado a um conjunto de baterias produzem tração distribuída através de um eixo de transmissão para a provisão de deslocamento. Além do recarregamento das baterias por meio de fontes externas, podem ter associado sistemas de frenagem regenerativa, consistindo em o motor atuando como gerador para fornecimento de energia para as baterias durante a execução da frenagem [18].

De acordo com o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), um veículo híbrido elétrico recarregável é aquele que possui capacidade de percorrer 16,1 km de distância em modo totalmente elétrico, possui um sistema de armazenamento de energia com capacidade mínima de 4 kWh e meios para execução da recarga das baterias a partir de uma fonte de eletricidade externa [47].

Os veículos híbridos são modelos que possuem um motor elétrico e um motor a combustão operando associado a um maior conjunto de baterias. Com maior eficiência que os modelos convencionais, devido ao conjunto motor de combustão - elétrico, reduz o consumo e fornece maior torque em baixas velocidades, diminuindo os níveis de emissão de gases de efeito estufa e ruídos [48].

Como arquiteturas para transmissão de tração, existe a transmissão executado pelos dois motores em conjunto a partir de um eixo de transmissão único, ou apenas pelo motor elétrico com o motor de combustão recarregando o sistema de baterias, que também pode ser recarregado por meio de carregadores externos no caso dos modelos recarregáveis [18].

Deste modo, veículos elétricos e híbridos recarregáveis podem funcionar não apenas como cargas passivas, mas como elementos ativos no sistema elétrico fornecendo energia para a rede caso possuam a capacidade de reversão do fluxo, trabalhando no esquema conhecido como *vehicle-to-grid* (V2G). Essa configuração possibilita inúmeras aplicações ao sistema de distribuição de energia, como por

exemplo, participação em mercados de serviços ancilares [49], aumento do tempo de sobrevivência de micro redes em operações críticas e até mesmo ações de regulação. Sendo os dois últimos tópicos tratados neste trabalho.

Dado o interesse particular deste trabalho no recarregamento e operação V2G de veículos elétricos e híbridos (VEH), a seguir um detalhamento do sistema de armazenamento de energia e de modos de operação V2G são apresentados.

- Sistema de Armazenamento de Energia

É esperado dos sistemas de armazenamento de energia em veículos elétricos e híbridos recarregáveis um gerenciamento eficiente de carga, bom desempenho em estado parcial de carregamento, características térmicas, peso e volume compatíveis para uso em automóveis e expectativa de vida útil de aproximadamente 240.000 km ou de 10 anos, sendo capazes de serem submetidos a regimes de operação com constantes cargas e descargas e altas correntes de operação [50]-[51]. Para atender a esses requisitos de maneira confiável e robusta, o sistema de armazenamento de VEHs é operado próximo a um estado de meia carga, 50 %, assim caso uma corrente de carga ou de descarga mais acentuada ocorra, previne-se o risco de sobrecarga ou descarga profunda. Este fato leva a um dimensionado com capacidade nominal duas vezes maior do que a capacidade útil do conjunto de baterias, resultando em maior custo e espaço interno necessário para acondicionamento do conjunto de baterias [50].

Outra característica importante é a escolha do nível de carga de operação do sistema de armazenamento. Esta decisão deve se basear nas características de corrente de carga e descarga da bateria utilizada, sendo extremamente importante para a determinação do tempo de recarregamento do veículo, tal como de sua capacidade de fornecimento de potência instantânea para a rede quando em modo de operação V2G. Estando estes fatores não somente relacionados as características das baterias, mas diretamente dependentes do tipo de carregador ao qual a unidade VEH se encontra conectada. Nesta perspectiva, caso a corrente de descarga seja maior que a corrente de carga, o nível de carga escolhido deve ser inferior a 50% à vista da diferença entre tais

correntes, caso o contrário se aplique, um estado de carregamento (SOC) superior a 50% deve ser adotado [50].

- Vehicle-to-Grid

A metodologia *vehicle-to-grid* (V2G) permite aos VEH auxiliar o sistema em atividades de regulação de tensão e frequência, fornecendo uma reserva operativa de curto prazo e gerenciamento de carga pelo lado da demanda. Quando adotados em larga escala, ações para redução de desperdício de geração, como absorção do excesso da energia gerada por fontes renováveis durante períodos de baixa demanda, problema crescente com a inserção de fontes renováveis no setor elétrico, e redespacho dessa energia em momentos de pico de demanda, *peak shaving*, podem ser aplicadas evitando a contratação de geradores de alto custo [18].

Para que estas ações possam ser executadas alguns critérios precisam ser respeitados como: atendimento a norma IEEE 1547 que apresenta os requisitos para interconexão de dispositivos ao sistema, uma vez que os VEHs podem ser considerados fontes de geração distribuída, possuir uma conexão entre VEH-Sistema que permita o fluxo de energia em ambas as direções, meios para comunicação com o operador da rede, controles e medidores embarcados para gerenciamento do estado de carga das baterias e energia despachada [19].

A referência [20] propõem dois modelos de comunicação entre veículos elétricos e o operador do sistema de distribuição (OSD). O primeiro modelo é definido por uma arquitetura determinística na qual existe uma linha de comunicação direta entre cada veículo e o operador. Apesar de simples, esta arquitetura possui problemas relacionados a sua viabilidade econômica e dimensionamento a longo prazo, a vista que o número crescente de VEHs exigirá o desenvolvimento de uma infraestrutura inexistente de comunicação.

A segunda arquitetura propõe a adoção de agentes intermediários dentro do mercado, estes agentes nomeados agregadores, receberiam os sinais diretamente do operador e, com base nessa informação gerenciariam o despacho dos VEHs, facilitando a compensação econômica dos investidores dado que a infraestrutura de comunicação

necessária entre OSD e agregador é similar ao modelo já existente. Além de facilitar o gerenciamento da comunicação quando comparada ao outro modelo.

A partir de um canal de comunicação entre Operador-VEH que permita a aquisição e envio de informação, independentemente da topologia e/ou modo de transmissão de dados, e da consideração de fatores limitantes do uso da energia armazenada nos automóveis como capacidade de condução dos circuitos aos quais os veículos estão conectados, quantidade de energia armazenada nas baterias e potência nominal do inversor interligado a unidade VEH [49], [19], ações de controle podem ser tomadas de modo a definir o despacho adequado dos VEHs para o auxílio do sistema elétrico.

As arquiteturas propostas são apresentadas nas Figura 4.1 ‘a’ e ‘b’.

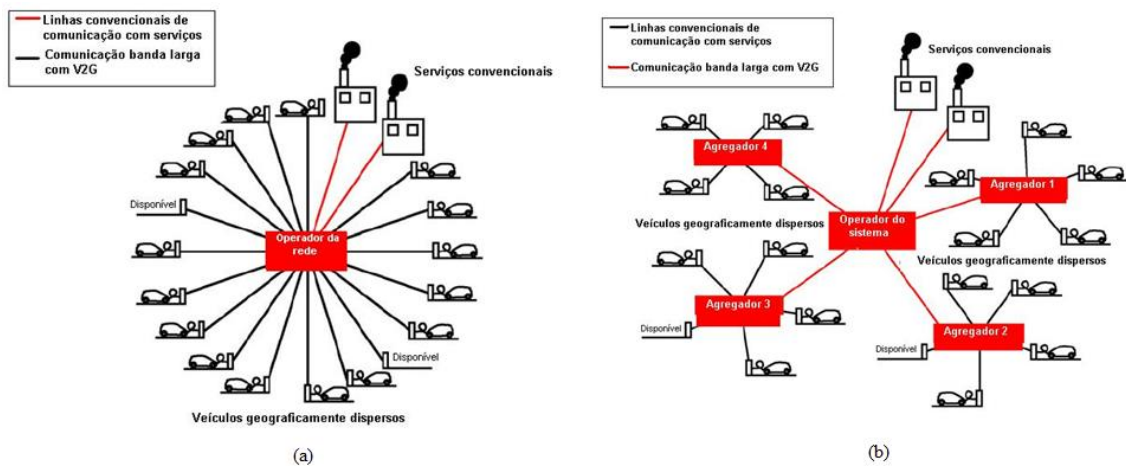


Figura 4.1: Arquitetura de comunicação entre operador do sistema de distribuição e veículos elétricos [20], (a) por conexão individual, (b) por agentes intermediários

4.1 Processo de Carregamento VEHs

A evolução tecnológica do setor de veículos elétricos associada a políticas governamentais como as da Alemanha, Noruega, Holanda e Índia que vem a estipular limites de emissões de carbono e estudam a possibilidade da implementação de prazos para o encerramento da venda de veículos movidos a combustíveis fósseis [15], associada a significativos subsídios e incentivos da ordem de 1,2 bilhões de euros para o desenvolvimento do setor, induzirão a atualização da frota de veículos na direção dos não poluentes [16] acelerando o processo de inserção de VEHs em larga escala no sistema elétrico.

Nesta perspectiva, a consideração da participação de veículos elétricos e híbridos no contexto de micro redes é essencial para garantia da pertinência deste trabalho em um futuro de médio a longo prazo.

Apesar do apelo ambiental proporcionado pela substituição da frota por veículos elétricos, os mesmos não apresentam apenas soluções, introduzindo novos desafios ao sistema elétrico, principalmente ao nível de distribuição, que precisam ser considerados para que a inserção desse novo tipo de carga ocorra de maneira harmoniosa, respeitando os critérios técnicos operativos e de qualidade de energia do sistema.

Dentre as possíveis ocorrências relacionadas a uma significativa penetração de veículos elétricos pode-se destacar violações de limites de tensão, térmicos (transformadores e condutores), aumento de distorção harmônica no sistema devido aos conversores dos carregadores, aumento das correntes de falta e perdas elétricas.

A vista das possíveis ocorrências e interessados em uma solução prática e simplificada que garanta condições operativas satisfatórias em harmonia com as limitações técnicas do sistema, uma política de carregamento baseada na disponibilidade de potência dos barramentos é proposta.

Para contrastar a necessidade de controle do processo de carregamento, um exemplo de processo de carregamento não controlado de VEHs é apresentado.

4.1.1 Carregamento Não Controlado de VEHs

No processo de carregamento não controlado os veículos são carregados a plena potência do momento da conexão até a desconexão. Diversas referências indicam que o carregamento não controlado de VEHs em sistemas de distribuição acarreta em violações de limites técnicos do sistema e aumento significativo das perdas [56]-[17].

Essa situação pode ser observada pela Figura 4.2, na qual os limites de tensão são severamente violados para o sistema IEEE 34 barras considerando o carregamento de 445 veículos durante o período noturno.

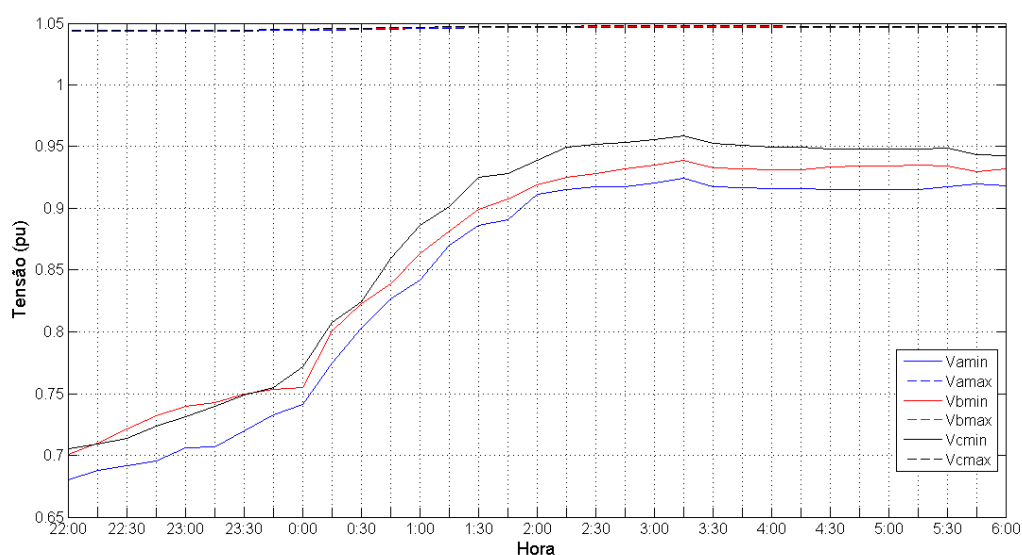


Figura 4.2: Tensões no sistema durante a carregamento não controlada [17]

Os resultados apresentam as tensões máximas e mínimas do sistema para cada intervalo de amostragem, podendo ser observado que a violação dos limites inferiores de tensão se mantém até o período no qual há um alívio significativo da carga base do sistema. Contudo, nem mesmo para o sistema em estado leve de carregamento as tensões se encontram próximo a referência.

4.1.2 Carregamento Controlado de VEHs

A metodologia proposta tem como conceitos fundamentais a funcionalidade e simplicidade de implementação em acompanhamento das tendências de evolução do setor elétrico, visando o respeito aos critérios técnicos e garantia de condições operativas em aderência com os limites operativos.

Para tanto, considera-se a existência de dispositivos inteligentes, como medidores ou controladores embarcados nos veículos ou carregadores, e meios de comunicação nos quais o operador da rede, ou um sistema dedicado de controle de VEHs, possa comunicar-se individualmente com cada VEH e controlar sua potência de carregamento, seja por tempo de conexão ou ajuste dos carregadores.

Caso a integração da comunicação não evolua significativamente, esta metodologia também é possível de implementação local, na qual um controlador com conhecimento da disponibilidade de potência do barramento de interesse executa as ações de controle localmente.

Apresentadas as considerações fundamentais, observa-se uma proposta com versatilidade nos requisitos de comunicação, baseada no respeito aos limites técnicos do sistema a partir do conceito de disponibilidade de potência dos barramentos.

A disponibilidade de potência dos barramentos consiste no incremento máximo de demanda ao barramento que mantém garantida a operação dentro dos requisitos operacionais e técnicos do sistema. Destacando-se os limites de condução do ramal, térmico e de tensão. Assim, um aumento progressivo da demanda dos barramentos é executado até a ocorrência do rompimento de um dos critérios. O barramento que rompeu o limite tem sua disponibilidade de potência determinada, enquanto o processo continua para os outros barramentos até que todos tenham desrespeitado algum dos limites. Podendo serem adicionados fatores de segurança a critério do operador do sistema as disponibilidades de potência dos barramentos.

Conhecendo a disponibilidade de potência dos barramentos, o processo de carregamento pode ser executado. O processo de carregamento é descrito pelo fluxograma ilustrado pela Figura 4.3.

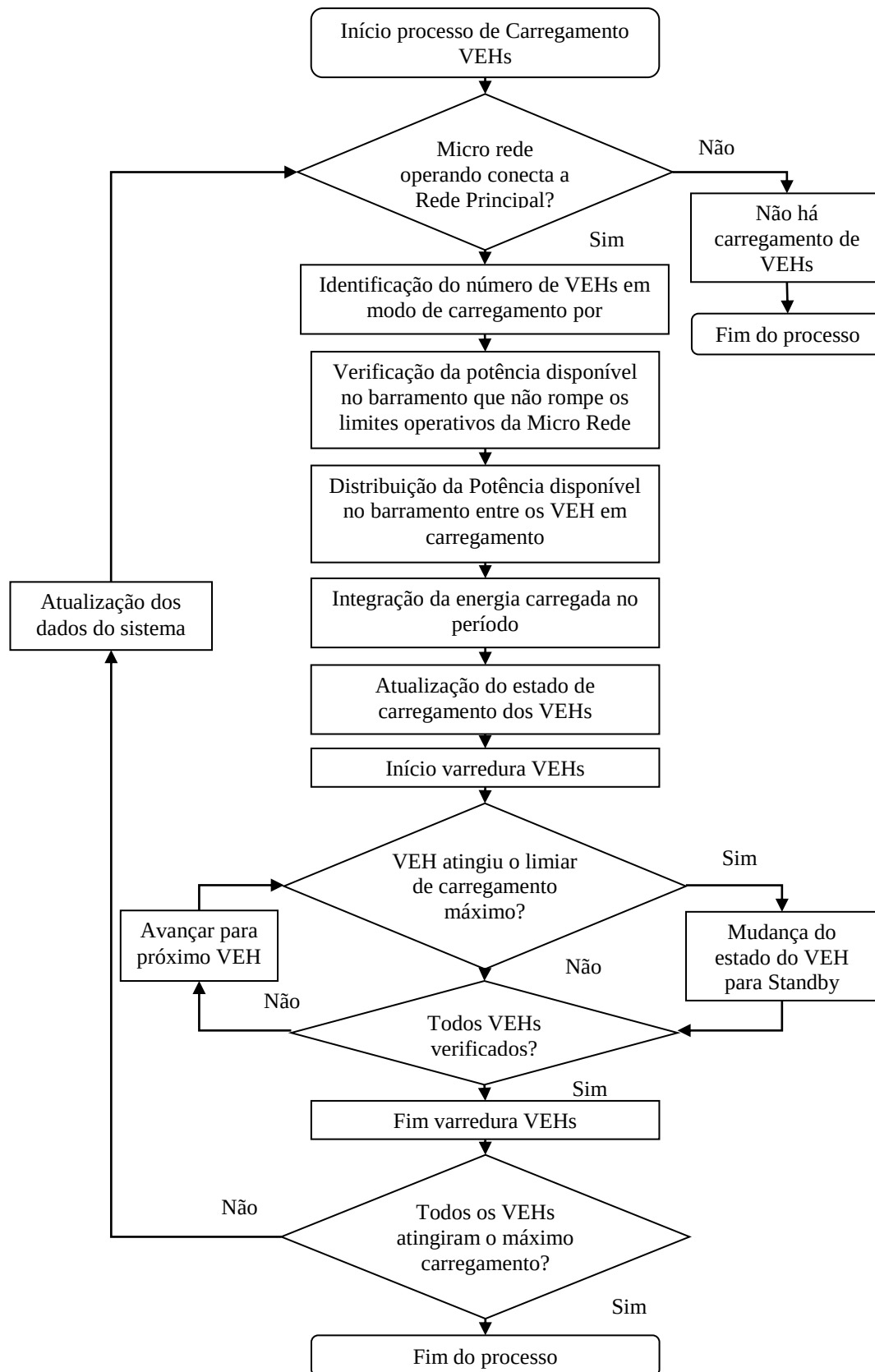


Figura 4.3: Fluxograma do processo de carregamento dos VEHs

Primeiramente, a condição fundamental para a execução do processo de recarregamento, é verificado se a micro rede está conectada à rede principal. Estando em modo de operação conectado à rede principal, o número de VEHs em modo de carregamento por barramento é determinado. Em seguida, verifica-se a máxima potência disponível em cada barramento que não viola os limites operativos da micro rede, sendo este o valor da potência distribuída entre os veículos em carregamento. Em seguida integra-se a energia que cada VEH armazenou no período de integração atualizando seu estado de carregamento. Posteriormente, executa-se uma varredura verificando quais VEHs completaram o processo de carregamento e os transfere para o modo *Standby*. Caso todos os veículos estejam completamente carregados o processo é finalizado, caso contrário os dados do sistema são atualizados e o processo é repetido.

Deste modo, um processo de carregamento controlado é desenvolvido no qual apenas se necessita do conhecimento dos limites técnicos do sistema para determinação da máxima potência de carregamento de cada barramento e, por conseguinte, definição das potências de carregamento para cada unidade VEH.

4.2 Operação de Veículos Elétricos como Unidades Armazenadoras de Energia Despacháveis

Além dos critérios ambientais altamente favoráveis associados a utilização de veículos elétricos. Um fator muito positivo de sua inserção, em escalas significativas, é a capacidade de auxílio em diversos níveis do sistema obtida a partir da flexibilização do processo de carregamento e habilitação do uso da energia armazenada nos VEHs.

Caso exista uma infraestrutura na qual os proprietários, desde que dispostos, possam habilitar o despacho da energia armazenada em seu veículo mediante uma compensação financeira por parte do agente operador do sistema, diversas possibilidades de auxílio a micro rede podem ser atingidas.

Deste modo, por meio da aplicação do conceito *vehicle-to-grid* tais veículos deixam de serem considerados cargas e se tornam unidades armazenadoras de energia despacháveis distribuídas por todo o sistema, que podem auxiliar a rede elétrica em situações de emergência, tal como em regulações operativas de curto prazo.

Associada a infraestrutura física de instalação, comunicação e de mercado (para fins compensatórios), uma metodologia para identificação de situações de emergência nas quais o despacho de VEHs pode auxiliar a sobrevivência do sistema, ainda que de maneira parcial, precisa ser desenvolvida.

Nesta perspectiva, uma metodologia visando o despacho de VEHs de maneira coordenada aos critérios técnicos e limitações do sistema, atendendo aos requisitos de sobrevivência da micro rede e condições limitantes impostas pelos proprietários para despacho das unidades VEHs é proposta e apresentada ao longo desta seção.

4.2.1 Metodologia para Implementação

Visando a generalização da metodologia proposta para execução do despacho de unidades VEHs operando em modo de armazenadores de energia, restrições técnicas impostas pelo sistema e pelos proprietários das unidades VEHs são consideradas.

Para essa operação algumas características precisam estar disponibilizadas, sendo fundamentais: a capacidade de fornecimento de potência à rede pelo conjunto VEH-Carregador, a existência de dispositivos inteligentes capazes de executar ações de medição, controle, processamento e comunicação nos veículos e/ou carregadores, e meios de comunicação nos quais o operador da rede, ou um sistema dedicado de controle de VEHs, possa comunicar-se individualmente com cada conjunto VEH-Carregador e controlar sua potência de despacho, seja por meio de chaveamento baseado no tempo de conexão da unidade VEH à rede ou pelo ajuste da potência dos carregadores.

Considera-se ainda que existirá um dispositivo associado ao conjunto VEH-Carregador através do qual o proprietário poderá escolher participar ou não da política de auxílio a rede e, em caso afirmativo, impor algumas condições limitantes. Tal como limiar inferior de carga, indicando que ele aceita participar da política de auxílio ao sistema desde que seu veículo mantenha um nível de carga mínimo que atenderá suas necessidades.

O processo de operação de veículos elétricos como unidades armazenadoras de energia despacháveis é detalhado pelo fluxograma apresentado pela Figura 4.4.

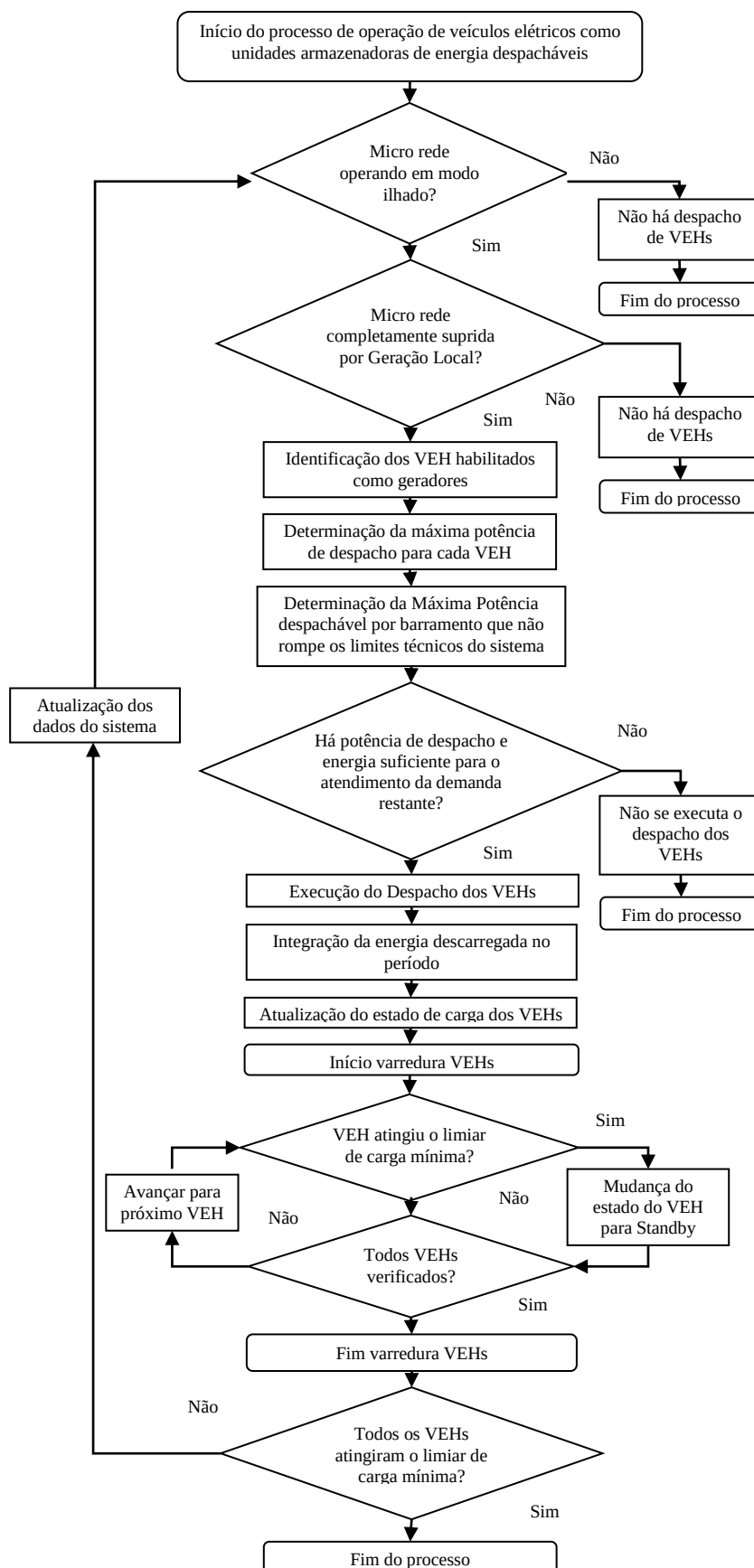


Figura 4.4: Fluxograma do processo de operação de veículos elétricos como unidades armazenadoras de energia despacháveis

O início do processo de operação de veículos elétricos como unidades armazenadoras de energia despacháveis ocorre com a identificação de ilhamento da micro rede ao sistema principal.

Deste modo, caso seja verificado que a demanda da micro rede consegue ser completamente suprida pela geração local, não há necessidade de despacho dos VEHs, finalizando assim o processo. Entretanto, na ocorrência da não possibilidade de suprimento de modo pleno à demanda pela geração local, os seguintes passos do processo de despacho das unidades VEHs são executados, sendo eles:

- Identificação do número de VEHs habilitados para operação como unidades geradoras;
- Determinação da máxima potência de despacho para cada VEH;
- Determinação da máxima potência despachável por barramento que não rompe os limites técnicos do sistema.

4.2.1.1 *Máxima Potência Despachável de cada unidade VEH*

A máxima potência de despacho de cada VEH é definida pelos parâmetros técnicos do conjunto VEH-Carregador (capacidade de armazenamento de energia na bateria e máxima potência de descarregamento), seu estado de carga e o limite de descarregamento máximo permitido pelo proprietário. Caso a energia disponível associada, ou o período de integração considerado, permita um despacho de potência superior a máxima potência de descarregamento, a máxima potência de descarregamento é adotada como máxima potência de despacho do VEH. Esse processo é descrito pelo fluxograma apresentado na Figura 4.5.

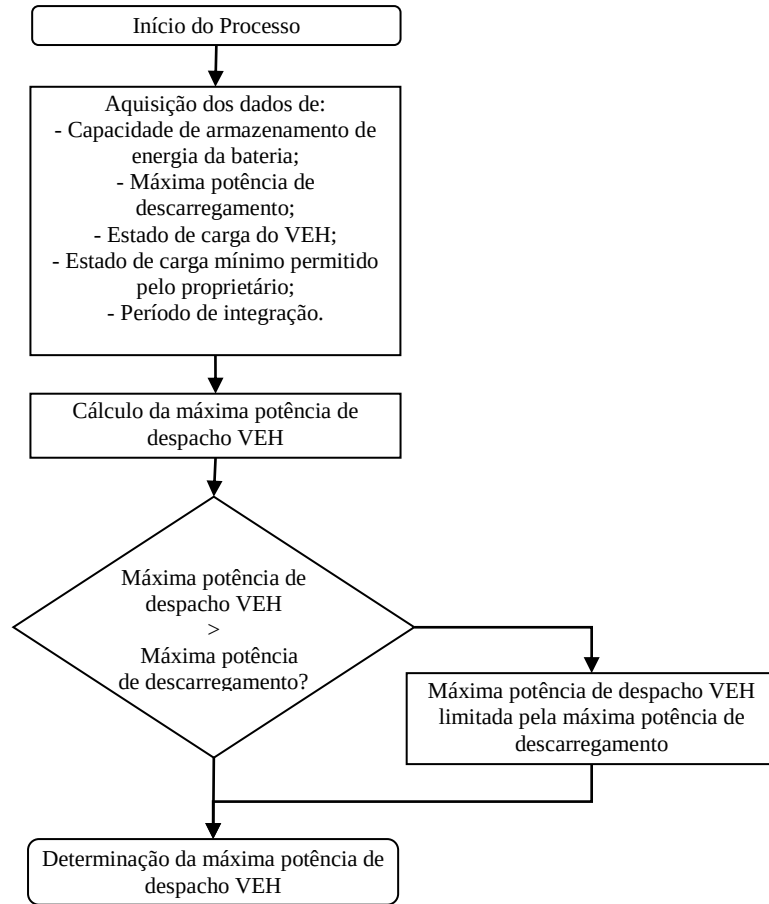


Figura 4.5: Determinação da máxima potência de despacho do VEH

O cálculo da máxima potência de despacho do VEH é desenvolvido pela seguinte formulação.

$$PD_{VEH}^{max} = \frac{(SOC - SOC_{min}) \cdot CAE_{Bateria}}{T_{INT}} \quad (8.1)$$

Em que:

PD_{VEH}^{max} : Máxima potência de despacho VEH;

SOC : Estado de carga VEH;

SOC_{min} : Estado de carga VEH mínimo permitido pelo proprietário;

$CAE_{Bateria}$: Capacidade de armazenamento de energia da bateria;

T_{INT} : Período de integração.

4.2.1.2 Máxima Potência Despachável por Barramento

A máxima potência despachável por barramento depende dos limites de condução (térmicos) de transformadores e condutores. Caso a máxima potência disponível para despacho do barramento seja inferior a máxima potência possível de despacho do barramento (limites técnicos), a mesma é adotada como máxima potência despachável do barramento, caso contrário a máxima potência despachável do barramento é a máxima potência que não rompe os limites técnicos do sistema. Este processo é ilustrado pela Figura 4.6.

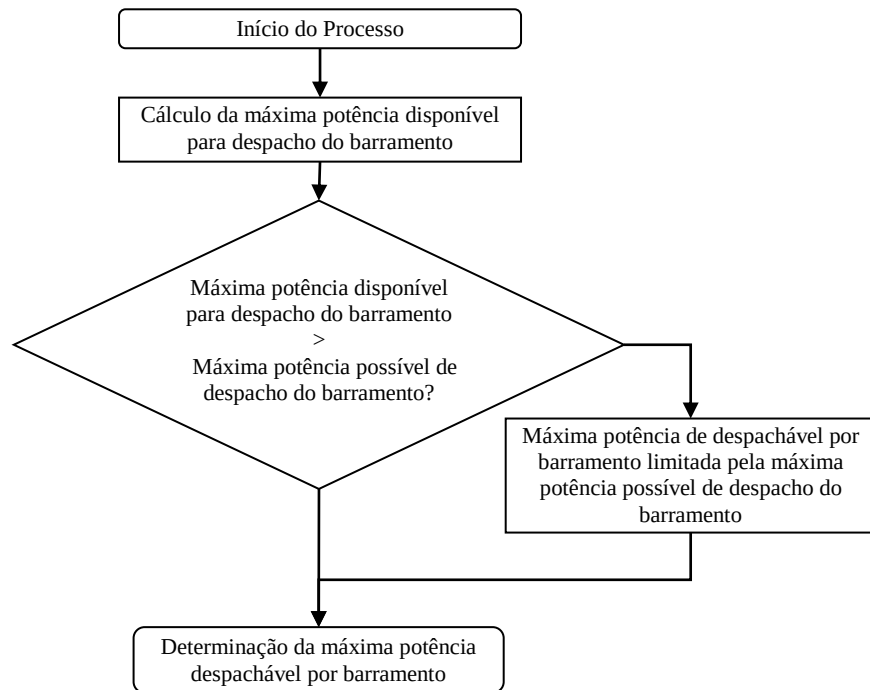


Figura 4.6: Determinação da máxima potência despachável por barramento

O cálculo da máxima potência disponível para despacho do barramento é desenvolvido pela seguinte formulação.

$$PD_{\text{disponível Barramento}}^{\text{max}} = \sum_{k=1}^N PD_{VEH}^{\text{max}}(k) \quad (8.2)$$

Em que:

$PD_{\substack{\text{max} \\ \text{disponível} \\ \text{Barramento}}}$: Máxima potência disponível para despacho do barramento

N : Número total de VEHs conectados ao barramento;

k : Posição do VEH.

Completada a execução desses passos, verifica-se se há potência de despacho e energia suficiente para o atendimento à demanda restante. A demanda restante é definida como a diferença entre a demanda da micro rede menos a parcela de demanda suprida pela geração local. É importante ressaltar que a demanda da micro rede pode variar em função da política de priorização de cargas executada pela metodologia proposta no capítulo “Política de gerenciamento de demanda para Micro Redes em Situação de Ilhamento baseada em Grupos de Prioridade e Período Funcional de Operação”.

$$PD_{Restante} = PD_{Sistema} - PD_{\substack{\text{Suprida} \\ \text{Geração Local}}} \quad (8.3)$$

Em que:

$PD_{Restante}$: Potência referente a demanda restante;

$PD_{Sistema}$: Potência referente a demanda da micro rede;

$PD_{\substack{\text{Suprida} \\ \text{Geração Local}}}$: Parcela da potência referente a demanda da micro rede suprida por geração local;

4.2.1.3 Máxima Potência Despachável pelos VEHs para o Sistema

Deste modo, determinada a potência da demanda que falta ser suprida é verificado se a mesma é inferior a máxima potência despachável pelos VEHs para o sistema, sendo está definida pela soma das máximas potências despacháveis por barramento. Caso esta condição seja satisfeita, é verificado se os VEHs possuem energia

suficiente para o suprimento desta demanda durante o período de integração. Atendido este requisito dá-se prosseguimento ao processo de despacho, caso contrário, não há possibilidade de despacho dos VEHs, finalizando o processo. A seguir é apresentada a máxima potência despachável pelos VEHs para o sistema.

$$PD_{max} = \sum_{k=1}^N PD_{Barramento}^{max}(k) \quad (8.4)$$

Em que:

PD_{max} : Máxima potência despachável pelos VEHs para o sistema;

$PD_{Barramento}^{max}$: Máxima potência despachável por barramento;

N : Número total de barramentos do sistema;

k : Posição do barramento.

4.2.1.4 Parcela da Contribuição de cada VEH

Assim, respeitados os requisitos necessários de potência e energia para atendimento a demanda, o processo de despacho dos VEHs é executado. A parcela da contribuição de cada VEH é obtida pelo percentual correspondente a unidade VEH relativo a máxima potência disponível de despacho no barramento, multiplicado pela máxima potência de despacho do barramento e pelo percentual utilizado da máxima potência despachável pelos VEHs para o sistema;

$$PD_{VEH} = PD_{VEH}^{max} \cdot \frac{PD_{Restante}}{PD_{max}} \cdot \frac{PD_{Barramento}^{max}}{PD_{disponível}^{max} \text{ Barramento}} \quad (8.5)$$

$$PD_{VEH} = \frac{PD_{VEH}^{max}}{PD_{disponível}^{max} \text{ Barramento}} \cdot PD_{Barramento}^{max} \cdot \frac{PD_{Restante}}{PD_{max}} \quad (8.6)$$

Em que:

PD_{VEH} : Potência despachada por cada VEH;

$\frac{PD_{max}^{VEH}}{PD_{max}^{disponível Barramento}}$: Percentual da máxima potência disponível de despacho no barramento correspondente a unidade VEH;

$\frac{PD_{Restante}}{PD_{max}}$: Percentual utilizado da máxima potência despachável pelos VEHs para o sistema.

Executado o procedimento de despacho, a energia descarregada durante o período de integração é computada e os estados de carga dos VEHs atualizados.

Após a atualização dos estados de carga dos VEHs, um processo de varredura é aplicado verificando quais veículos atingiram o limiar de carga mínima permitida pelo proprietário, sendo executada a mudança para o estado *Standby* dos que o atingiram.

Finalizado o processo de varredura, caso todos os veículos venham a atingir o limiar de carga mínima, o processo é finalizado. Caso contrário os dados do sistema são atualizados e o processo reexecutado.

5. Dispositivo Inteligente para Controle, Medição, Processamento, Atuação e Comunicação do Conjunto VEH-Carregador com Agente Operador do Sistema

Haja vista a necessidade de comunicação entre as unidades VEH e o agente operador do sistema, responsável pela regulação do processo de carregamento e operação de veículos elétricos como unidades armazenadoras de energia despacháveis, uma modelagem de dispositivo inteligente é proposta.

Esta modelagem é capaz de executar ações de controle, medição, processamento, atuação e comunicação considerando ambas as políticas, carregamento e despacho, e possibilitando ao usuário a inserção de maneira amigável dos parâmetros do conjunto VEH-Carregador, ajuste do nível de carregamento pretendido, determinação da participação, ou não participação, na política de auxílio a rede respeitando os limites relativos as unidades VEH, entre outras funcionalidades.

Esse dispositivo vem a complementar o conjunto VEH-Carregador fornecendo a infraestrutura necessária para habilitação dos processos de carregamento controlado e despacho das unidades VEHs. O fluxograma dos processos embarcados no dispositivo inteligente é apresentado pelas Figura 9.1- Figura 9.3.

5.1 Processo de Parametrização do Dispositivo Inteligente

Esse processo consiste na inserção dos dados necessários para a execução das ações de carregamento controlado e operação de veículos elétricos como unidades armazenadoras de energia despacháveis.

O processo de parametrização do dispositivo inteligente deve ser executado pelo usuário, e os seguintes parâmetros devem ser fornecidos. Inserção do modelo do VEH e carregador associado, por meio de seleção no banco de dados disponibilizado ou inserção manual de novos dispositivos.

Para a inserção manual de novo Carregador, deve-se:

- Cadastrar o nome/modelo do dispositivo;
- Inserir máxima potência de carregamento;
- Carregador possui capacidade de fornecimento de energia ao sistema? Sim/Não;
- Caso positivo, inserir máxima potência de despacho.

Para inserção de novo VEH basta:

- Cadastro do nome/modelo;
- Inserção da capacidade de armazenamento de energia da bateria.

Definidos os elementos aos quais o dispositivo inteligente está conectado, executa-se a inserção de parâmetros pertinentes ao processo de carregamento controlado particulares as necessidades do usuário.

- Inserir estado de carga no qual o carregamento será considerado concluído.

E posteriormente, os parâmetros de usuário referentes ao processo de operação de veículos elétricos como unidades armazenadoras de energia despacháveis, incluindo a habilitação ou não do modo operante.

- Deseja auxiliar a rede em condições de emergência, permitindo a utilização do VEH como armazenador de energia despachável? Sim/Não;
- Caso sim, inserir estado de carga mínimo permitido para o VEH.

Para a primeira parametrização todo o processo precisa necessariamente ser executado. Contudo, executada a primeira parametrização, um menu de opções passa a ser disponibilizado possibilitando a escolha de opções rápidas pré-configuradas, armazenamento de novas configurações preferenciais, carregamento sem cadastro, atualização do modelo de carregador e reset do dispositivo.

O processo de parametrização é descrito de maneira detalhada pelos fluxogramas apresentados nas Figura 5.1-Figura 5.2.

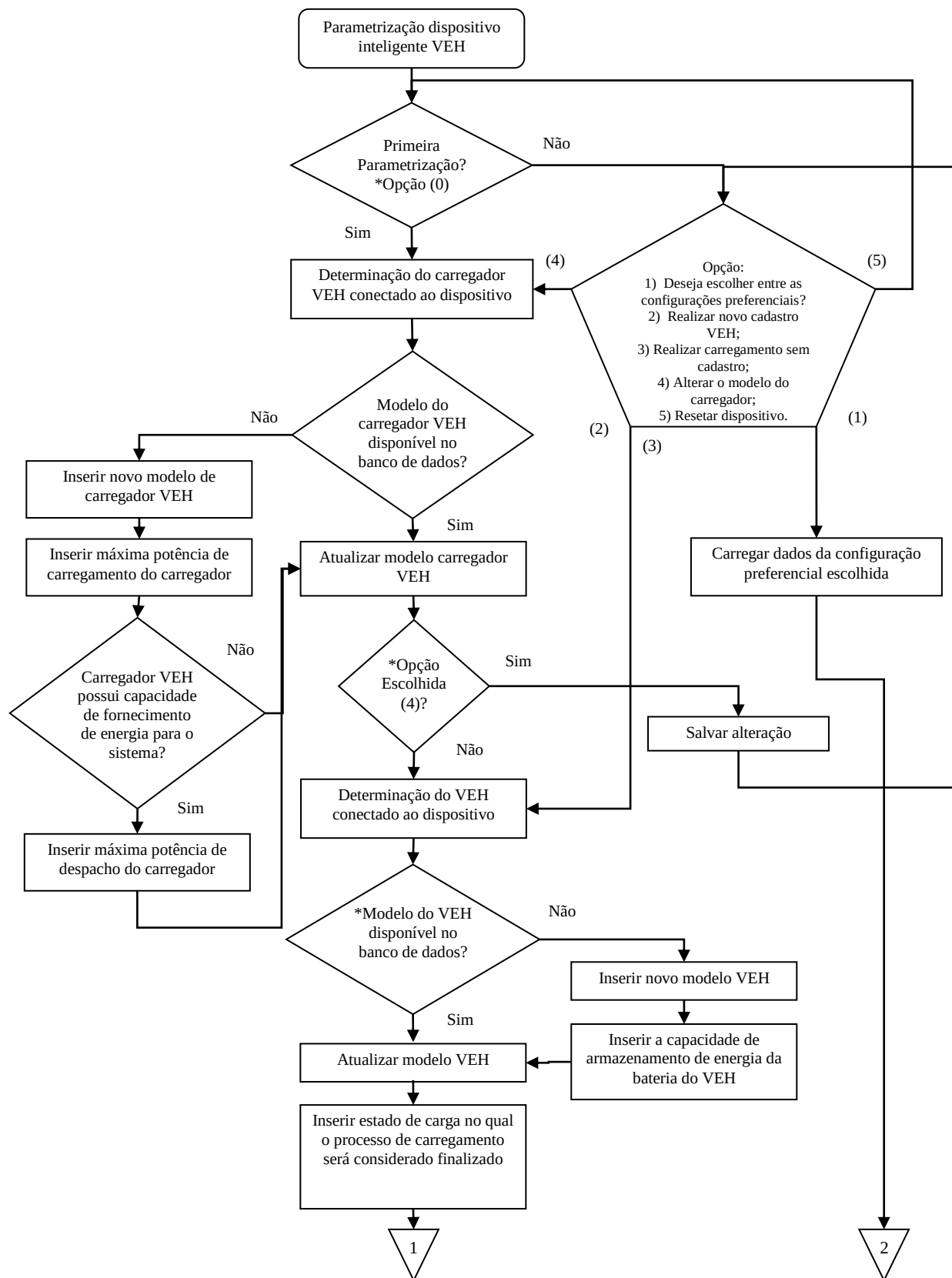


Figura 5.1: Fluxograma do processo de parametrização do dispositivo inteligente responsável pelo controle do carregamento e despacho dos VEH – parte 1

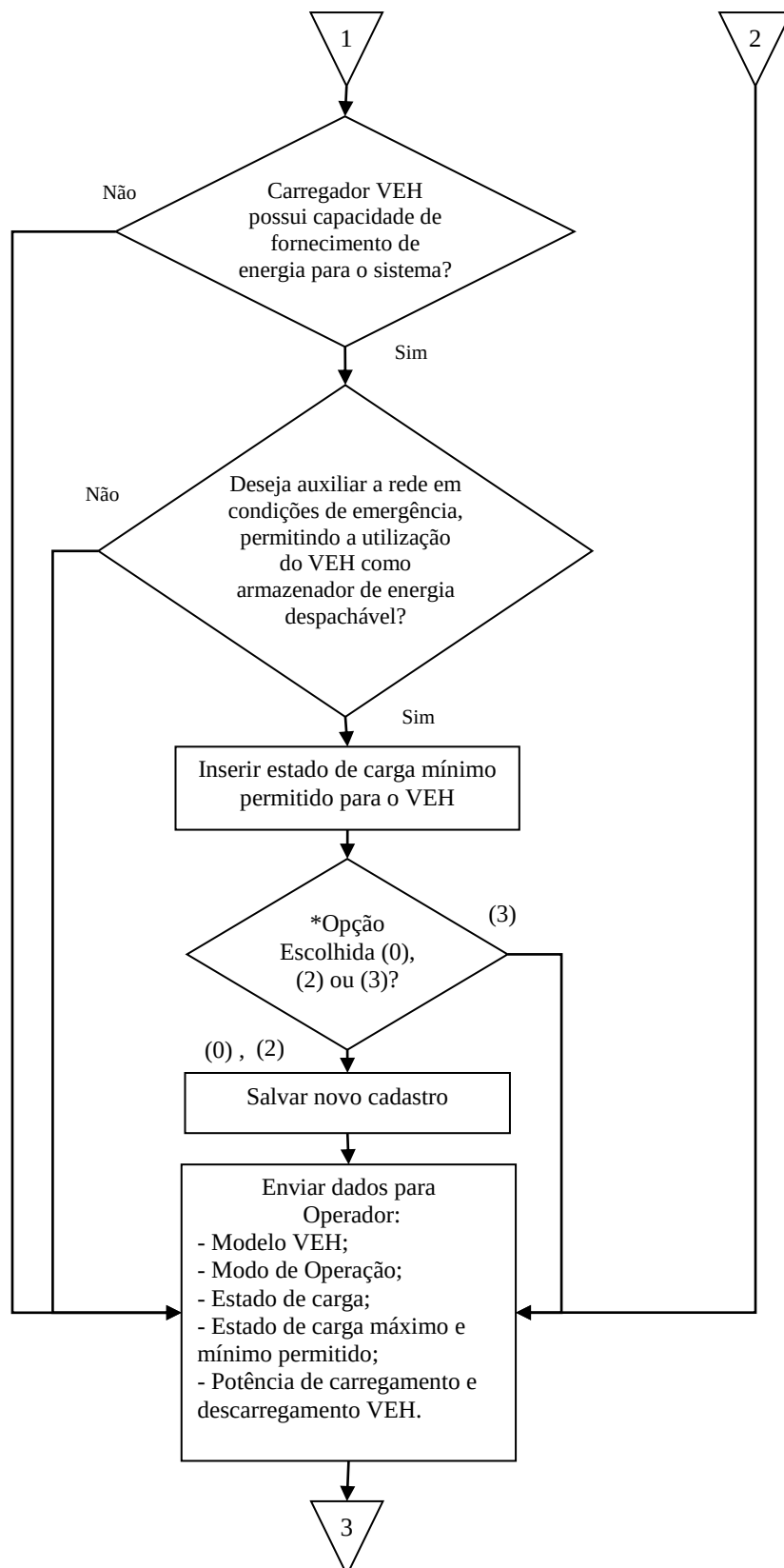


Figura 5.2: Fluxograma do processo de parametrização do dispositivo inteligente responsável pelo controle do carregamento e despacho dos VEH – parte 2

5.2 Modos de Operação do Dispositivo Inteligente

Executado o processo de parametrização do dispositivo inteligente e enviados os dados para o agente operador do sistema, dá-se início ao processo de controle, comunicação e tomada de decisão do dispositivo inteligente.

Para determinação do modo de operação tem-se como condição fundamental o estado de conexão do sistema. Caso o sistema esteja conectado à rede principal, o dispositivo estará em modo de carregamento. Entretanto, sendo verificado o ilhamento do sistema, o dispositivo poderá entrar em modo gerador.

Esses processos são detalhados nas seções subsequentes e pelo fluxograma descrito na Figura 5.3.

5.2.1 *Processo de Carregamento Controlado de VEHs*

Estando confirmada a conexão do sistema com a rede principal e identificado um estado de carga do VEH inferior ao nível de carregamento objetivo, dá-se início ao processo de carregamento controlado. Sendo os seguintes passos executados pelo dispositivo inteligente.

- Definição do modo de operação como “Carregamento”;
- Envio de dados para Operador:
 - Modo de Operação.
- Recebimento de dados do Operador:
 - Potência de carregamento VEH;
 - Estado de conexão do sistema.
- Execução do Carregamento do VEH;
- Leitura do estado de carga do VEH;
- Verificação do estado de conexão do sistema.

Caso o estado de carga do VEH seja equivalente ao nível de carregamento objetivo, o modo de operação é definido como “Standby” e o processo de carregamento não é executado. Os passos executados quando nesta condição são descritos a seguir.

- Definição do modo de operação como “Standby”;
- Envio de dados para Operador:
 - Modo de Operação.
- Verificação do estado de conexão do sistema.

Os procedimentos detalhados nessa seção são ilustrados pelo fluxograma apresentado na Figura 5.3.

5.2.2 Processo de Operação de Veículos Elétricos como Unidades Armazenadoras de Energia Despacháveis

Caso identificada a desconexão do sistema com a rede principal e realizado o processo de ilhamento, a operação do veículo elétrico como unidade armazenadora de energia despachável pode ser executada desde que algumas condições sejam atendidas.

Primeiramente, verifica-se se o proprietário habilita o despacho do VEH. Caso afirmativo, identifica-se se o estado de carga do VEH é maior que o mínimo estado de carga permitido, dando assim início ao processo de despacho da energia armazenada no VEH.

Os passos para execução desse modo de operação pelo dispositivo inteligente são descritos a seguir.

- Definição do modo de operação como “Gerador”;
- Recebimento de dados do Operador:
 - Potência a ser despachada pelo VEH;
 - Estado de conexão do sistema.
- Envio de dados para Operador:
 - Estado de carga.
- Execução do despacho do VEH;
- Leitura do estado de carga do VEH;
- Verificação do estado de conexão do sistema.

Caso o proprietário não habilite a opção de despacho do VEH ou esta opção esteja habilitada e o estado de carga do VEH seja inferior ao mínimo estado de carga permitido, não se executa o processo de despacho, sendo o modo de operação definido como *Standby*. Os passos executados para estas condições são descritos a seguir.

- Definição do modo de operação como “*Standby*”;
- Envio de dados para Operador:
 - Modo de Operação.
- Verificação do estado de conexão do sistema.

Os procedimentos detalhados nessa seção são ilustrados pelo fluxograma apresentado na Figura 5.3.

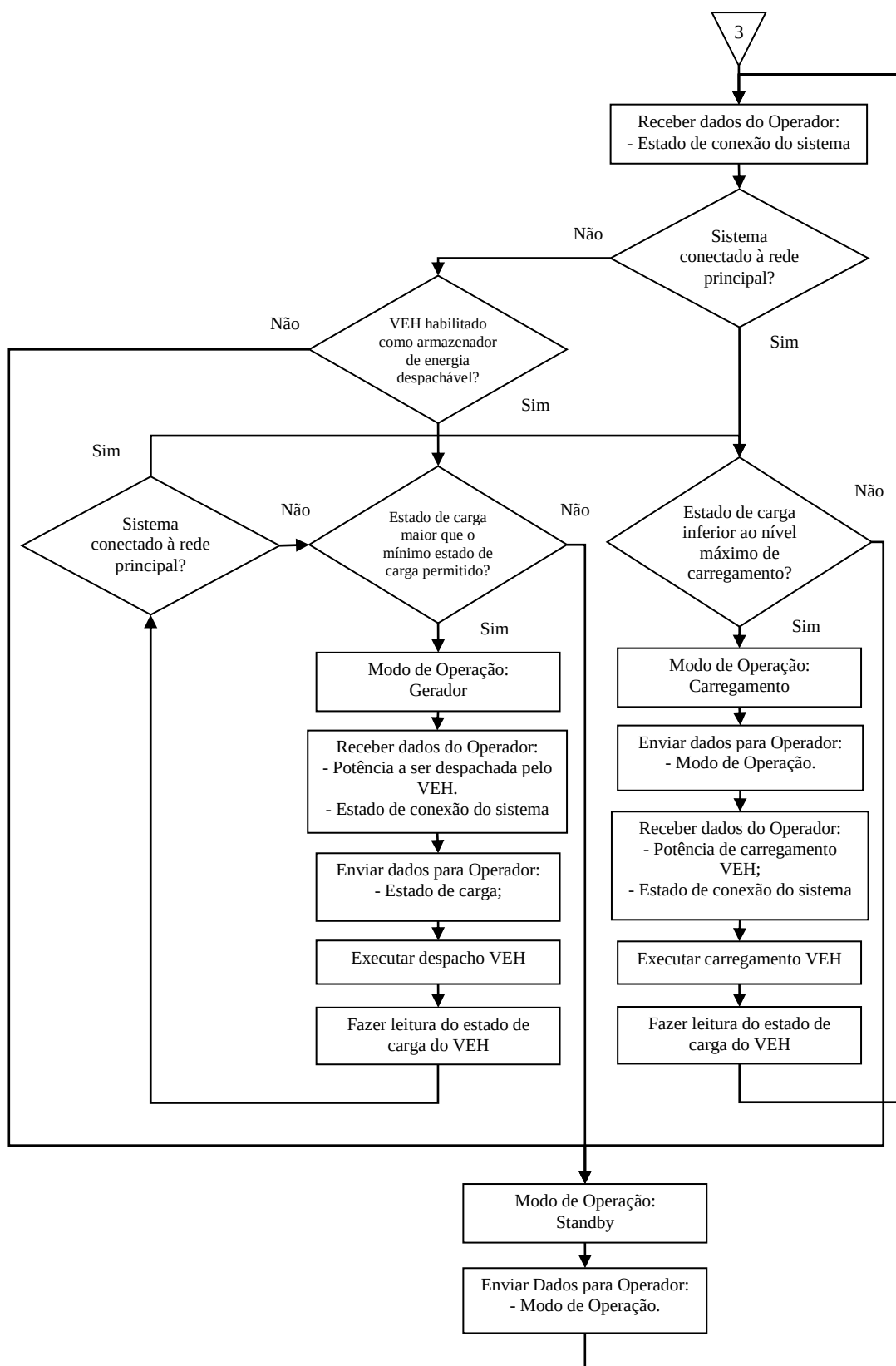


Figura 5.3: Fluxograma do processo de controle, comunicação e tomada de decisão do dispositivo inteligente responsável pelo controle do carregamento e despacho dos VEH – parte 3

6. Política de Gerenciamento de Demanda para Micro Redes em Situação de Ilhamento baseada em Grupos de Prioridade e Período Funcional de Operação

Em situações de ilhamento políticas de corte de carga podem ser necessárias para manutenção da capacidade de operação do sistema. Na literatura, diversas são as abordagens propostas para corte de carga.

A referência [21] apresenta uma metodologia de corte de carga por subtensão, a partir da modificação e introdução de uma nova variável relacionada ao corte de carga na matriz jacobiana. Para [22] o corte de carga deve ser executado primeiramente para cargas sujeitas a interrupção visando a manutenção do suprimento a cargas essenciais. Já [23]-[24] adotam como critério de corte de carga a subfrequência, propondo políticas baseadas em redes neurais. Enquanto [25] apresenta políticas de corte de carga visando à manutenção dos níveis de frequência e tensão em valores aceitáveis para segurança operativa.

A metodologia proposta por esse trabalho dá um passo além, buscando não somente o atendimento a grupos de prioridade e garantia de níveis de frequência e tensão dentro de limites operacionais, mas assume como critério fundamental o conceito de períodos funcionais de operação a vista da otimização do uso do potencial energético disponível.

Deste modo, maximiza o volume de cargas atendidas e consequentemente gera maior bem-estar social e menores perdas econômicas a sociedade quando comparada a metodologias tradicionais que visam apenas a manutenção de limites operativos e/ou atendimento a cargas específicas em situações de ilhamento.

6.1 Período Funcional de Operação

Em uma situação de ilhamento, caso um serviço não tenha garantia do suprimento energético ao longo de toda sua cadeia operativa ou produtiva, sua funcionalidade poderá ser corrompida após o decorrer de um determinado período de tempo. Assim, define-se o período funcional de operação como o tempo de viabilidade de operação, posterior ao ilhamento, que grupos específicos de carga possuem.

Deste modo, levam-se em consideração fatores como falta de materiais fundamentais para execução das atividades, indisponibilidade de pessoal, não atendimento das funções do serviço, desnecessariedade do serviço após certo período de ilhamento, entre outros fatores.

Um exemplo simplificado pode ser observado para o caso do suprimento de água, serviço de alta prioridade. Assumamos que uma parcela do processo de tratamento de água não possa ser executada após o ilhamento da rede, deste modo, o suprimento de água ficará restrito ao montante de água previamente tratada e armazenada, sendo este um fator limitante da operação que consequentemente restringe o período de funcionalidade desse serviço. Ao ponto que chegará um momento a partir do qual, caso o suprimento pela rede principal não seja retomado, a garantia de suprimento energético a esse serviço não acarretará em qualquer ação ou benefício a rede ilhada. Esse fato está presente em praticamente todos os níveis de prioridade de carga.

6.2 Metodologia para Implementação

A partir do momento em que um dos elementos da cadeia de operação de um serviço não pode mais ser executado por ocorrência do ilhamento, seu tempo de funcionalidade pós ilhamento será limitado, logo não há funcionalidade na garantia de suprimento após este período.

Nesta perspectiva, uma análise pode ser desenvolvida para verificação do quanto da energia disponível na micro rede ilhada pode ser empregue para o atendimento ao nível subsequente de prioridade de carga, sem que haja comprometimento do tempo funcional de operação das carga de maior prioridade. Esta ação permite a maximização do suprimento de cargas frente ao potencial energético disponível, gerando

consequentemente maior bem-estar social e menores prejuízos a sociedade, quando comparado as estratégias tradicionais que garantem o suprimento a serviços essenciais, que por vezes não operarão devido a indisponibilidade de elementos de sua cadeia operacional, acarretando em ociosidade de suprimento.

Por meio da metodologia proposta, a quantidade de suprimento ocioso será limitada a um percentual mínimo para garantia da segurança operativa, a critério do operador do sistema.

6.2.1 Otimização do Processo de Suprimento Energético

Para execução da metodologia verificações da capacidade de suprimento, previsões do nível de geração das unidades geradoras despacháveis e não despacháveis variáveis, em geral fontes renováveis, associadas a previsões de demanda para cada grupo de prioridade de carga do sistema precisam ser executadas.

Com base nessas previsões e considerados os critérios técnicos do sistema, como limite de condução de ramais, tensão e frequência, a geração disponível do sistema pode ser determinada.

Em posse do conhecimento da geração disponível e da previsão de carga do sistema para cada grupo de prioridade, o processo de otimização do suprimento pode ser executado para a determinação do período de sobrevivência relativo a cada grupo de prioridade de cargas.

O processo é desenvolvido pela seguinte lógica. Iniciando a partir do grupo de carga de maior prioridade, verifica-se se a micro rede tem capacidade de suprir sua demanda nas perspectivas de potência e energia a cada passo de integração. Caso afirmativo, armazena-se a potência e energia necessária para o suprimento da demanda durante esse período de integração, contabilizando o período de integração ao período de suprimento do respectivo grupo de prioridade. Na hipótese de que no decorrer do processo a micro rede não venha a atender os requisitos de potência ou energia necessários para suprimento da demanda do respectivo grupo de prioridade, o processo é terminado e o período de suprimento da carga determinado.

Entretanto, caso a micro rede supra o grupo de maior prioridade por um período equivalente ao seu período funcional, executa-se a próxima etapa do processo, que é a consideração do grupo de prioridade de carga subsequente.

Nesta análise, além das etapas previamente consideradas, uma nova etapa com duas novas verificações é acrescentada.

Essa nova etapa é responsável pela garantia do suprimento, durante todo o período funcional, ao(s) grupo(s) de prioridade de carga superior(es) a carga em análise. Uma vez que, quando considerada a participação de novas cargas, não basta garantir o atendimento da demanda a cada passo de integração, é necessário garantir o suprimento da demanda do grupo de prioridade imediatamente superior (antecedente) durante seu completo período funcional, para isso, faz-se necessário verificar se com a capacidade de suprimento disponível é possível atender a essa nova demanda associada a cada passo de integração.

Contudo, esse processo não é possível de ser realizado de maneira determinística apenas com essas verificações, pois por mais que a maior potência e energia ainda a serem suprida sejam conhecidas, a garantia de tais condições em passos anteriores a sua ocorrência não garante necessariamente a capacidade de atendimento a essas condições no futuro.

Por exemplo, caso a maior demanda de potência que a micro rede ainda será submetida ocorra dez períodos de integração adiante, a garantia do suprimento desta potência e da energia necessária podem ser confirmados durante os próximos cinco passos de interação e violado(s) no sexto passo. Com essas informações não é possível estabelecer deterministicamente até qual parcela dos passos executados, nos quais os maiores requisitos de potência e energia ainda a serem supridos haviam sido respeitados, é possível utilizar o suprimento disponível e garantir a manutenção do atendimento ao grupo de prioridade antecedente durante seu completo período funcional. Apenas pode se concluir que não será possível o suprimento do grupo de prioridade subsequente após o quinto passo de integração, porém não se sabe ao certo durante quantos períodos o suprimento poderá ser realizado, estando contido entre 0 e 4 períodos de integração.

Deste modo, para determinação do período de suprimento ao grupo de prioridade subsequente que não viola a manutenção do suprimento ao grupo de prioridade antecedente, é proposto a utilização de uma técnica de varredura *backward-forward*.

Assim, na identificação do não atendimento as condições de potência máxima e/ou energia ainda a serem supridas, o processo retropropagativo é executado no qual se dá um passo *backward*, representado pela retirada da demanda do grupo de prioridade subsequente acrescentada no passo anterior, seguido pelo movimento *forward*, por meio do qual novamente se tenta garantir o suprimento do grupo de prioridade antecedente durante seu completo período de funcionalidade, caso não seja possível, mais um passo *backward* é executado e assim sucessivamente até que a manutenção do suprimento ao grupo de prioridade antecedente seja garantida durante todo seu período funcional. Deste modo, determinando o período de suprimento do grupo de prioridade subsequente.

6.2.1.1 *Capacidade de Atendimento a Demanda da Micro Rede Durante cada Período de Integração*

A capacidade de atendimento a demanda durante o período de integração consiste na verificação de duas condições. A existência de disponibilidade de geração suficiente para atendimento da potência demandada pela carga e a existência da energia necessária para o suprimento da demanda da micro rede durante o período de integração.

6.2.1.1.1 *Verificação na Perspectiva de Potência*

A capacidade de atendimento do sistema à demanda, na perspectiva de potência, verifica se há geração despachável suficiente no sistema para o fornecimento da potência necessária ao suprimento da demanda.

A geração disponível do sistema considera as capacidades de despacho, respeitando os critérios técnicos limitantes da micro rede, das fontes de geração despacháveis, geração não despachável prevista e armazenadores de energia, os quais

consideram a participação de VEHs quando operando em modo de auxílio a micro rede. A geração disponível despachável do sistema é obtida pela seguinte formulação.

$$GER_{\substack{DISPONÍVEL \\ DESPACHÁVEL \\ SISTEMA}} = \left[GER_{DESPACHÁVEL} + GER_{\substack{NÃO \\ DESPACHÁVEL}} + GER_{\substack{ARMAZENADORES \\ DE \\ ENERGIA}} \right] \quad (10.1)$$

Em que:

$GER_{\substack{DISPONÍVEL \\ DESPACHÁVEL \\ SISTEMA}}$: Geração disponível despachável do sistema;

$GER_{DESPACHÁVEL}$: Geração fornecida por fontes de geração despacháveis;

$GER_{\substack{NÃO \\ DESPACHÁVEL}}$: Geração prevista para as fontes de geração não despacháveis;

$GER_{\substack{ARMAZENADORES \\ DE \\ ENERGIA}}$: Geração fornecida por armazenadores de energia e VEHs em modo de operação de auxílio a rede.

Estando esta verificação atendida, a potência necessária para o atendimento da demanda a cada passo de integração deve ser armazenada para cada grupo de prioridade.

6.2.1.1.2 Verificação na Perspectiva de Energia

Nesta segunda análise verifica-se a capacidade de atendimento a demanda sobre a perspectiva de energia, indicando se haverá energia suficiente para o atendimento a demanda durante o período integrado.

Essa análise é importante quando considerados armazenadores de energia, uma vez que, ainda que garantida a potência necessária para o atendimento à demanda da

micro rede, é critério fundamental que os mesmos possuam energia armazenada suficiente para manutenção desse nível de despacho durante todo o período de integração, caso contrário, o atendimento aos requisitos de potência pode ser desrespeitado, inviabilizando a atendimento a tal grupo de carga.

Estando esta verificação atendida, a energia necessária para o suprimento da demanda a cada passo de integração deve ser armazenada para cada grupo de prioridade.

6.2.1.2 Manutenção do Atendimento a Demanda do(s) Grupo(s) de Prioridade Superior ao Analisado Durante o(s) Completo(s) Período(s) de Funcionalidade

Essa nova etapa é responsável pela garantia do suprimento, durante todo o período funcional, ao(s) grupo(s) com nível(is) de prioridade superior(es) ao atual grupo de carga em análise. Sendo executada apenas em situações onde, pelo menos, o grupo de maior prioridade seja suprido durante seu completo período de funcionalidade.

Para tanto, as verificações nas perspectivas de potência e energia devem ser novamente executadas considerando algumas particularidades.

6.2.1.2.1 Verificação na Perspectiva de Potência

Para a verificação da capacidade de manutenção do atendimento ao(s) grupo(s) com nível(is) de prioridade superior(es) ao analisado, de maneira similar a primeira verificação, a micro rede deve olhar para um horizonte futuro e identificar se possuirá capacidade de geração suficiente para o atendimento ao maior requisito de potência que o grupo de prioridade antecedente venha a apresentar, entre o atual ponto de operação sob análise e o fim de seu período funcional.

Essa análise é importante para evitar a ociosidade de suprimento, determinando o quanto pode ser utilizado das unidades armazenadoras de energia, de modo que o suprimento ao(s) grupo(s) de prioridade antecedente(s) ainda seja garantido durante todo período funcional.

Contudo, essa análise não é possível de ser realizada deterministicamente apenas com essas verificações, uma vez que a disponibilidade de potência em um momento presente não garante a disponibilidade da mesma potência no futuro devido a critérios técnicos impostos pelo sistema como limite de condução de ramais, variação da geração não despachável, descarregamento de armazenadores de energia. Deste modo, em um futuro antes do previsto, a micro rede pode verificar a incapacidade de suprimento aos requisitos de potência que o grupo de prioridade antecedente venha a apresentar.

Tendo em vista esta situação, para a determinação do adequado período de suprimento ao grupo de prioridade subsequente, de modo a preservar o atendimento durante todo o período funcional ao grupo de prioridade antecedente, um processo de varredura *backward-forward* é empregado.

Nesta perspectiva, a demanda do grupo de prioridade subsequente é associada até a verificação da incapacidade de atendimento ao grupo de prioridade antecedente. Verificada essa ocorrência, o processo retropropagativo é executado no qual se dá um passo *backward*, representado pela retirada da demanda acrescentada, seguido pelo movimento *forward*, por meio do qual novamente se tenta chegar ao suprimento do grupo de prioridade antecedente durante seu completo período de funcionalidade, caso não seja possível, mais um passo *backward* é executado e assim sucessivamente até que a manutenção do suprimento ao grupo de prioridade antecedente durante todo o período funcional seja atingida.

6.2.1.2.2 Verificação na Perspectiva de Energia

Esta segunda análise executa um processo de verificação similar ao anteriormente apresentado, contudo a manutenção da garantia de atendimento a maior potência que a micro rede será submetida, por vezes não é suficiente para garantia do suprimento aos grupos de prioridade antecedente (maior prioridade) durante todo o período funcional.

Para a garantia desta condição, associada a verificação da capacidade de potência, deve-se também verificar se a micro rede possui energia suficiente para o

atendimento da demanda dos grupos de prioridade antecedentes durante todo seu período funcional.

Assim, ao realizar a análise da possibilidade de atendimento a um grupo de prioridade subsequente, verifica-se a cada passo de integração se há energia suficiente para o atendimento da demanda do(s) grupo(s) de prioridade antecedente, entre o atual ponto de operação sob análise e o fim do(s) período(s) funcional(is).

Essa análise é importante quando considerados armazenadores de energia, uma vez que, ainda que garantida a potência necessária para o atendimento a demanda da micro rede, é critério fundamental que os mesmos possuam energia armazenada suficiente para manutenção do atendimento da demanda do grupo de prioridade antecedente durante todo o período de funcional, caso contrário, o atendimento aos requisitos de potência podem ser desrespeitado, inviabilizando a atendimento a tal grupo de carga.

Este processo é executado de modo similar a verificação na perspectiva de potência, utilizando a varredura *backward- forward* para determinação do adequado período de suprimento das cargas com nível de prioridade subsequente.

6.2.2 Fluxograma da Metodologia Proposta

O procedimento para implementação da metodologia proposta é descrito pelo fluxograma apresentado nas Figura 6.1-Figura 6.3.

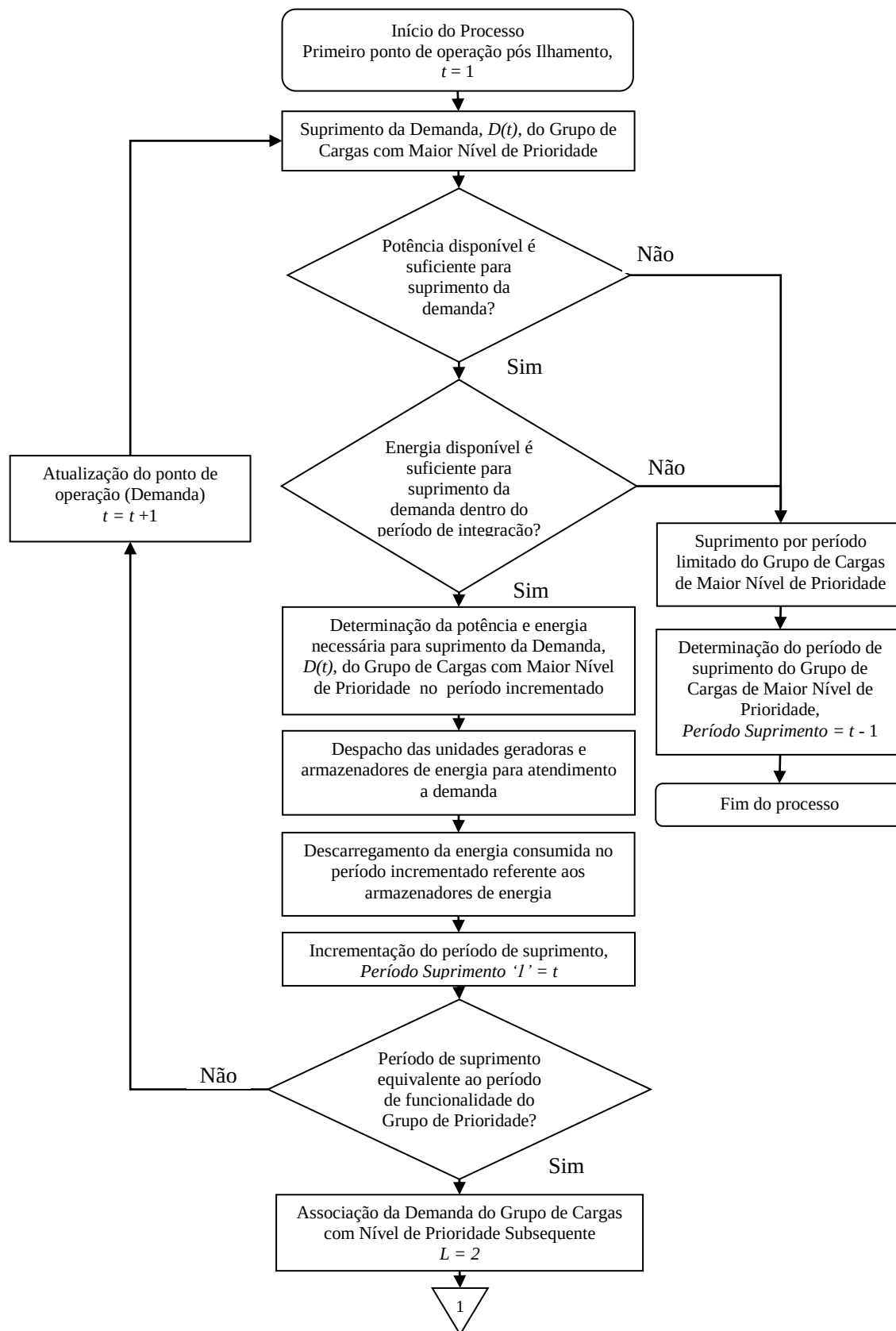


Figura 6.1: Política de gerenciamento de demanda para micro redes em situação de ilhamento baseada em grupos de prioridade e período funcional de operação – parte 1

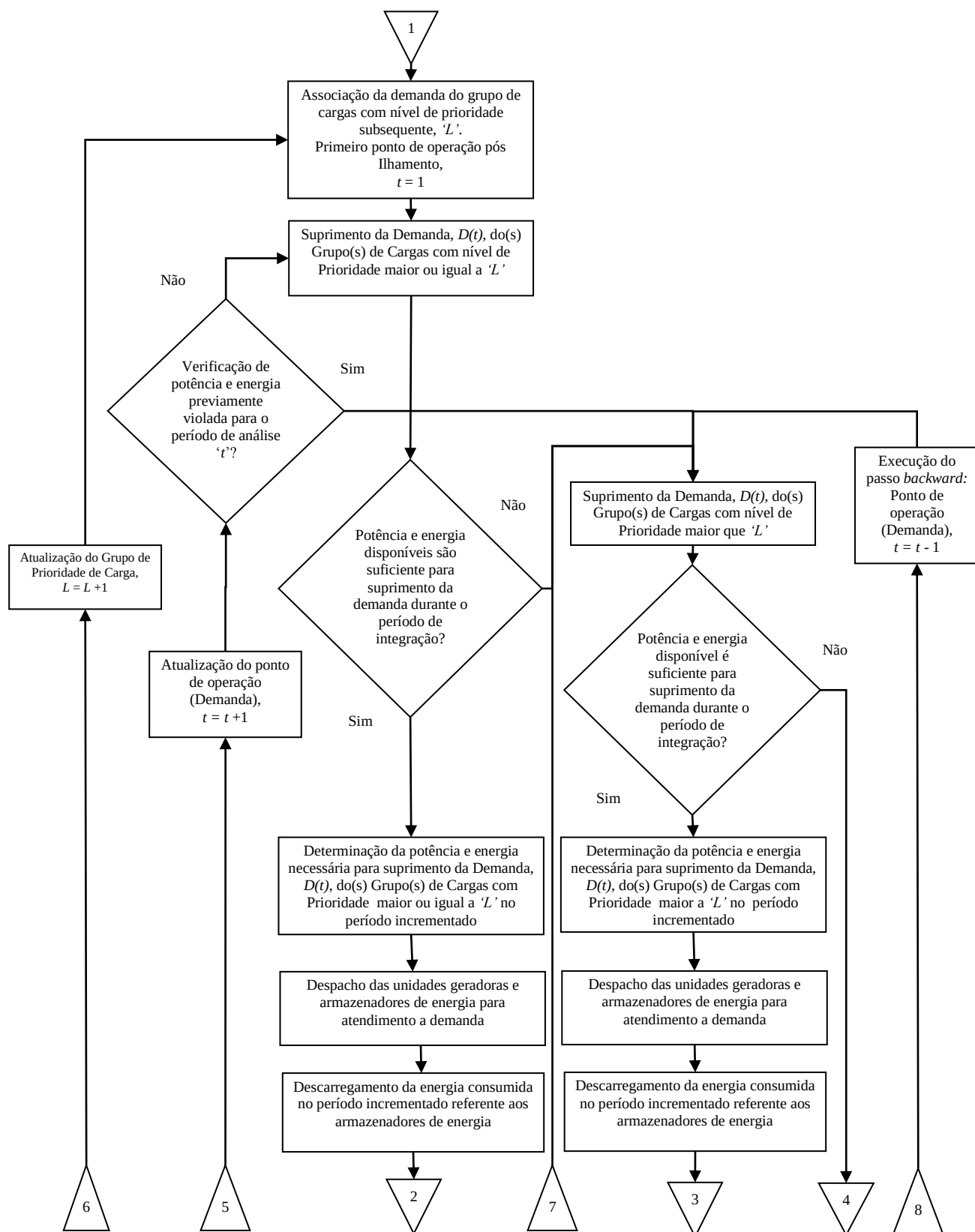


Figura 6.2: Política de gerenciamento de demanda para micro redes em situação de ilhamento baseada em grupos de prioridade e período funcional de operação – parte 2

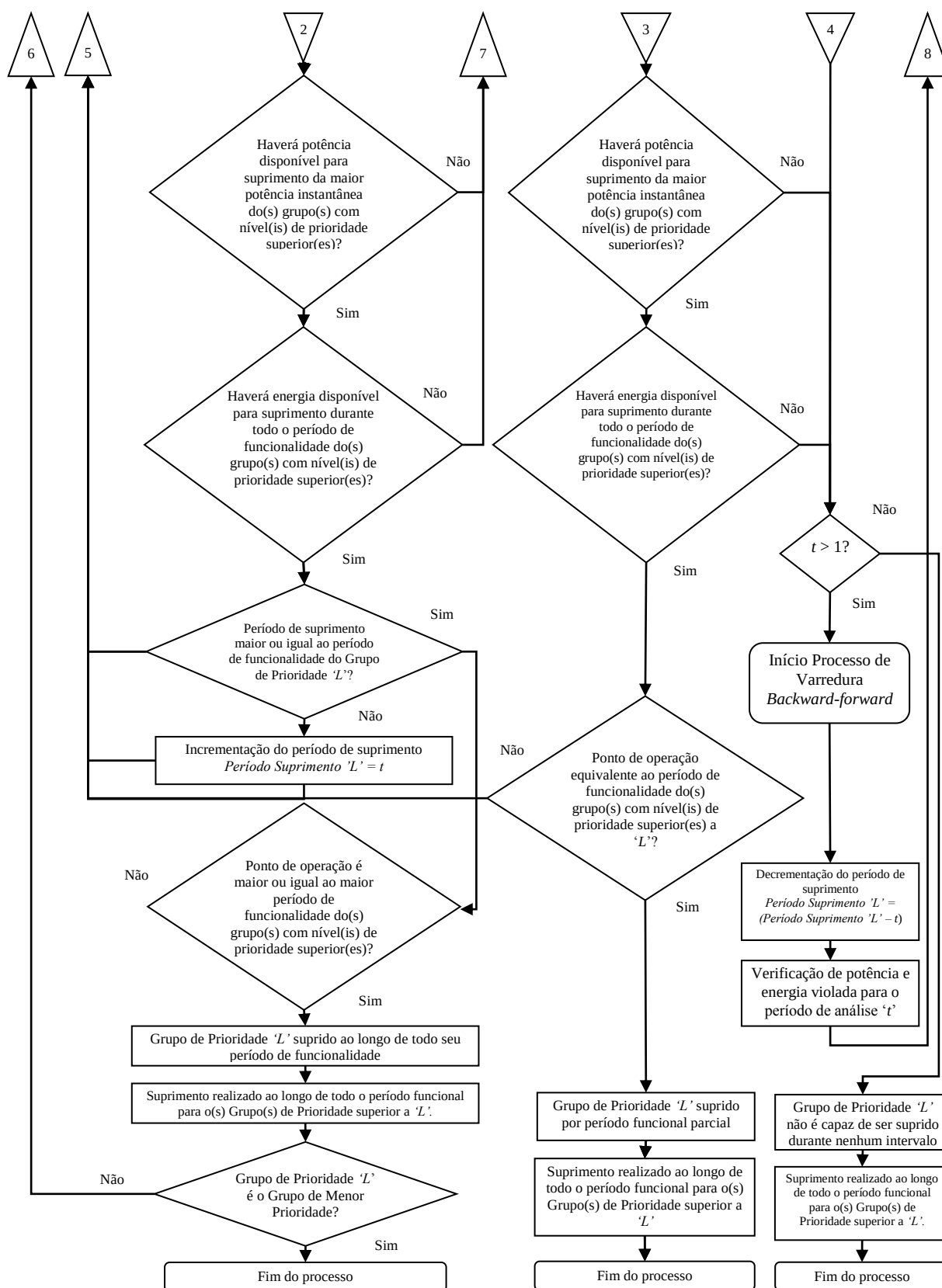


Figura 6.3: Política de gerenciamento de demanda para micro redes em situação de ilhamento baseada em grupos de prioridade e período funcional de operação – parte 3

7. Interface Gráfica

Para melhor observação das potencialidades e resultados apresentados pelas metodologias propostas neste trabalho, uma interface gráfica foi desenvolvida na plataforma *Matlab®* para monitoramento dos estados e ações do sistema.

A interface conta com uma guia principal que apresenta três estados distintos em função do modo de operação da micro rede, sendo eles:

- Micro rede conectada à Rede Principal;
- Micro rede Ilhada completamente suprida por geração local;
- Micro rede Ilhada em modo de gerenciamento de demanda.

Associada a guia principal, uma guia secundária para o monitoramento da malha de VEHs, apresentando os parâmetros e estados de cada veículo conectado a micro rede pode ser acessada.

O detalhamento das guias para cada modo de operação é apresentado nas subseções a seguir.

7.1 Guia Principal – Micro Rede

A guia principal possui como componentes fundamentais, comuns a todos os estados de operação, o diagrama representativo do sistema sob análise, unidades de geração local, identificação de conexão ou ilhamento da micro rede com a rede principal, demanda da micro rede por fase, geração total despachada para suprimento da demanda da micro rede por fase, discretização da geração em participação de geração local e rede principal (ou contribuição VEHs), período de integração analisado, número de veículos em processo de carregamento, modo de operação da micro rede, estado de suprimento da carga, tipo de controle de frequência adotado e um parâmetro a escolha do usuário a ser apresentado para todas a barras do sistema.

Suas funcionalidades são exploradas a seguir para cada modo de operação da micro rede.

7.1.1 Modo de Operação: Micro Rede Conectada à Rede Principal

A interface apresentada pela guia principal para a micro rede em modo de operação conectado à Rede Principal, é ilustrada pela Figura 7.1.

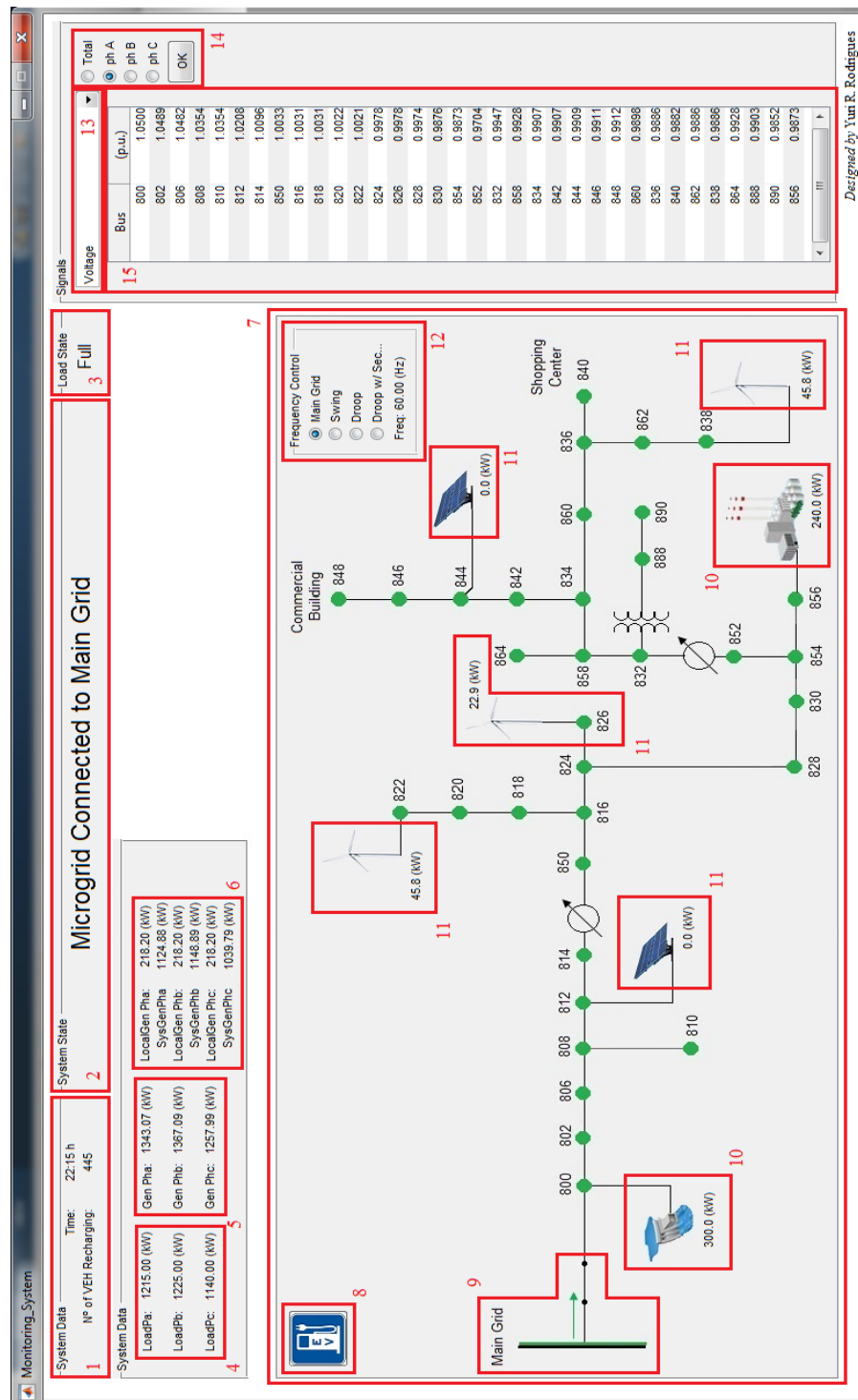


Figura 7.1: Guia principal para o modo de operação micro rede conectada à Rede Principal

Suas funcionalidades são elencadas e descrita pelos itens numerados,

1. Dados do Sistema: Apresenta o atual período de operação analisado e o número total de VEHs em processo de carregamento.
2. Estado do Sistema: Indica o modo de operação que a micro rede se encontra. Os possíveis estados são:
 - Micro rede conectada à Rede Principal;
 - Micro rede Ilhada completamente suprida por geração local;
 - Micro rede Ilhada em modo de gerenciamento de demanda.
3. Estado de Suprimento da Carga: Indica a parcela da demanda da micro rede atendida. Para o modo de operação conectada à Rede Principal, toda a demanda é suprida estando em modo 'Full'. Contudo, quando em operação ilhada o suprimento a demanda da micro rede pode ser realizado de maneira parcial, apresentando neste campo o nível de prioridade do grupo de carga atendido.

$$LV'1', LV'2', LV'N'$$
4. Demanda da Micro Rede por Fase: Apresenta a potência necessária por fase para o atendimento da micro rede;
5. Geração Despachada Total por Fase: Indica a geração necessária para o atendimento da demanda da micro rede para cada fase. O valor apresentado considera as perdas técnicas do sistema.
6. Composição da Geração Despachada: Retrata a parcela de contribuição por fase da geração local e rede principal na geração despachada total.
7. Diagrama Representativo do Sistema: Ilustra o diagrama do sistema sob análise, apresentando as gerações locais disponíveis, o estado do sistema (conectado ou desconectado da Rede Principal) e o estado de cada barramento (suprido ou não suprido).

8. Acesso a guia de VEH: Por este botão é possível acessar a guia que apresenta os parâmetros e estados de todos os VEHs conectados a micro rede.
9. Estado de Conexão: Indica o estado de operação do sistema, conectado ou desconectado da Rede Principal.
10. Geração Local Despachável: Ilustra as unidades geradores despacháveis presentes na micro rede e seu valor atual de geração total em (kW).
11. Geração Local Não Despachável: Ilustra as unidades geradores não despacháveis presentes na micro rede e seu valor atual de geração total em (kW).
12. Controle de Frequência: Apresenta a metodologia de controle de secundário adotada. Para este modo de operação uma única opção de controle é disponível.
 - Controle de Frequência pela Rede Principal – ‘Main Grid’;
13. Determinação de Variável: Determina a variável do sistema que será apresentado para todas as barras do sistema. Os parâmetros disponíveis para este modo de operação são:
 - Tensão - ‘Voltage’
 - Corrente - ‘Current’
 - Demanda de Potência Ativa - ‘Load Active Power’
 - Demanda de Potência Reativa - ‘Load Reactive Power’
 - Potência Gerada - ‘Power Generated’
 - Potência Gerada pela Rede Principal - ‘Power Generated – Main Grid’
 - Potência Gerada Localmente - ‘Power Generated – Local’
 - N° de VEH em carregamento - ‘N° of Vehicles Recharging’

- Potência de carregamento para cada VEH - *'Recharge Power for each Vehicle'*

14. Determinação do Parâmetro: Determina se a variável previamente escolhida será apresentada para uma fase específica ou com seu valor total, a disponibilidade de opções depende da variável de interesse. Para a apresentação da variável deve-se apertar o botão 'OK' após a escolha do campo de interesse.

15. Display: Apresenta a variável de interesse selecionada para todos os barramentos do sistema.

7.1.2 Modo de Operação: Micro Rede Ilhada Completamente suprida por Geração Local

A interface apresentada pela guia principal para a micro rede em modo de operação ilhada completamente suprida por geração local, é ilustrada pela Figura 7.2.

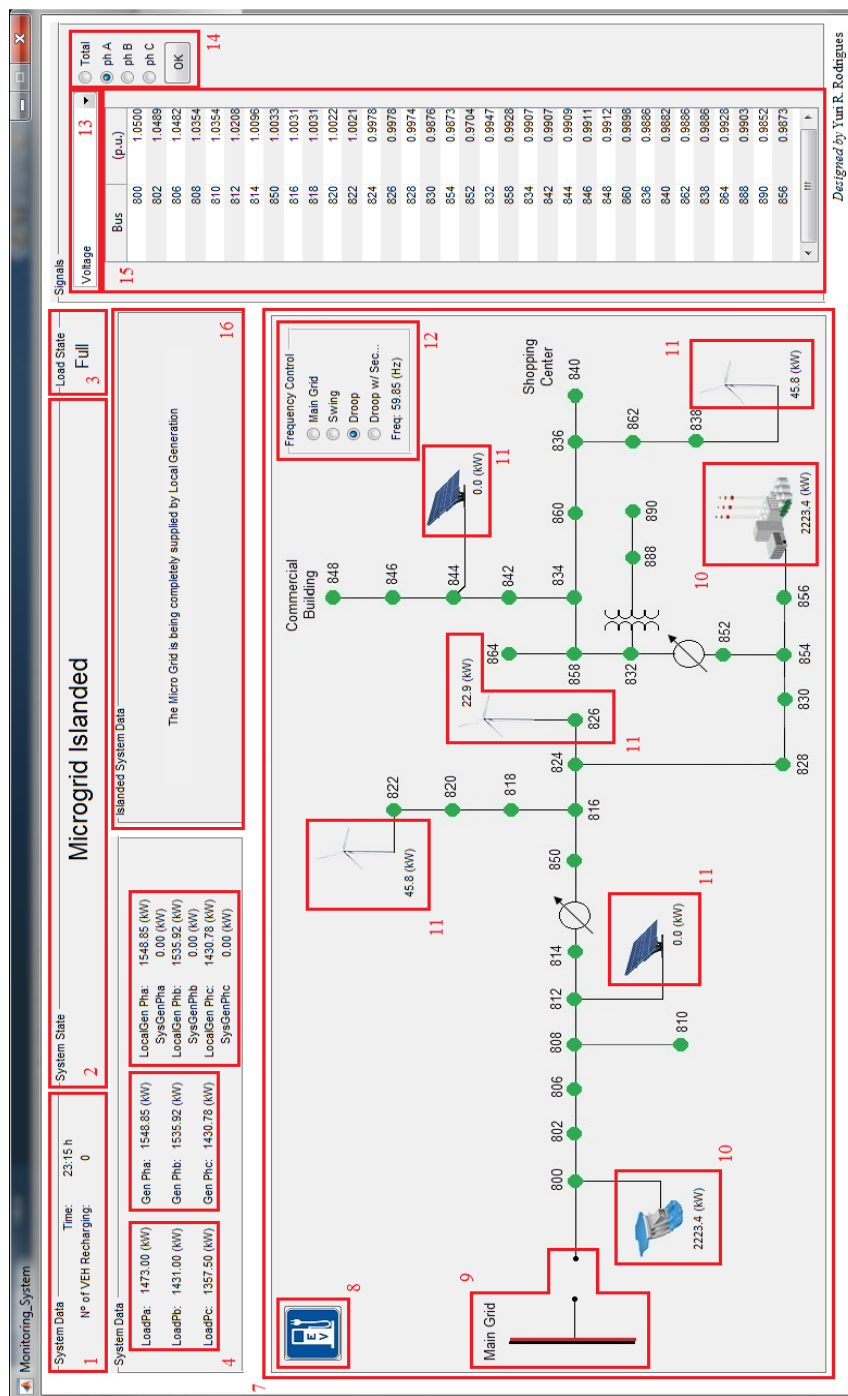


Figura 7.2: Guia principal para o modo de operação ilhada completamente suprida por geração local

Suas funcionalidades são elencadas e descrita pelos itens numerados,

1. Dados do Sistema: Apresenta o atual período de operação analisado e o número total de VEHs em processo de carregamento.
2. Estado do Sistema: Indica o modo de operação que a micro rede se encontra. Os possíveis estados são:
 - Micro rede conectada à Rede Principal;
 - Micro rede Ilhada completamente suprida por geração local;
 - Micro rede Ilhada em modo de gerenciamento de demanda.
3. Estado de Suprimento da Carga: Indica a parcela da demanda da micro rede atendida. Para o modo de operação ilhada completamente suprida por geração local, toda a demanda é suprida estando em modo 'Full'. Contudo, quando em outro modo de operação ilhada o suprimento a demanda da micro rede pode ser realizado de maneira parcial, apresentando neste campo o nível de prioridade do grupo de carga atendido.

$$LV '1', LV '2', LV 'N'$$
4. Demanda da Micro Rede por Fase: Apresenta a potência necessária por fase para o atendimento da micro rede;
5. Geração Despachada Total por Fase: Indica a geração necessária para o atendimento da demanda da micro rede para cada fase. O valor apresentado considera as perdas técnicas do sistema.
6. Composição da Geração Despachada: Retrata a parcela de contribuição por fase da geração local e rede principal na geração despachada total.
7. Diagrama Representativo do Sistema: Ilustra o diagrama do sistema sob análise, apresentando as gerações locais disponíveis, o estado do sistema

(conectado ou desconectado da Rede Principal) e o estado de cada barramento (suprido ou não suprido).

8. Acesso a guia de VEH: Por este botão é possível acessar a guia que apresenta os parâmetros e estados de todos os VEHs conectados a micro rede.
9. Estado de Conexão: Indica o estado de operação do sistema, conectado ou desconectado da Rede Principal.
10. Geração Local Despachável: Ilustra as unidades geradores despacháveis presentes na micro rede e seu valor atual de geração total em (kW).
11. Geração Local Não Despachável: Ilustra as unidades geradores não despacháveis presentes na micro rede e seu valor atual de geração total em (kW).
12. Controle de Frequência: Apresenta a metodologia de controle de secundário adotada. As opções disponíveis para este modo de operação são:
 - Controle por Barra de Referência – ‘*Swing*’;
 - Apenas controle primário *Droop* – ‘*Droop*’;
 - Controle de Frequência Baseado em *Droop* – ‘*Droop w/ Freq*’;
13. Determinação de Variável: Determina a variável do sistema que será apresentado para todas as barras do sistema. Os parâmetros disponíveis para este modo de operação são:
 - Tensão - ‘*Voltage*’
 - Corrente - ‘*Current*’
 - Demanda de Potência Ativa - ‘*Load Active Power*’
 - Demanda de Potência Reativa - ‘*Load Reactive Power*’
 - Potência Gerada - ‘*Power Generated*’

- Potência Gerada pela Rede Principal - '*Power Generated – Main Grid*'
- Potência Gerada Localmente - '*Power Generated – Local*'
- N° de VEH em carregamento - '*N° of Vehicles Recharging*'
- Potência de carregamento para cada VEH - '*Recharge Power for each Vehicle*'

14. Determinação do Parâmetro: Determina se a variável previamente escolhida será apresentada para uma fase específica ou com seu valor total, a disponibilidade de opções depende da variável de interesse. Para a apresentação da variável deve-se apertar o botão 'OK' após a escolha do campo de interesse.
15. Display: Apresenta a variável de interesse selecionada para todos os barramentos do sistema.
16. Informação sobre o Sistema Ilhado: Indica o estado que o sistema ilhado está operando. Para o caso de suprimento completamente realizado por geração local apenas a frase indicando o estado é apresentada. Contudo, quando requisitado o despacho de VEHs para auxílio a rede, parâmetros referentes ao despacho dos VEHs e ao suprimento das cargas são apresentados neste campo.

7.1.3 Modo de Operação: Micro Rede Ilhada em Modo de Gerenciamento de Demanda

A interface apresentada pela guia principal para a micro rede em modo de operação ilhada é ilustrada pela Figura 7.3.

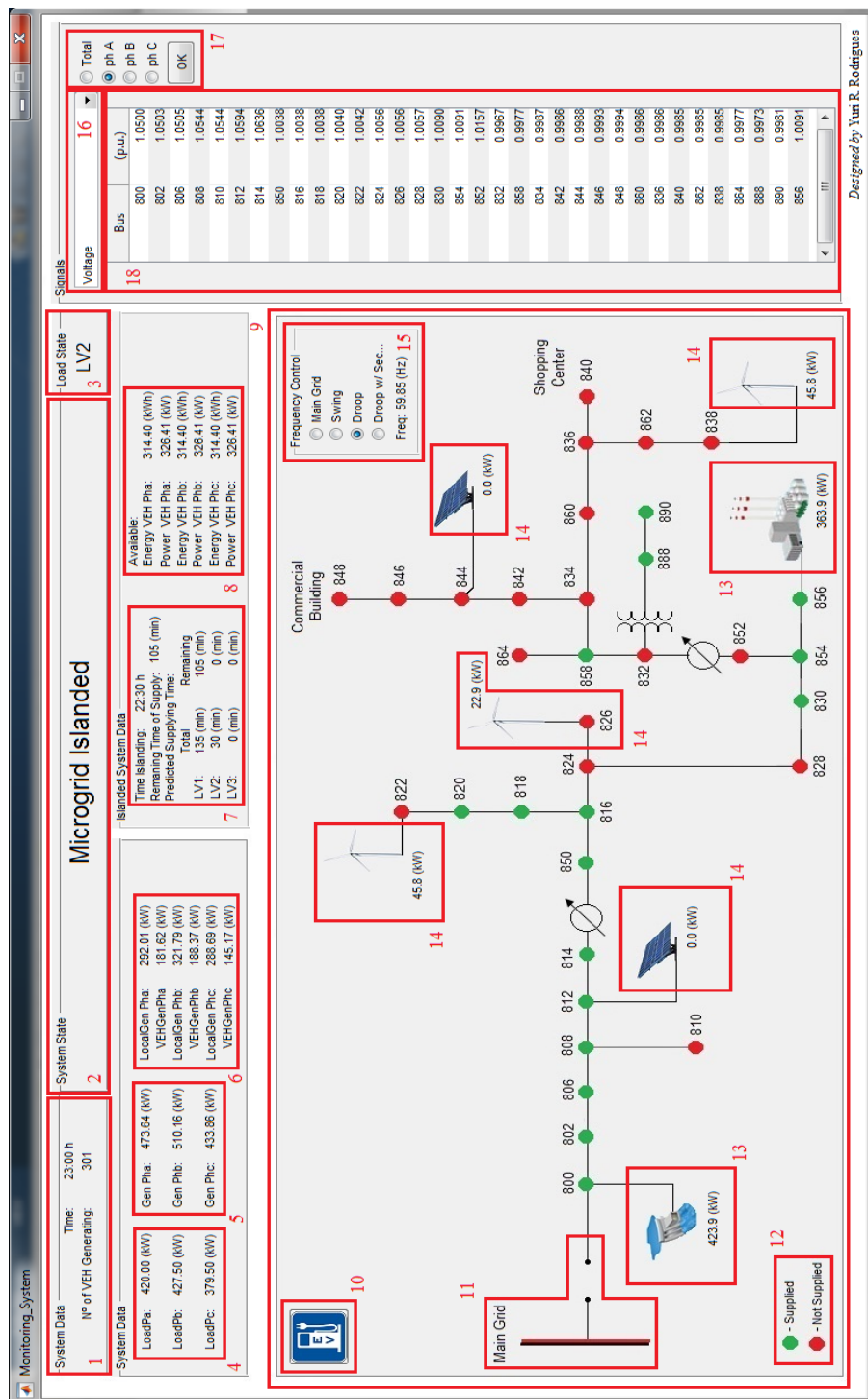


Figura 7.3: Guia principal para o modo de operação ilhado

Suas funcionalidades são elencadas e descritas pelos itens numerados,

1. Dados do Sistema: Apresenta o atual período de operação analisado e o número total de VEHs em processo de carregamento.
2. Estado do Sistema: Indica o modo de operação que a micro rede se encontra. Os possíveis estados são:
 - Micro rede conectada à Rede Principal;
 - Micro rede Ilhada completamente suprida por geração local;
 - Micro rede Ilhada em modo de gerenciamento de demanda.
3. Estado de Suprimento da Carga: Indica a parcela da demanda da micro rede atendida. Variando entre o completo suprimento da micro rede, indicado pelos estados 'Full', ou suprimento a demanda da micro rede realizado de maneira parcial, apresentando neste campo o nível de prioridade do grupo de carga atendido.

$$LV '1', LV '2', \dots, LV 'N'$$
4. Demanda da Micro Rede por Fase: Apresenta a potência necessária por fase para o atendimento da micro rede;
5. Geração Despachada Total por Fase: Indica a geração necessária para o atendimento da demanda da micro rede para cada fase. O valor apresentado considera as perdas técnicas do sistema.
6. Composição da Geração Despachada: Retrata a parcela de contribuição por fase da geração local e VEHs na geração despachada total.
7. Dados do Sistema Ilhado – Cargas Supridas: Apresenta informações referentes a política de suprimento para a micro rede em operação ilhada. Apresentando os seguintes parâmetros:
 - Momento do ilhamento do sistema;
 - Tempo restante de suprimento previsto;
 - Tempo total de suprimento para cada grupo de prioridade;

- Tempo restante de suprimento para cada grupo de prioridade.
8. Dados do Sistema Ilhado – VEH: Indica os níveis de energia e potência disponíveis para despacho pelos VEHs para o sistema por fase.
 9. Diagrama Representativo do Sistema: Ilustra o diagrama do sistema sob análise, apresentando as gerações locais disponíveis, o estado do sistema (conectado ou desconectado da Rede Principal) e o estado de cada barramento (suprido ou não suprido).
 10. Acesso a guia de VEH: Por este botão é possível acessar a guia que apresenta os parâmetros e estados de todos os VEHs conectados a micro rede.
 11. Estado de Conexão: Indica o estado de operação do sistema, conectado ou desconectado da Rede Principal.
 12. Estado Barramentos: Os barramentos indicados na cor verde estão sendo supridos, enquanto os de cor vermelha indicam o corte da carga do barramento (não suprimento).
 13. Geração Local Despachável: Ilustra as unidades geradores despacháveis presentes na micro rede e seu valor atual de geração total em (kW).
 14. Geração Local Não Despachável: Ilustra as unidades geradores não despacháveis presentes na micro rede e seu valor atual de geração total em (kW).
 15. Controle de Frequência: Apresenta a metodologia de controle de secundário adotada. As opções são:
 - Controle por Barra de Referência – ‘*Swing*’;
 - Apenas controle primário *Droop* – ‘*Droop*’;
 - Controle de Frequência Baseado em *Droop* – ‘*Droop w/ Freq*’;

16. Determinação de Variável: Determina a variável do sistema que será apresentado para todas as barras do sistema. Os parâmetros disponíveis para este modo de operação são:

- Tensão - '*Voltage*'
- Corrente - '*Current*'
- Demanda de Potência Ativa - '*Load Active Power*'
- Demanda de Potência Reativa - '*Load Reactive Power*'
- Potência Gerada - '*Power Generated*'
- Potência Gerada Localmente - '*Power Generated – Local*'
- Potência Gerada pelos VEHs - '*Power Generated – Vehicles*'
- Nº de VEH operando como Geradores - '*Nº of Vehicles Generating*'
- Potência Disponível VEHs - '*Available Power - VEH*'
- Energia Disponível VEHs - '*Available Energy – VEH*'

17. Determinação do Parâmetro: Determina se a variável previamente escolhida será apresentada para uma fase específica ou com seu valor total, a disponibilidade de opções depende da variável de interesse. Para a apresentação da variável deve-se apertar o botão 'OK' após a escolha do campo de interesse.

18. Display: Apresenta a variável de interesse selecionada para todos os barramentos do sistema.

7.2 Guia Secundária – VEHs

Esta guia foi desenvolvida para o monitoramento da malha de VEHs conectada a micro rede, estando nela representados os parâmetros e estados de cada veículo. Em função do modo de operação da micro rede, duas interfaces podem ser observadas:

- VEH em processo de carregamento;
 - Micro rede conectada à Rede Principal;
 - Micro rede Ilhada completamente suprida por geração local;
- VEH operando como unidade armazenadora de energia despachável
 - Micro rede Ilhada.

A escolha do VEH de interesse é executada a partir dos dados de identificação, barramento de alocação e número do VEH.

7.2.1 VEH em Processo de Carregamento

Para os modos de operação da micro rede onde os VEHs se encontram em processo de carregamento, a guia VEH apresenta a aparência ilustrada pela Figura 7.4.

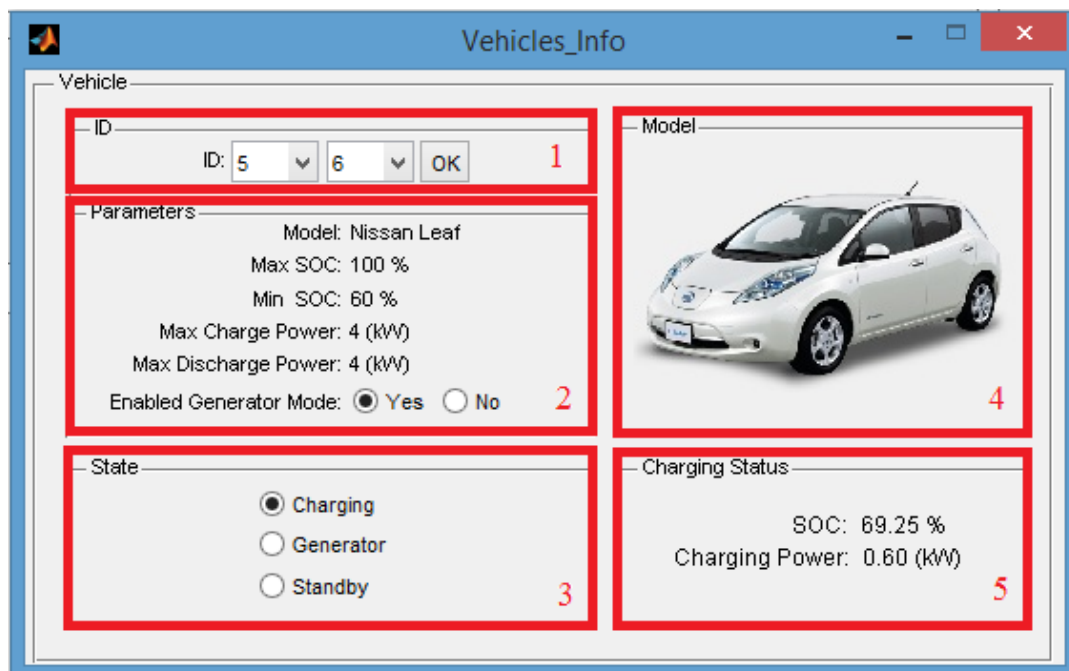


Figura 7.4: Guia de monitoramento da malha de VEHs micro rede operando conectada à Rede Principal ou em modo ilhado completamente suprida por geração local

Suas funcionalidades são elencadas e descrita pelos itens numerados,

1. Identificação: Por meio deste campo deve-se entrar com o número de identificação do veículo (ID). Este ID é composto pelo número do barramento de alocação do VEH seguido do número de referência do mesmo.
2. Parâmetros: Apresenta todos os parâmetros de interesse para o operador do sistema. Esses parâmetros são obtidos pelo dispositivo inteligente interligado ao conjunto VEH-Carregador. Sendo eles
 - Modelo VEH – *'Model'*
 - Máximo Estado de Carga Permitido – *'Max SOC'*
 - Mínimo Estado de Carga Permitido – *'Min SOC'*
 - Máxima Potência de Carregamento – *'Max Charge Power'*
 - Máxima Potência de Descarregamento – *'Max Discharge Power'*
 - Habilitação para operação em modo gerador – *'Enabled Generator Mode'*
3. Estado de Operação: Indica o atual modo de operação do VEH. Para a micro rede operando conectada à Rede Principal ou em modo ilhado completamente suprida por geração local os estados possíveis são:
 - Carregando – *'Charging'*
 - Em espera – *'Standby'*
4. Modelo: Ilustração do modelo do VEH
5. Estado de Carregamento: Apresenta as variáveis relacionadas ao carregamento e estado de carga do VEH.
 - Estado de carga VEH – *'SOC'*
 - Potência de carregamento VEH – *'Charging Power'*

7.2.2 VEH Operando como Unidade Armazenadora de Energia Despachável

Para a operação da micro rede em modo ilhado, situação na qual a atuação de VEHs como unidades armazenadoras de energia despacháveis pode ser requitada, a guia VEH apresenta as informações ilustradas pela Figura 7.5.

The screenshot shows a software window titled 'Vehicles_Info' with a blue header bar. The window is divided into several sections, each highlighted with a red border and a red number indicating its function:

- 1 (ID):** A section for selecting a vehicle ID. It contains two dropdown menus with '5' and '6' selected, and an 'OK' button.
- 2 (Parameters):** A section displaying vehicle specifications:
 - Model: Nissan Leaf
 - Max SOC: 100 %
 - Min SOC: 60 %
 - Max Charge Power: 4 (kW)
 - Max Discharge Power: 4 (kW)
 - Enabled Generator Mode: ☒ Yes ☐ No
- 3 (State):** A section for selecting the vehicle's operational state:
 - ☐ Charging
 - ☒ Generator
 - ☐ Standby
- 4 (Model):** A section displaying a 3D image of a white Nissan Leaf car.
- 5 (Charging Status):** A section displaying real-time status:
 - SOC: 67.33 %
 - Discharging Power: 1.64 (kW)

Figura 7.5: Guia de monitoramento da malha de VEHs para micro rede em operação ilhada

Suas funcionalidades são elencadas e descritas pelos itens numerados,

1. Identificação: Por meio deste campo deve-se entrar com o número de identificação do veículo (ID). Este ID é composto pelo número do barramento de alocação do VEH seguido do número de referência do mesmo.

2. Parâmetros: Apresenta todos os parâmetros de interesse para o operador do sistema. Esses parâmetros são obtidos pelo dispositivo inteligente interligado ao conjunto VEH-Carregador. Sendo eles
 - Modelo VEH – *'Model'*
 - Máximo Estado de Carga Permitido – *'Max SOC'*
 - Mínimo Estado de Carga Permitido – *'Min SOC'*
 - Máxima Potência de Carregamento – *'Max Charge Power'*
 - Máxima Potência de Descarregamento – *'Max Discharge Power'*
 - Habilitação para operação em modo gerador – *'Enabled Generator Mode'*
3. Estado de Operação: Indica o atual modo de operação do VEH. Para a micro rede operando em modo ilhado os estados possíveis são:
 - Gerador – *'Generator'*
 - Em espera – *'Standby'*
4. Modelo: Ilustração do modelo do VEH
5. Estado de Carregamento: Apresenta as variáveis relacionadas ao descarregamento e estado de carga do VEH.
 - Estado de carga VEH – *'SOC'*
 - Potência despachada pelo VEH – *'Discharging Power'*

8. Resultados

O trabalho proposto apresenta diversas contribuições, dentre elas destacam-se os modos operacionais possibilitados a micro redes. Sendo eles:

- Operação da Micro Rede em modo conectado à Rede Principal;
 - Micro Rede suprida por Geração Local² e Rede Principal;
 - Controle primário provido pela Rede Principal;
 - Controle secundário provido pela Rede Principal.
- Operação da Micro Rede em modo Ilhado;
 - Micro Rede autossuficiente completamente suprida por Geração local;
 - Micro Rede operando em modo de Prioridade de Cargas³. Suprimento da demanda realizado por Geração Local² e Despacho de veículos elétricos⁴;
 - Controle primário provido por barra de referência (Swing);
 - Controle secundário provido por barra de referência (Swing);
 - Micro rede ilhada sem reconexão à rede principal.
 - Micro rede ilhada com reconexão à rede principal.

² A geração local é composta por fontes despacháveis e não despacháveis com participação de geração renovável.

³ A priorização e suprimento de cargas é executada pela metodologia proposta “Política de Gerenciamento de Demanda para Micro Redes em Situação de Ilhamento baseada em Grupos de Prioridade e Período Funcional de Operação”.

⁴ Esta metodologia considera a possibilidade de despacho da energia armazenada nas baterias dos veículos elétricos para auxílio da rede em modo de operação ilhada.

- Controle primário provido por Controle *Droop* Aplicado a Micro Redes;
 - Ausência de controle secundário;
 - Controle secundário provido pelo método de Controle de Frequência baseado em *Droop* Aplicado a Micro Redes;
 - Micro rede ilhada sem reconexão à rede principal.
 - Micro rede ilhada com reconexão à rede principal.

A metodologia proposta possibilita a micro rede dois modos de operação principais. Conectada à rede principal, representando a operação da micro rede em condições normais do sistema. E modo ilhado, para condições atípicas do sistema que permitam o isolamento da micro rede.

Em modo de operação conectado à rede principal, o suprimento da micro rede é parcialmente provido pela geração local e complementado pela rede principal. Os controles primários e secundários são executados pela rede principal.

Em modo de operação ilhado, a micro rede pode assumir dois estados fundamentais. Completamente suprida por geração local, estado no qual toda a demanda é capaz de ser atendida pela participação de geração despachável e não despachável disponível na micro rede. E operação em modo de prioridade de carga, neste modo a política de gerenciamento de demanda para micro redes em situação de ilhamento baseada em grupos de prioridade e período funcional de operação proposta é utilizada para determinação da demanda a ser suprida que maximiza a utilidade do potencial energético disponível.

Para o modo de operação ilhado, em ambos estados de suprimento, dois métodos de controle primário são disponibilizados. O primeiro, controle primário provido por barra de referência pode ser executado por uma ou mais barras pré-definidas com reserva de geração suficiente para execução do controle, similar ao procedimento da

barra swing em fluxos de potência, se torna responsável por absorver os desvios de geração-demanda do sistema. Uma vez que sistemas desequilibrados são passíveis consideração, barras distintas podem ser utilizadas para regulação de diferentes fases. O segundo método, controle primário provido por método *droop*, associa a metodologia *droop* aos geradores despacháveis da micro rede a fim de torná-los responsáveis pela regulação primária.

Para o controle primário provido por barra de referência um controle secundário também provido por barra de referência pode ser associado, e caso seja de interesse, sua participação pode ser dividida por uma ou mais barras pré-estabelecidas, com diferentes índices de contribuição associados e até mesmo a adoção de barras distintas para regulação de diferentes fases. É importante ressaltar que a execução de controle por uma ou poucas unidades geradoras do sistema limita sua resposta a perturbações, deixando-o mais vulnerável a situações que podem levar a instabilidade do sistema.

Para o controle primário provido por método *droop*, duas situações de controle secundário podem estar presentes. A primeira é a ausência de controle secundário, essa configuração é proposta devido a regulação satisfatória proporcionada pelo controle primário por método *droop* em sistemas com variações de demanda e geração moderadas, e associado ao fato do controle ser executado praticamente de maneira local sem grandes necessidades de investimentos em infraestrutura e integração. Uma vez que sua atuação é diretamente relacionada a demanda do sistema e ao estatismo das unidades geradoras. A segunda é a consideração do controle secundário provido pelo método de Controle de Frequência baseado em *Droop*, esta opção permite a operação da micro rede em níveis de referência de frequência até mesmo para variações de demanda e geração significativas. Deve-se observar que a operação da micro rede ilhada considerando o controle primário provido por método *droop* sem associação de controle secundário, por vezes, pode ser suficiente para manutenção do sistema dentro dos limites operativos de frequência, contudo o sistema só operará em níveis de referência quando associada uma metodologia de controle secundário.

Ao total 13 configurações (1 operação conectada à rede principal + 2 modos operacionais ilhados x 2 cenários de ilhamento x 3 modos de controle) fundamentais são

possibilitadas por este trabalho para operação de micro redes, estando estas apresentadas na Tabela 8.1.

Tabela 8.1: Cenários fundamentais de operação da micro rede

Controle Primário	Controle Secundário	Operação da Micro Rede				
		<i>Conectada à Rede Principal</i>	<i>Modo Ilhado</i>			
			<i>Autossuficiente - Geração Local</i>		<i>Gerenciamento de Demanda</i>	
		<i>Geração Local e Rede Principal</i>	<i>Sem Reconexão</i>	<i>Com Reconexão</i>	<i>Sem Reconexão</i>	<i>Com Reconexão</i>
<i>Rede Principal</i>	<i>Rede Principal</i>	Cenário 1	-	-	-	-
<i>Barra de Referência</i>	<i>Barra de Referência</i>	-	x	Cenário 2	x	x
<i>Controle Droop Aplicado a Micro Redes</i>	<i>Ausência de Controle Secundário</i>	-	x	x	Cenário 3.1	Cenário 3.2
	<i>Método de Controle de Frequência baseado em Droop</i>	-	x	x	Cenário 4.1	Cenário 4.2

x – Cenários de operação da micro rede.

Os Cenários 1, 2, 3.1 e 4.2 são detalhados ao longo desta seção, enquanto os resultados dos Cenários 3.2 e 4.1 estão ilustrados nos Apêndices A e B. Os Cenários ‘x’ representam cenários fundamentais de operação da micro rede, porém não são discutidos neste trabalho por não apresentarem características operacionais/funcionais significativamente diferentes dos previamente citados.

Deve-se notar que cada configuração pode gerar subcasos distintos relacionados a capacidade de sobrevivência ao período de ilhamento e a influência dos distintos participantes do sistema nessa capacidade, como volume de energia armazenada nos VEHs, potência instalada disponível para despacho, geração local não despachável, período funcional dos grupos de carga, entre outros.

8.1 Sistema teste

A micro rede considerada neste trabalho é baseada no sistema teste IEEE 34 barras. Esse sistema representa uma rede de distribuição real localizada no Arizona – EUA. Se trata de um sistema aéreo com topologia radial, derivações monofásicas, reguladores de tensão, compensação shunt por capacitores e cargas concentradas e distribuídas representadas pelo modelo potência constante. A tensão de linha base da rede é de 24.9 (kV) e a potência base de 2500 (kVA) [61].

Para adequação deste sistema as necessidades deste trabalho algumas modificações foram consideradas, estando descritas pelas seções a seguir.

8.1.1 Cargas Instaladas

Para este sistema as considerações de carga apresentadas por [17] são adotadas. Deste modo, cada nó trifásico representa um conjunto de 15 unidades consumidoras residenciais, cada uma com 1 veículo elétrico ou híbrido recarregável. Para os nós monofásicos, considera-se um conjunto de 5 unidades consumidoras residências, cada uma com 1 automóvel. A exceção ocorre para o nó 800 que representa a conexão da micro rede com a Rede Principal, no qual não existe nenhum veículo ou carga conectada, e para o nó 810 que se trata de um nó monofásico com 6 automóveis.

Neste sistema foram consideradas 2 cargas especiais. A primeira representa um edifício comercial-residencial conectado ao nó 848 composto por 60 apartamentos, cada um com uma vaga na garagem, totalizando 60 veículos. A segunda carga especial se trata de um *shopping center* localizado no nó 840. O estacionamento não permite o carregamento de veículos durante pernoites. Assim a carga se resume à demanda da unidade consumidora no período de 22:00h às 9:00h.

Totalizando 446 veículos conectados ao sistema.

8.1.2 Perfil da Demanda

O período sob análise consiste em um período noturno compreendido entre 22:00h às 6:00h. A amostragem da curva de demanda ocorre em intervalos de medições de 15 minutos, considerando assim a carga do respectivo nó constante nos próximos 15 minutos. A participação da demanda referente aos veículos elétricos depende da potência de carregamento que o mesmo pode ter associada, sendo esta dependente da demanda associada ao barramento, nível de carga de cada unidade, número de veículos conectados ao barramento, máxima potência de carregamento da unidade VEH, máxima potência de carregamento do barramento.

O perfil de carga da demanda do sistema normalizado é ilustrado pela Figura 8.1.

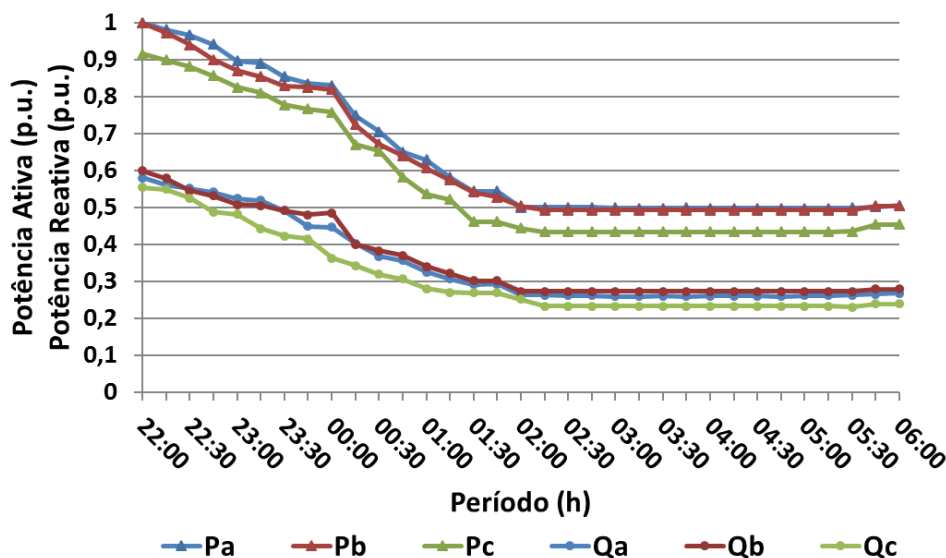


Figura 8.1: Perfil de carga da demanda do sistema

8.1.3 Restrições Técnicas

Para a garantia da coerência dos resultados obtidos com a realidade do sistema, algumas restrições técnicas foram consideradas. Essas restrições se referem a parâmetros técnicos do sistema como limites de condução e térmicos de transformadores e condutores, parâmetros do conjunto VEH-Carregador e limites operacionais do sistema.

- Potência máxima de condução Nó Monofásico: 100 (kW);
- Potência máxima de condução Nó Trifásico: 100 (kW);
 - Exceções:
 - Potência máxima de condução Nó 848, Edifício residencial-comercial: 300 (kW);
 - Potência máxima de condução Nó 840, *Shopping Center*: 2000 (kW);
- Máxima Potência de Carregamento VEH: 4 (kW);
- Máxima Potência de Descarregamento (Despacho) VEH: 4 (kW);

A partir dessas restrições e da atuação dos reguladores de tensão, controle primário e controle secundário, os limites operacionais de tensão e frequência para micro redes em situações de operação conectada à rede principal, e ilhada com suprimento completamente executado por geração local são respeitados. Para o modo de operação ilhada, há a necessidade da consideração de políticas de priorização e corte de cargas.

8.1.4 Geração Local Despachável

Neste trabalho dois cenários de geração são considerados.

O primeiro cenário apresenta uma configuração de micro rede com autossuficiência energética, possuindo geração local despachável executada por duas plantas, uma Pequena Central Hidroelétrica⁵ (PCH) com capacidade de geração máxima de 5 (MW) localizada no Nó 800 e uma Central Termoelétrica (CTE) com potência de geração máxima de 3 (MW) alocada ao Nó 856.

Em situações de operação normal, conectada à rede principal, sua contribuição é fixada em 3000 (kW) para a pequena central hidroelétrica e 2500 (kW) para a central termoelétrica. Estes dados estão sintetizados na Tabela 8.2.

⁵ PCH - Classificação para empreendimentos hidroelétricos entre 3 MW e 30 MW de potência instalada, Lei nº 13.097.

Tabela 8.2: Dados geração local despachável

Unidade de Geração	Nó de Alocação	Máxima Nominal de Geração (MW)	Potência de Despacho Operação Normal (MW)
<i>PCH</i>	800	5,0	3,0
<i>CTE</i>	856	3,0	2,5

Para o segundo cenário, uma perspectiva de micro rede sem autossuficiência energética é apresentada. A geração local despachável é executada por uma Central Geradora Hidrelétrica⁶ (CGH) com capacidade de geração máxima de 2,5 (MW) e uma Central Termoelétrica (CTE) com potência de geração máxima de 1 (MW), ambas alocadas nas mesmas posições do cenário anterior.

Em situações de operação normal, conectada à rede principal, sua contribuição é fixada em 2000 (kW) para a central geradora hidroelétrica e 700 (kW) para a central termoelétrica.

Estes dados estão sintetizados na Tabela 8.3.

Tabela 8.3: Dados geração local despachável

Unidade de Geração	Nó de Alocação	Máxima Nominal de Geração (MW)	Potência de Despacho Operação Normal (MW)
<i>CGH</i>	800	2,5	2,0
<i>CTE</i>	856	1,0	0,7

Para ambos os cenários de geração, em situações de ilhamento as potências de despacho são primeiramente ajustadas pelo controle primário, e caso disponível/selecionado, redespachadas pelo controle secundário para operação da micro rede em nível de referência de frequência.

⁶ CGH - Classificação para empreendimentos hidroelétricos entre 1 MW e 3 MW de potência instalada, Lei nº 13.097.

8.1.5 Geração Local não Despachável

A geração local não despachável é composta por unidades de geração renováveis eólicas e solares. As potências produzidas por essas unidades são dependentes da disponibilidade de recurso natural e diretamente despachadas a micro rede sem nenhuma opção de controle no despacho.

Os dados das fontes de geração eólica são apresentados na Tabela 8.4, enquanto os dados das unidades geradoras solares são descritos pela Tabela 8.5.

Tabela 8.4: Dados geração local não despachável - Eólica

Unidade de Geração	Nó de Alocação	Velocidade de cut in (ω_{ci}) (m/s)	Velocidade de cut off (ω_{co}) (m/s)	Velocidade nominal (ω_r) (m/s)	Potência Nominal de Geração (kW)
Eólica	822	4	12	8	225,0
Eólica	826	4	12	8	450,0
Eólica	838	4	12	8	450,0

O perfil da velocidade do vento utilizado no processo de simulação foi obtido por medições reais [41], estando ilustrado pela Figura 8.2.

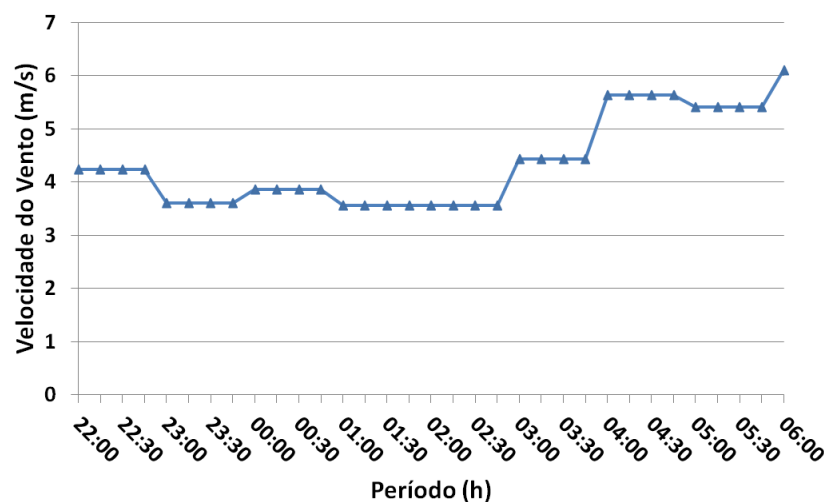


Figura 8.2: Perfil da velocidade do vento

Tabela 8.5: Dados geração local não despachável - Solar

Unidade de Geração	Nó de Alocação	Nº de placas série (Ns)	Nº de placas paralelas (Np)
<i>Solar</i>	800	6	100
<i>Solar</i>	856	6	100

Uma vez que as análises são desenvolvidas para um período noturno, não há incidência solar e produção energética por tais fontes.

8.1.6 Veículos Elétricos e Híbridos - VEHs

Para este estudo foram utilizados dados reais de veículos comerciais coletados a partir de informações fornecidas pelos fabricantes, estando as características fundamentais apresentadas na Tabela 8.6. A primeira coluna de informações indica a tecnologia do sistema de armazenamento empregada, seguida da capacidade nominal de armazenamento de energia e do percentual de energia útil da bateria, correspondente a profundidade máxima de descarga (DOD).

Tabela 8.6: Dados dos veículos utilizados [17]

Modelo	Tipo de bateria	Capacidade de energia (kWh)	Profundidade máxima de descarga (DOD)
<i>Modelo 1</i>	NiMH	27.4	80%
<i>Modelo 2</i>	Li-ion	5.33	60%
<i>Modelo 3</i>	Li-ion	16	65%
<i>Modelo 4</i>	Li-ion	24	65%
<i>Modelo 5</i>	Li-ion	16	65%

Visando a aderência da simulação a realidade, a determinação dos estados de carga inicial e dos modelos de VEHs conectados em cada posição disponível no sistema

é executada de maneira aleatória, tendo em vista que estas condições são variáveis e não determinísticas.

8.1.7 Níveis de Prioridade de Carga

Para a execução do gerenciamento da micro rede em situações de ilhamento, zonas de concentração de carga com possibilidade de atuação do operador do sistema por ações de chaveamento devem ser criadas e terem associadas um nível de prioridade.

Essa priorização pode ser executada por meio de grupos de prioridade como apresentado por [62], onde a classificação das cargas é relacionada ao tipo de consumidor. Essa categorização é apresentada na Tabela 8.7.

Tabela 8.7: Nível de Prioridade de consumidores [62]

Classificação	Consumidores
<i>Grupo 1</i>	Atendimento Médico, Transportes, Telecomunicações, Iluminação Pública.
<i>Grupo 2</i>	Industriais e Comerciais
<i>Grupo 3</i>	Residenciais

Neste trabalho propõe-se a divisão das cargas em três níveis de prioridade e assume-se que há capacidade de corte de carga em cada barramento do sistema. As cargas podem manifestar três níveis de prioridade. E uma vez definida sua classe de prioridade, as mesmas serão associadas ao grupo de prioridade relativo à sua classe e ao dos níveis de prioridade subsequentes.

Os níveis de maior para a menor prioridade são definidos por:

$$LV '1' \rightarrow LV '2' \rightarrow LV '3'$$

Os níveis e grupos de prioridade que cada barramento do sistema se encontram associados são apresentados pela Tabela 8.8.

Tabela 8.8: Nível e grupo de prioridade de cada barramento do sistema

Barramento	Nível de Prioridade	Grupo de Prioridade <i>LV '1'</i>	Grupo de Prioridade <i>LV '2'</i>	Grupo de Prioridade <i>LV '3'</i>
800	1	x	x	x
802	1	x	x	x
806	1	x	x	x
808	1	x	x	x
810	1	x	x	x
812	1	x	x	x
814	1	x	x	x
850	1	x	x	x
816	1	x	x	x
818	1	x	x	x
820	1	x	x	x
822	3	-	-	x
824	3	-	-	x
826	3	-	-	x
828	3	-	-	x
830	1	x	x	x
854	1	x	x	x
856	1	x	x	x
852	3	-	-	x
832	3	-	-	x
888	2	-	x	x
890	2	-	x	x
858	2	-	x	x
864	3	-	-	x
834	3	-	-	x
842	3	-	-	x
844	3	-	-	x
846	3	-	-	x
848	3	-	-	x
860	3	-	-	x
836	3	-	-	x
862	3	-	-	x
840	3	-	-	x
838	3	-	-	x

Deve-se ressaltar que o número de grupos de prioridade pode ser variado a critério do operador do sistema, não estando necessariamente limitado a três níveis de prioridade.

O suprimento completo a toda a demanda da micro rede e aos VEHS em processo de carregamento é definindo como grupo de prioridade de nível 4 (*LV '4'*). Sendo este modo operativo inerente a configuração de operação micro rede conectada à rede principal.

8.1.8 *Período Funcional de Operação*

Associado ao nível de prioridade de carga, a metodologia proposta para gerenciamento da demanda em situações de ilhamento utiliza o conceito de período funcional de operação para tomada de decisões. Deste modo, para cada grupo de prioridade deve-se associar o respectivo período funcional de operacional.

Os períodos funcionais adotados para cada grupo de prioridade são indicados na Tabela 8.9.

Tabela 8.9: Nível de prioridade de cada barramento do sistema

Nível de Prioridade	Período Funcional (min)
<i>LV '1'</i>	120
<i>LV '2'</i>	60
<i>LV '3'</i>	-

Ao grupo de menor prioridade, nesta análise o de *LV '3'*, não há necessidade de associação de período funcional, uma vez que este grupo representa o sistema operando sem corte de carga.

8.1.9 *Dispositivos Inteligentes*

Para execução das metodologias de controle e gerenciamento propostas, a consideração de dispositivos inteligentes ao longo do sistema associada a uma infraestrutura de telecomunicação eficaz, capaz de permitir a aquisição e envio de dados

entre o agente operador do sistema e os dispositivos inteligentes para execução de ações de controle é fundamental.

Deste modo, a seguir são apresentados os requisitos mínimos de dispositivos inteligentes e funcionalidades requeridas para implementação das metodologias propostas.

1. *Carregamento Controlado e Operação de VEHs como Unidades Armazenadoras de Energia Despacháveis*

- Dispositivo Inteligente conectado ao conjunto VEH-Carregador
 - Dados enviados e recebidos pelo dispositivo
 - Modelo VEH;
 - Modo de Operação;
 - Estado de carga;
 - Estado de carga máximo e mínimo permitido;
 - Potência de carregamento e descarregamento VEH.

2. *Controle Secundário e Ajuste do Despacho das Unidades Geradoras*

- Medidores de potência nodais
 - Dados fornecidos pelo dispositivo
 - Demanda atualizada do ponto de conexão a cada iteração.

Para esta ação de controle os medidores podem ser substituídos, ou reduzidos em quantidade, por uma ferramenta de previsão da demanda do sistema. A aplicação de *Phasor Measurement Unit* (PMU) é indicada, dada a conectividade embarcada ao equipamento, contudo não se limita a este equipamento.

3. *Política de Suprimento para Micro Redes baseada em Grupos de Prioridade e Período Funcional – Processo de Corte de Carga*

- Chaves telecomunicadas ou dispositivo controlado semelhante

- Ação física de corte de carga.

8.1.10 Diagrama Micro Rede

Ao fim, executadas as considerações dos componentes e características da micro rede adotada neste trabalho (cargas instaladas, perfil de demanda, restrições técnicas, geração local, VEHs e dispositivos inteligentes), seu diagrama representativo é ilustrado na Figura 8.3.

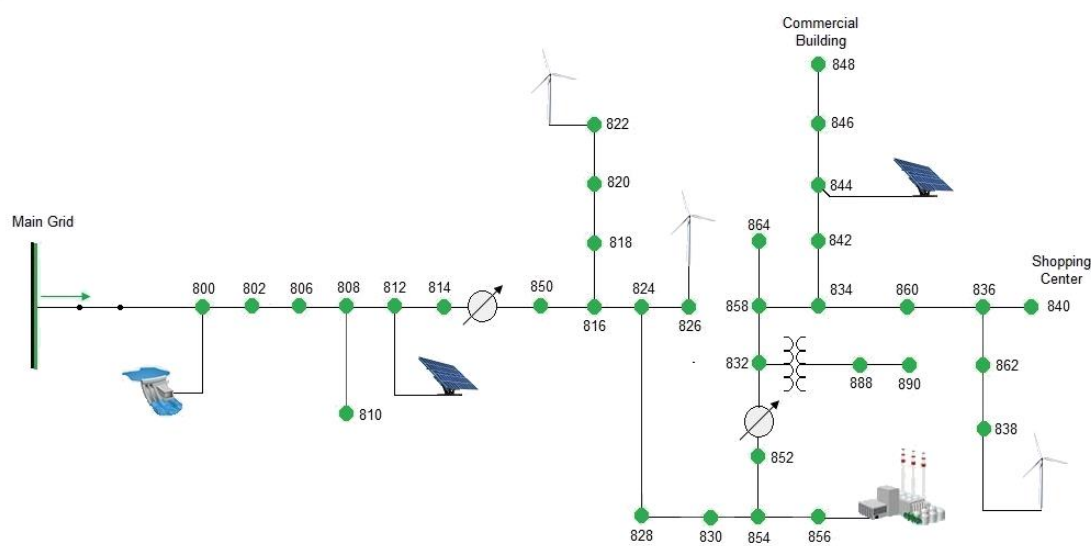


Figura 8.3: Micro rede baseada no sistema teste IEEE 34 barras

Como considerações sobre o sistema IEEE 34 barras, os ramos com linhas superiores a 25.000 pés foram compensados de modo a permitir maior carregamento e alocação de geração local à micro rede.

Os parâmetros do sistema em formato *IEEE Common Data Format (CDF)* e o perfil de carga utilizados nos processos de simulação são disponibilizados nos Anexos A e B.

8.2 Operação da Micro Rede em Modo Conectado à Rede Principal

O primeiro cenário de operação da micro rede consiste na representação da micro rede em modo de operação conectada à rede principal. Nesta configuração o suprimento pela rede principal é mantido durante toda a análise, e o processo de carregamento de VEHs executado de maneira satisfatória, possibilitando assim a análise da metodologia de carregamento controlado proposta e a observação da influência que o processo de carregamento exerce sobre a micro rede.

Para este cenário as seguintes características são associadas a micro rede:

- Operação da Micro Rede em modo conectado à Rede Principal;
 - Micro Rede suprida por Geração Local⁷ e Rede Principal;
 - Controle primário provido pela Rede Principal;
 - Controle secundário provido pela Rede Principal.

A seguir os resultados obtidos para esta configuração, definida como Cenário 1, são apresentados e discutidos para os principais parâmetros de interesse.

8.2.1 *Demanda Micro Rede*

A análise é desenvolvida para um período noturno compreendido entre 22:00h e 6:00h buscando a observação do comportamento do sistema durante o processo de carregamento de VEHs.

A Figura 8.4 apresenta o perfil de demanda da micro rede. Por ela observa-se um comportamento típico com decrescimento da demanda ao decorrer das horas, seguida de uma leve retomada de carga ao início da manhã.

⁷ A geração local é composta por fontes despacháveis e não despacháveis com participação de geração renovável.

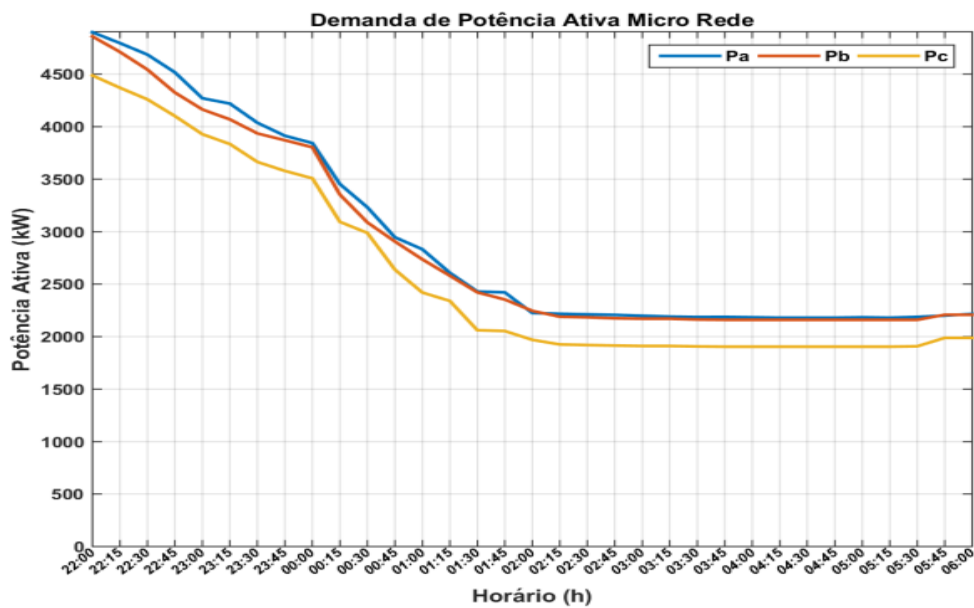


Figura 8.4: Demanda de potência ativa micro rede – Cenário 1

8.2.2 Geração, Demanda e Perdas Trifásicas Micro Rede

A Figura 8.5 ilustra os perfis de geração, demanda e perdas trifásicas relativos a micro rede, que por se tratar de um sistema de distribuição possui uma razão R/X significativa, observável pelo volume de perdas do sistema.

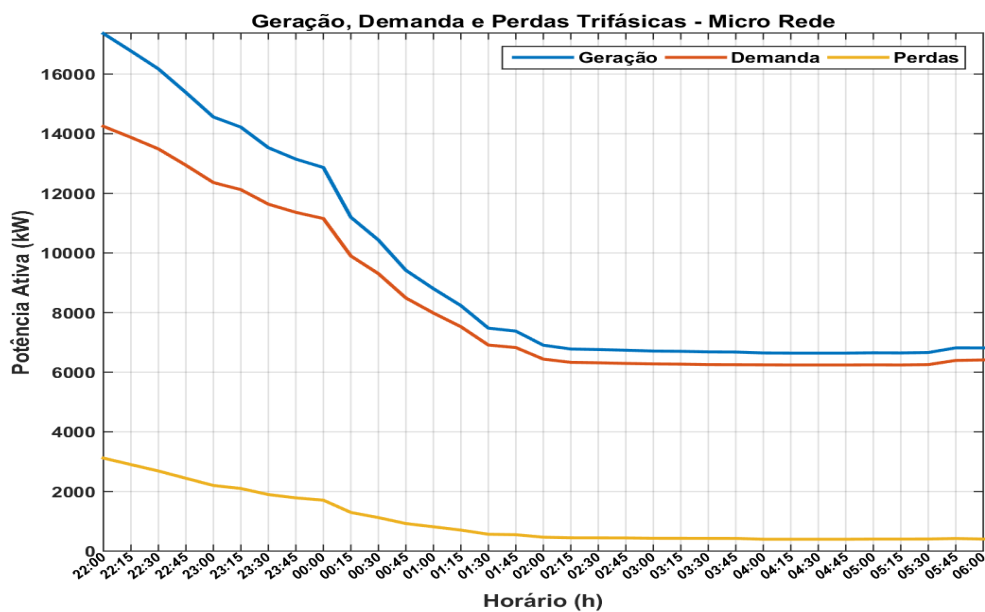


Figura 8.5: Geração, demanda e perdas trifásicas micro rede – Cenário 1

8.2.3 Geração Micro Rede

A potência ativa suprida a micro rede, quando em modo de operação conectado à rede principal, é executada por dois contribuidores: a própria rede principal e pela geração local despachável e não despachável (fontes renováveis). Deve-se notar que a participação de VEHs como unidades armazenadoras de energia despacháveis só ocorre quando a micro rede está em operando em modo ilhado e não possui autossuficiência energética.

A Figura 8.6 apresenta em uma perspectiva geral a parcela de contribuição na geração de cada grupo à micro rede, que é posteriormente detalhada nas seções subsequentes.

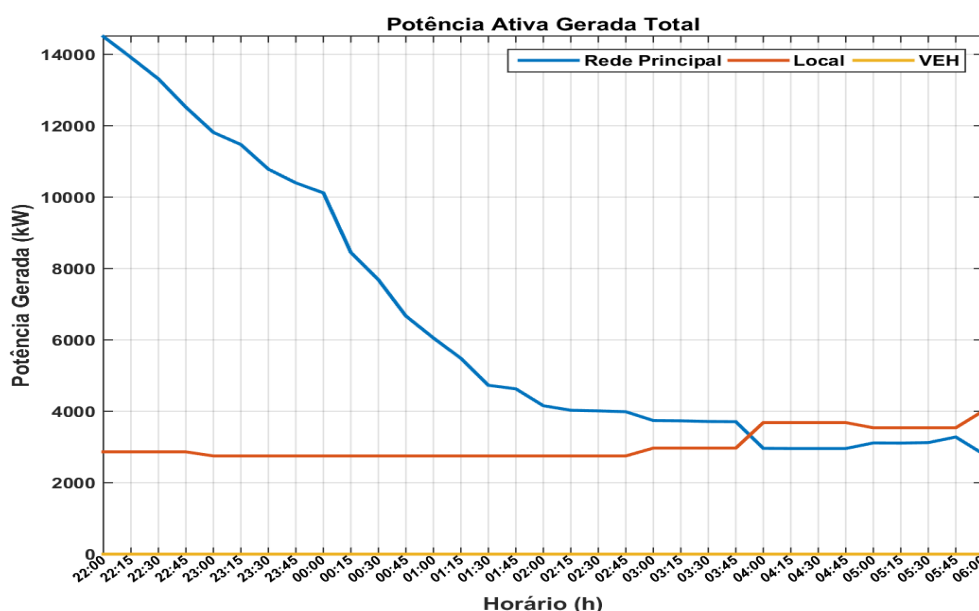


Figura 8.6: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal, geração local e VEHs – Cenário 1

8.2.3.1 Geração Suprida a Micro Rede – Rede Principal

A rede principal é responsável por suprir o excedente da demanda e perdas que a geração local não é capaz de atender, e proporcionar o balanceamento de potência entre as fases, como descrito pela Figura 8.7.

Em cenários de alta geração local, a rede principal também atua como importador do excedente de geração da micro rede, essa situação é observada na próxima seção através da Figura 8.20.

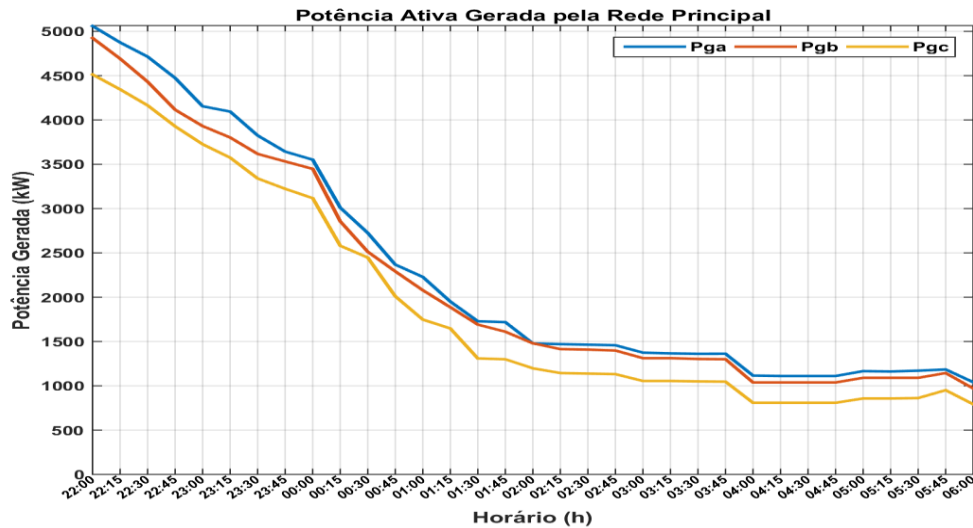


Figura 8.7: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal – Cenário 1

8.2.3.2 Geração Suprida a Micro Rede – Geração Local

A geração local por sua vez, quando em modo de operação conectado à rede principal, é balanceada e pré-estabelecida pelo operador para as unidades despacháveis e não controlada para as unidades renováveis. Sua contribuição é ilustrada pela Figura 8.8.

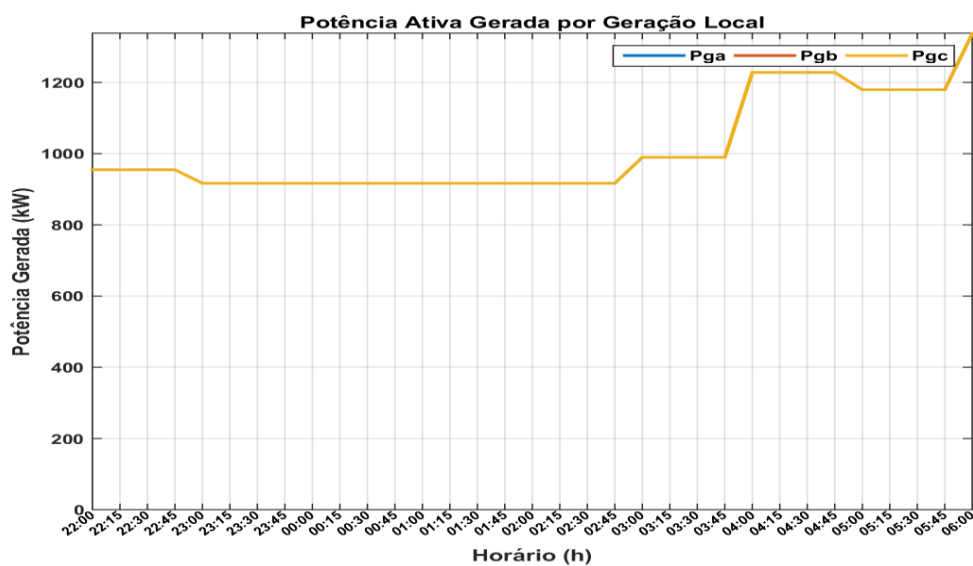


Figura 8.8: Potência ativa suprida a micro rede pela geração local – Cenário 1

8.2.4 Processo de Carregamento VEHs

O processo de carregamento de VEHs somente ocorre quando a micro rede se encontra em modo de operação conectado à rede principal.

O processo é executado de maneira controlada, sendo a velocidade de carregamento dos VEHs condicionadas as características de potência nominal do carregador, máxima potência de condução do nó, demanda e ao número de unidades VEHs conectadas ao mesmo nó.

8.2.4.1 Unidades VEHs em Processo de Carregamento

A Figura 8.9 apresenta o número de unidades VEHs em processo de carregamento durante o período analisado. É possível observar que o número de unidades VEHs em processo de carregamento decresce a uma taxa exponencial, estando completamente executado às 3:45h.

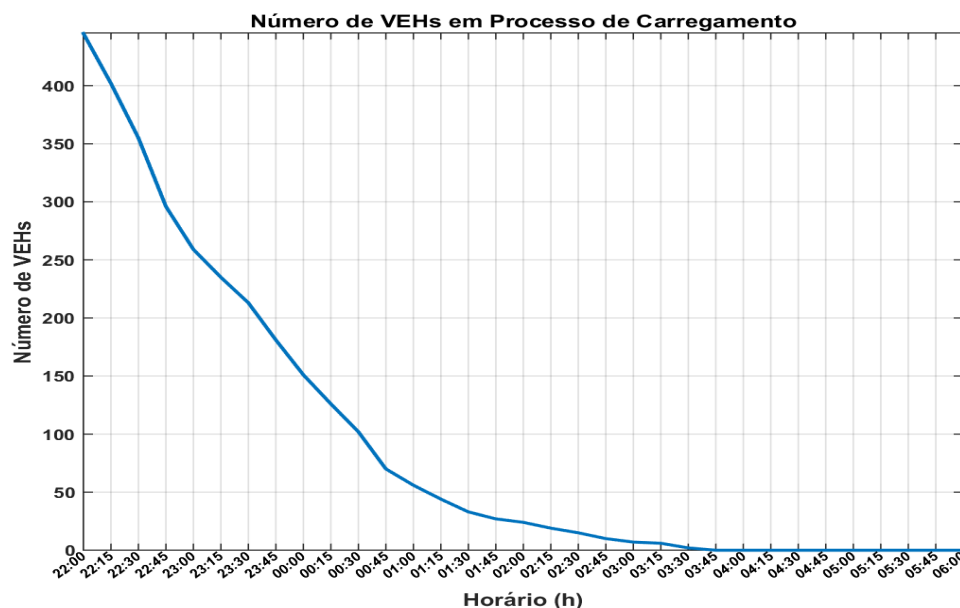


Figura 8.9: Número de VEHs em processo de carregamento – Cenário 1

8.2.4.2 Energia Armazenada nas Unidades VEHs

Por outro lado, a energia armazenada nas unidades VEHs cresce exponencialmente até a estabilização, quando todos os VEHs têm o processo de carregamento completamente executado, como descrito pela Figura 8.10.

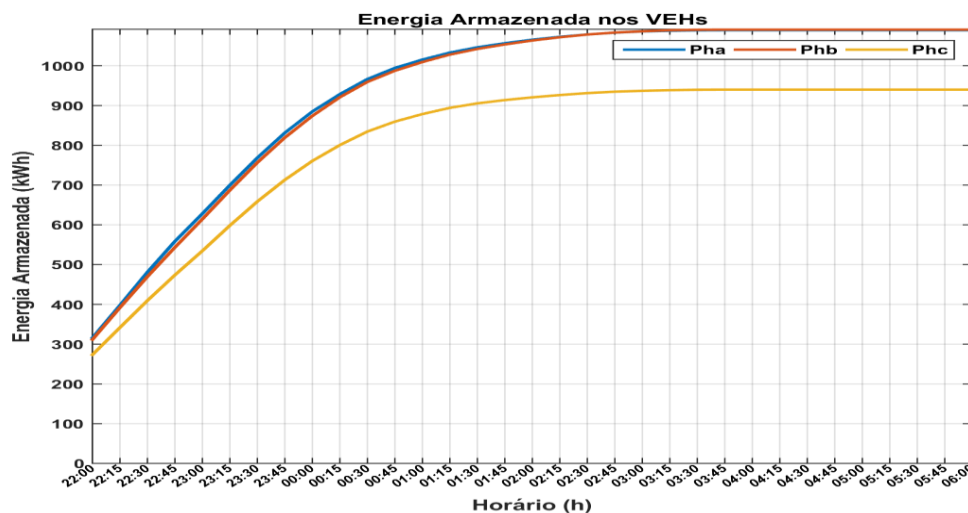


Figura 8.10: Energia armazenada nas unidades VEHs – Cenário 1

8.2.4.3 Potência Disponível para Despacho das Unidades VEHs

A potência disponível para despacho das unidades VEHs segue um perfil similar a energia armazenada, crescem exponencialmente até a estabilização, como ilustrado pela Figura 8.11.

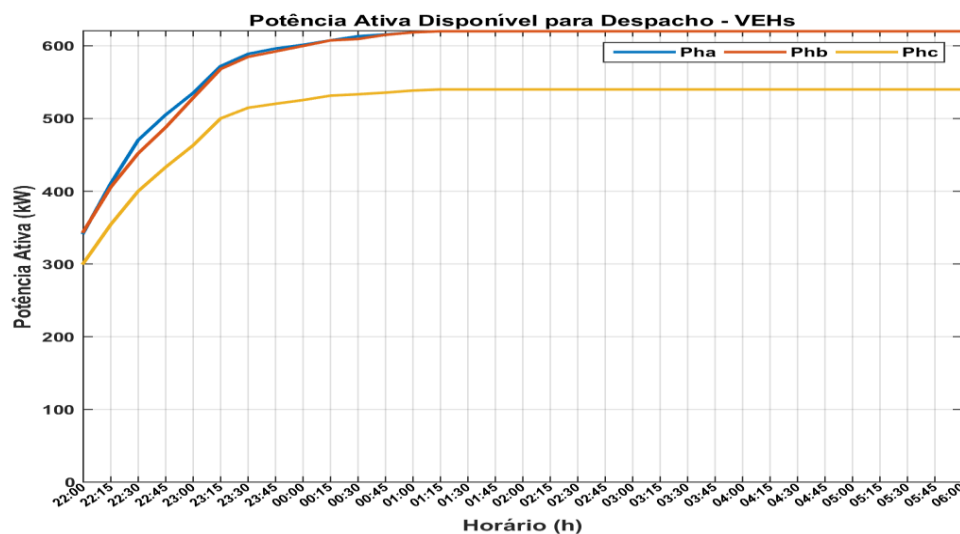


Figura 8.11: Potência ativa disponível para despacho nas unidades VEHs – Cenário 1

8.2.5 Perfil de Tensão – Micro Rede

As tensões da micro rede necessitam estar contidas entre os limites máximos e mínimos estabelecidos, que para sistemas de distribuição tradicionalmente são adotados como 1,05 p.u. e 0,95 p.u..

A Figura 8.12 apresenta os valores máximos e mínimos de tensão da micro rede para cada fase, constatando que durante todo o período analisado não ocorreu nenhuma violação dos limites de tensão.

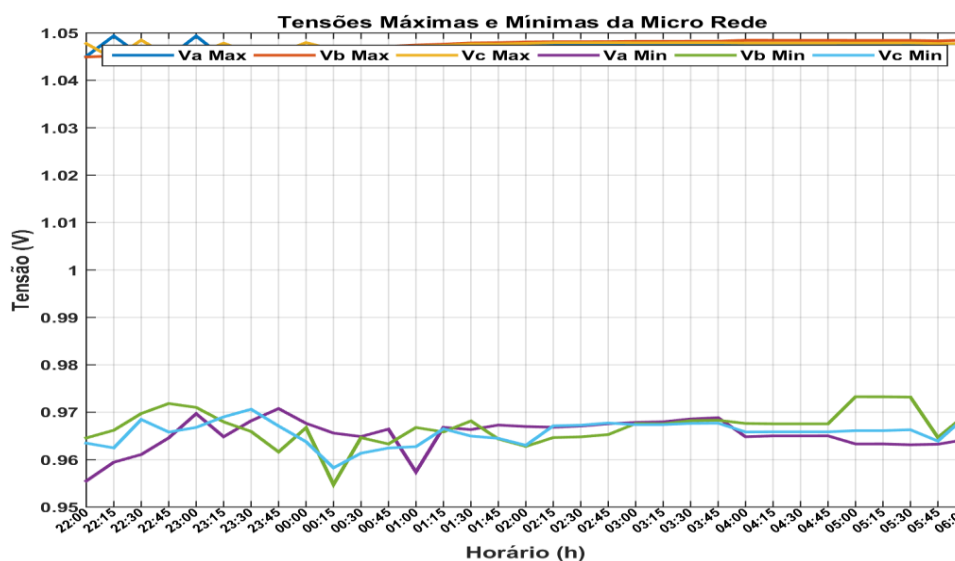


Figura 8.12: Tensões máximas e mínimas da micro rede por fase – Cenário 1

8.2.5.1 Regulação de Tensão - LTCs

Para a manutenção dos valores de tensão da micro rede dentro dos limites operacionais estabelecidos, dois reguladores de tensão são utilizados. A posição dos TAPs dos reguladores é ilustrada pela Figura 8.13 e Figura 8.14.

Diferentemente da regulação tradicional, que visa conferir valor de referência a barra na qual o regulador está alocado. A metodologia empregada neste trabalho busca a garantia da manutenção dos limites de tensão, para isso executa a regulação de tensão pela barra de menor valor de tensão em sua zona de influência.

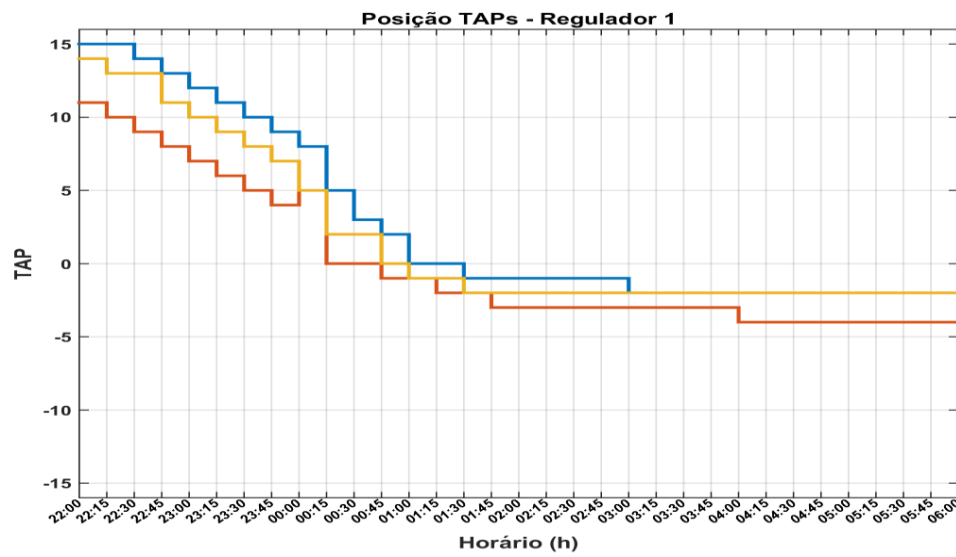


Figura 8.13: Posição dos taps do regulador 1 – Cenário 1

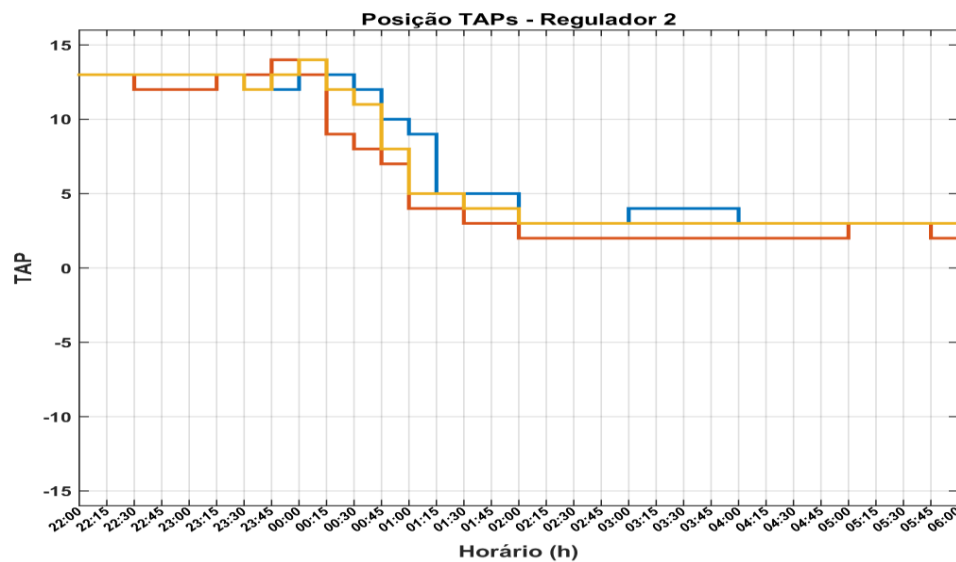


Figura 8.14: Posição dos taps do regulador 2 – Cenário 1

8.2.6 Frequência – Micro Rede

Uma vez que a micro rede se encontra conectada à rede principal, os controles primários e secundários são fornecidos pela própria rede principal. Deste modo, quando sob análise estática, a frequência da micro rede assumirá valor de referência.

A frequência da micro rede é indicada pela Figura 8.15.

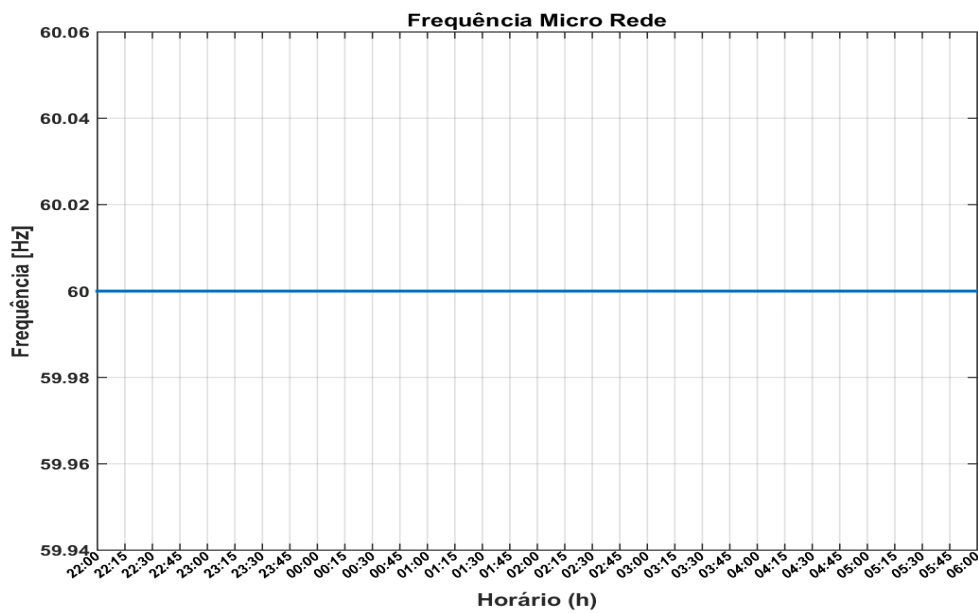


Figura 8.15: Nível de frequência da micro rede – Cenário 1

8.2.7 Grupo de Prioridade Atendido

Posto que este cenário aborda a configuração na qual a micro rede se encontra conectada à rede principal. O suprimento deverá ocorrer de maneira plena a todas as cargas do sistema (LV '4') durante todo o período analisado, como ilustrado pela Figura 8.16.

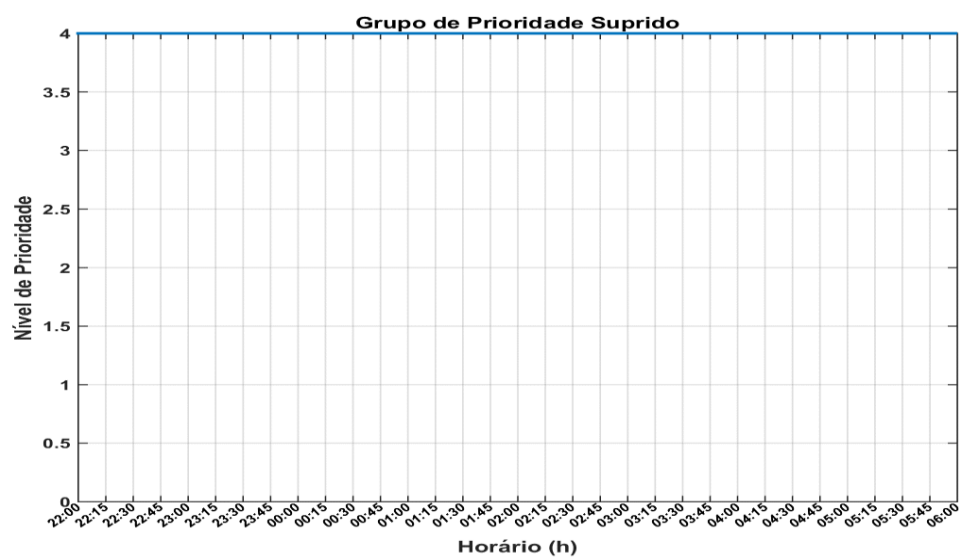


Figura 8.16: Grupo de Prioridade Atendido – Cenário 1

8.2.8 *Conclusões Parciais*

A partir dos resultados é possível observar que a metodologia de carregamento controlado de VEHs é satisfatória. O processo de carregamento é completamente executado às 3:45h, e a metodologia promove uma operação segura respeitando os limites operacionais da micro rede.

A atuação dos reguladores é adequada e fundamental para a preservação dos limites operacionais de tensão. E a frequência da micro rede, controlada pela rede principal, se mantém em nível de referência ao longo de todo período analisado.

8.3 Operação Da Micro Rede em Modo Ilhado

A micro rede em modo ilhado pode assumir dois modos de operação. O primeiro consiste no ilhamento do sistema, possuindo este, autossuficiência energética por geração local. Nesta configuração, o sistema opera sem qualquer necessidade de corte de carga ou atuação de VEHs como unidades armazenadoras de energia despacháveis.

O segundo modo de operação representa o ilhamento da micro rede sem autossuficiência energética. Neste cenário, o sistema necessita de uma política de gerenciamento de demanda para a manutenção do atendimento, de modo parcial, a micro rede. Para esta condição a operação de VEHs como unidades armazenadoras de energia despacháveis pode ser requisitada.

Os casos fundamentais de operação da micro rede em modo ilhado consistem em:

- Operação da Micro Rede em modo Ilhado;
 - Micro Rede autossuficiente completamente suprida por Geração local;
 - Micro Rede operando em modo de Prioridade de Cargas. Suprimento da demanda realizado por Geração Local e Despacho de veículos elétricos;
 - Controle primário provido por barra de referência (Swing);
 - Controle secundário provido por barra de referência (Swing).
 - Micro rede ilhada sem reconexão à rede principal.
 - Micro rede ilhada com reconexão à rede principal.
 - Controle primário provido por Controle *Droop* Aplicado a Micro Redes;

- Ausência de controle secundário;
- Controle secundário provido pelo método de Controle de Frequência baseado em *Droop* Aplicado a Micro Redes.
 - Micro rede ilhada sem reconexão à rede principal.
 - Micro rede ilhada com reconexão à rede principal.

Nesta seção os modos de operação descritos pelos Cenários 2, 3.1 e 4.2 representados na Tabela 8.1 são apresentados e analisados.

8.3.1 *Micro Rede Autossuficiente – Geração Local*

O primeiro cenário de operação da micro rede em operação ilhada é apresentado pelo Cenário 2. Este cenário consiste em uma micro rede autossuficiente, capaz de ser completamente suprida por sua geração local. Nesta configuração, o sistema opera sem qualquer necessidade de corte de carga ou atuação de VEHS como unidades armazenadoras de energia despacháveis, sendo a única diferença para o modo de operação conectado à rede principal relacionada ao processo de carregamento de VEHS, que é interrompido quando em à micro rede se encontra em modo de operação ilhado.

Para o Cenário 2 as seguintes características são associadas a micro rede:

- Operação da Micro Rede em modo Ilhado;
 - Micro Rede autossuficiente completamente suprida por Geração local;
 - Controle primário provido por barra de referência (Swing);
 - Controle secundário provido por barra de referência (Swing).
 - Micro rede ilhada com reconexão à rede principal.

8.3.1.1 *Demanda Micro Rede*

Para o Cenário 2, assume-se a ocorrência de uma contingência na rede principal que leva a micro rede a necessidade de operação em modo ilhado às 22:30h com reconexão a rede principal às 1:45h.

A partir da Figura 8.17 pode-se observar que no momento de ilhamento, 22:30h, existe uma queda na demanda do sistema. Essa diminuição é oriunda da pausa no processo de carregamento de VEHS, que somente ocorre na condição operativa - micro rede conectada à rede principal, sendo retomada no momento de reconexão às 1:45h.

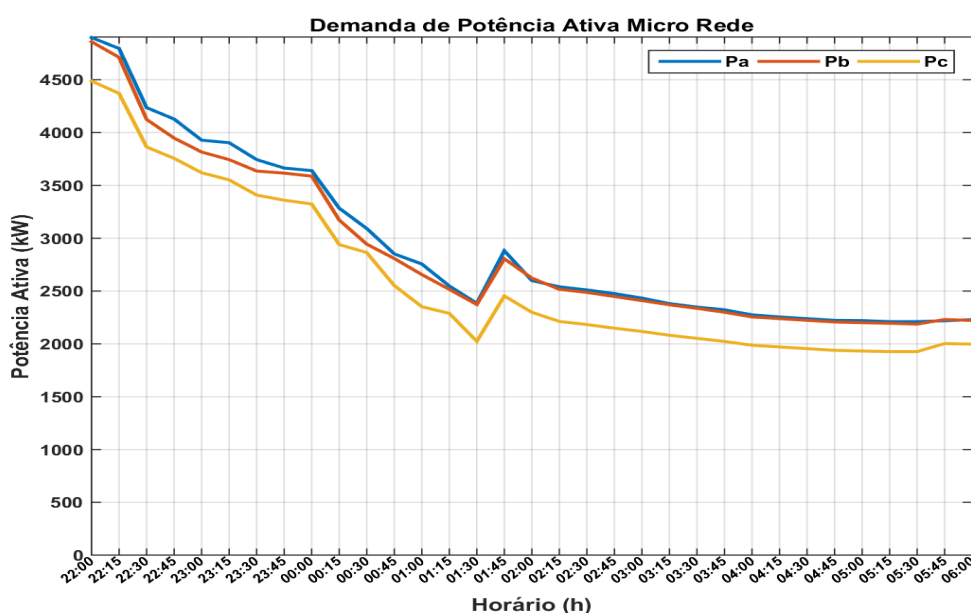


Figura 8.17: Demanda de potência ativa micro rede – Cenário 2

8.3.1.2 *Geração, Demanda e Perdas Trifásicas Micro Rede*

Os perfis de geração, demanda e perdas trifásicas relativos a micro rede são ilustrados pela Figura 8.18.

Deve-se observar que em função do ilhamento da micro rede, a demanda relacionada ao processo de carregamento de VEHS é deslocada para um período de menor demanda, o que implica na diminuição das perdas do sistema, quando comparadas com o Cenário 1 apresentado pela Figura 8.5.

Contudo, esta ocorrência implica negativamente no processo de carregamento de VEHs, que pode não ser completamente executado dentro do período desejado.

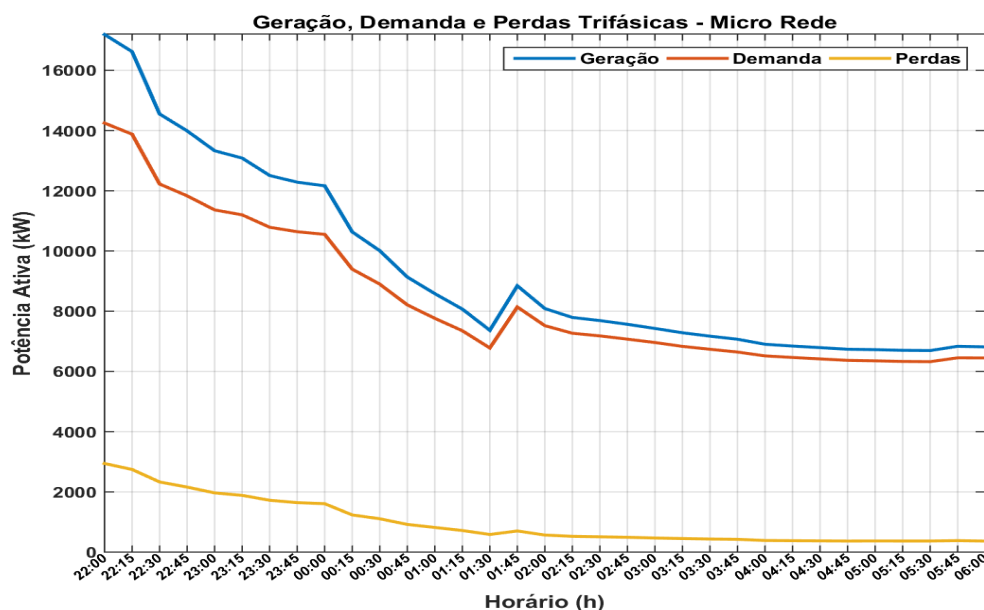


Figura 8.18: Geração, demanda e perdas trifásicas micro rede – Cenário 2

8.3.1.3 Geração Micro Rede

A Figura 8.19 apresenta as parcelas supridas à micro rede por cada grupo de geração. É possível observar que a rede principal somente contribui para o atendimento a demanda da micro rede antes do ilhamento.

Durante o processo de ilhamento a geração local é capaz de atender a demanda da micro rede de maneira satisfatória, sendo o controle primário e secundário provido por barra de referência, com atuação similar a barra swing assumindo as perdas e desbalanços de potência da micro rede.

Após a reconexão, o nível de geração local despachável é pré-determinado pelo operador e a contribuição das unidades renováveis é adicionada. Uma vez que a potência gerada localmente é superior a demanda da micro rede, não há necessidade de importação de geração da rede principal após a reconexão, bem como por se tratar de um caso com autossuficiência energética, a atuação de VEHs como unidades armazenadoras de energia despacháveis não foi necessária durante o ilhamento.

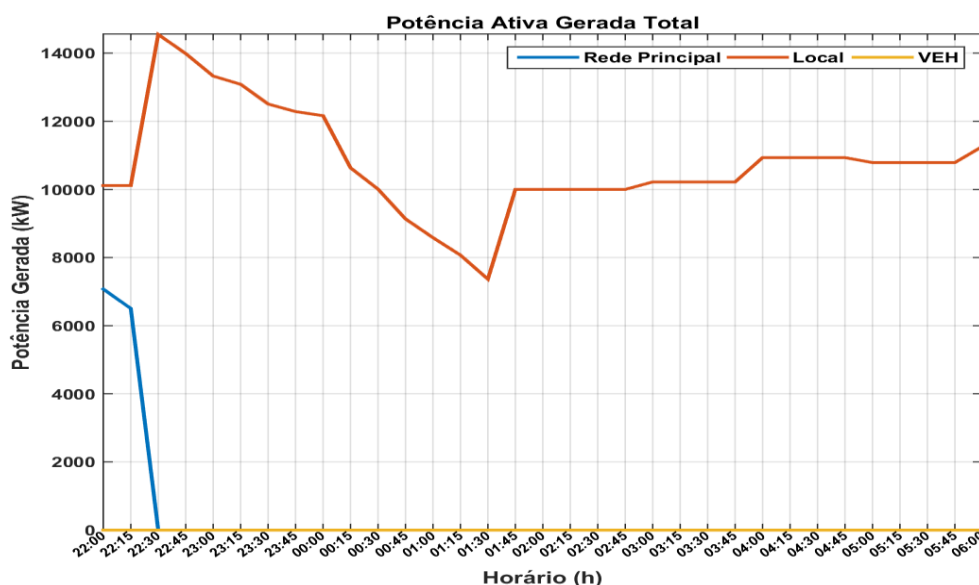


Figura 8.19: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal, geração local e VEHs – Cenário 2

8.3.1.3.1 Geração Suprida a Micro Rede – Rede Principal

A rede principal é responsável por suprir o excedente de demanda e perdas que a geração local não é capaz de atender, proporcionar balanço entre fases, tal como importar o excesso de geração da micro rede. Para o Cenário 2, todas essas funcionalidades estão presentes.

Primeiramente, em um momento anterior ao ilhamento a rede principal atua como exportador de energia e promovendo o equilíbrio de potência entre fases da micro rede. Todavia, passado o período de ilhamento e executada a reconexão à rede principal, um cenário de excesso de geração local é presenciado pela micro rede estando a rede principal a atuar como importador de energia, e por conseguinte promovendo novamente o equilíbrio entre fases.

Estas perspectivas são observadas através da Figura 8.20.

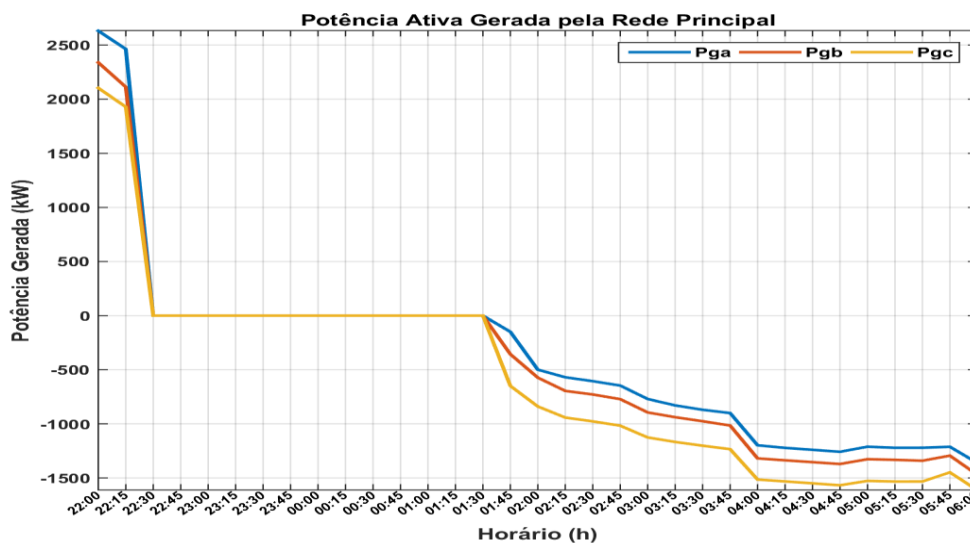


Figura 8.20: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal – Cenário 2

8.3.1.3.2 Geração Suprida a Micro Rede – Geração Local

A geração local por sua vez é composta por unidades despacháveis e não despacháveis. Sua contribuição, ilustrada pela Figura 8.21, quando em modo de operação conectado à rede principal é balanceada e pré-estabelecida pelo operador para as unidades despacháveis e não controlada para as unidades renováveis.

Quando em operação ilhada, a contribuição das unidades despacháveis pode ocorrer de modo desbalanceado para o adequado atendimento a demanda da micro rede.

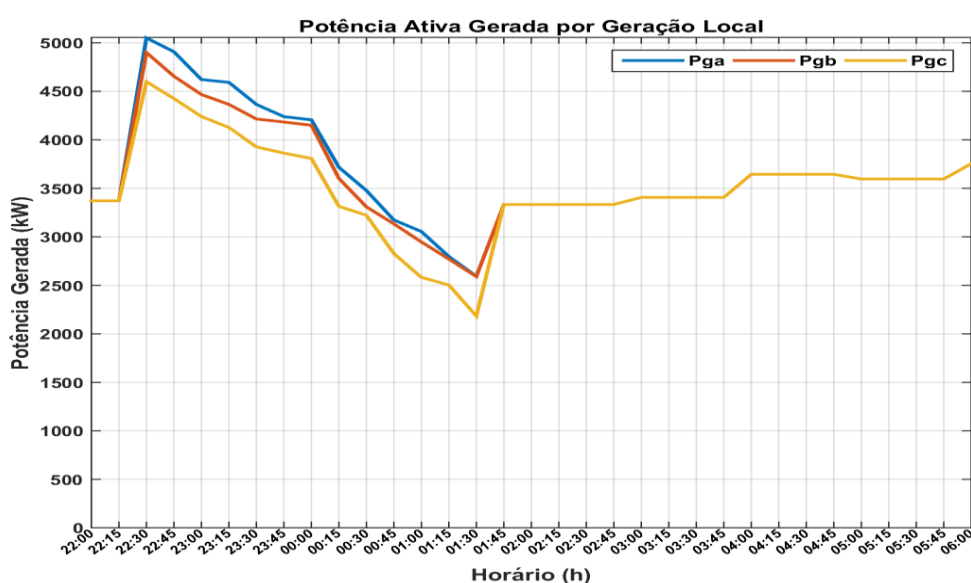


Figura 8.21: Potência ativa suprida a micro rede pela geração local – Cenário 2

8.3.1.4 Processo de Carregamento VEHs

O processo de carregamento de VEHs somente pode ocorrer para o modo de operação no qual a micro rede está conectada à rede principal. Como ilustrado pela Figura 8.9 e Figura 8.22, uma pausa no processo de carregamento ocorre às 22:30h, momento da desconexão, sendo retomado a partir da reconexão à rede principal às 1:45h.

Nesta perspectiva, a energia armazenada e potência disponível para despacho das unidades VEHs crescem exponencialmente quando a micro rede opera em modo conectado à rede principal e se mantém constantes quando ilhada, uma vez que para o cenário de autossuficiência energética não há carregamento ou despacho das unidades VEH. Essas condições são apresentadas pela Figura 8.23 e Figura 8.24.

8.3.1.4.1 Unidades VEHs em Processo de Carregamento

Devido ao ilhamento indesejado, o processo de carregamento não pode ser executado de maneira plena para todas as unidades VEHs conectadas a micro rede, como verificado pela Figura 8.22.

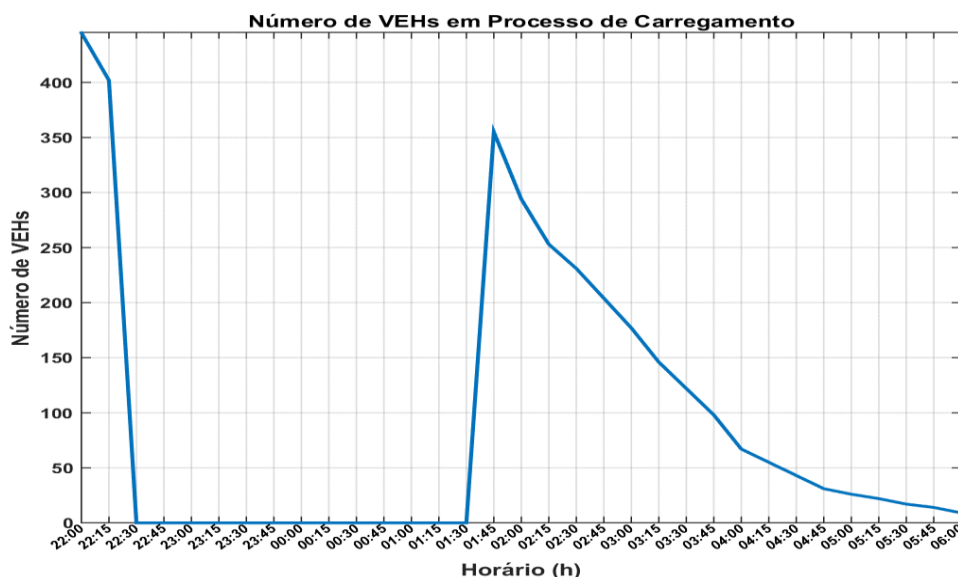


Figura 8.22: Número de VEHs em processo de carregamento – Cenário 2

8.3.1.4.2 Energia Armazenada nas Unidades VEH

A energia armazenada nas unidades VEH é apresentada pela Figura 8.23.

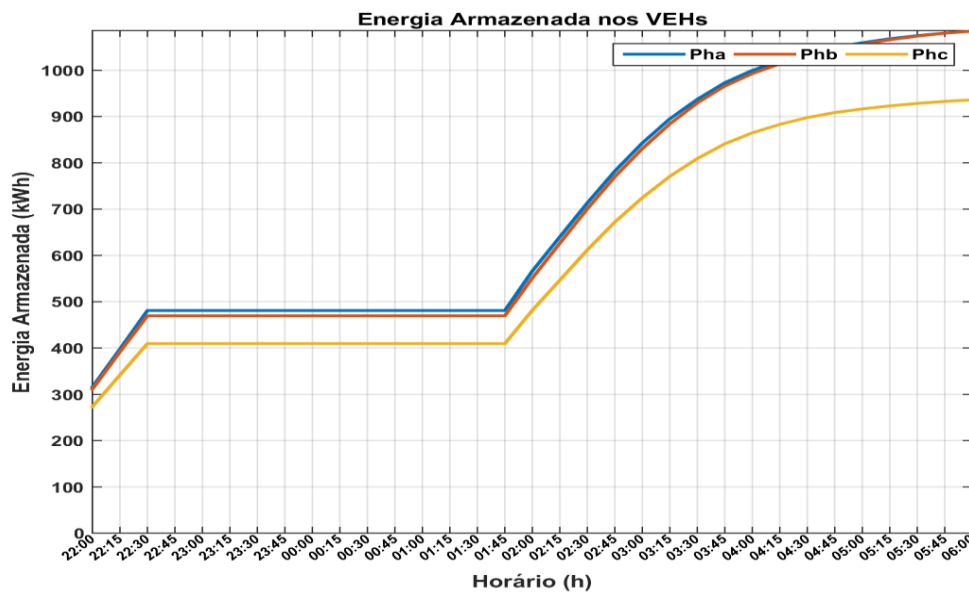


Figura 8.23: Energia armazenada nas unidades VEHs – Cenário 2

8.3.1.4.3 Potência disponível para despacho das unidades VEH

E a potência disponível para despacho das unidades VEH pode ser observada pela Figura 8.24.

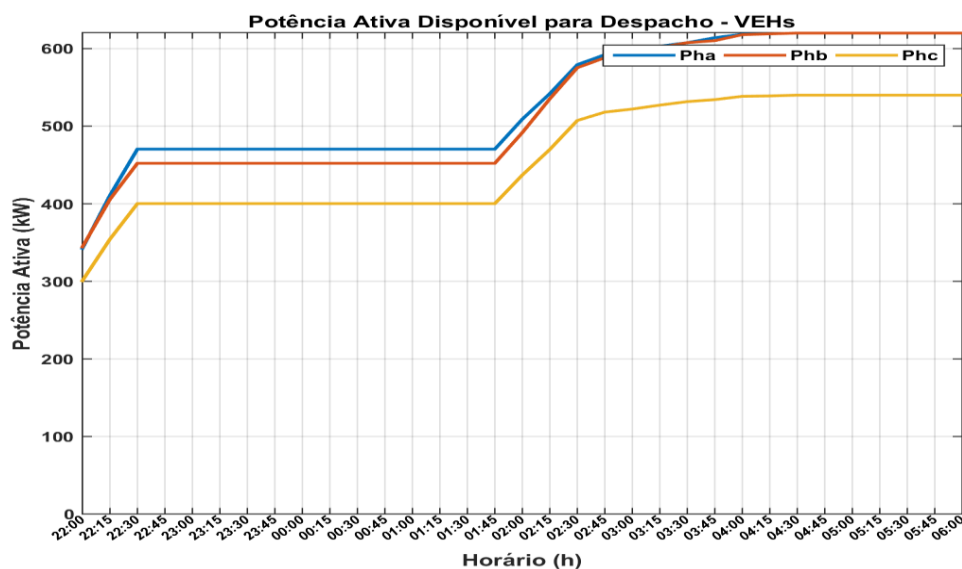


Figura 8.24: Potência ativa disponível para despacho nas unidades VEHs – Cenário 2

8.3.1.5 Perfil de Tensão – Micro Rede

A Figura 8.25 apresenta os valores máximos e mínimos de tensão para cada fase que a micro rede apresentou durante o período analisado, sendo possível observar a preservação dos limites de tensão ao longo de todo o período de análise.

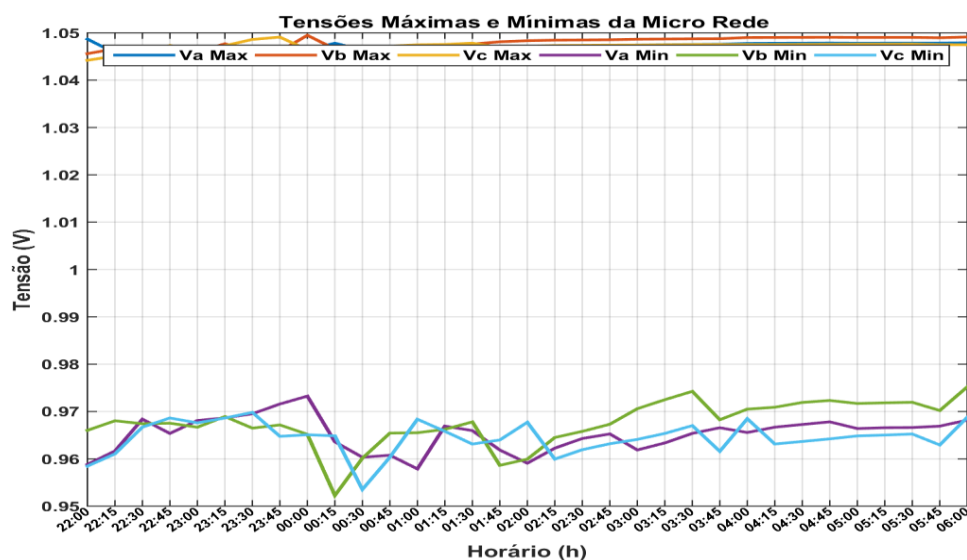


Figura 8.25: Tensões máximas e mínimas da micro rede por fase – Cenário 2

8.3.1.5.1 Regulação de Tensão - LTCs

Para a manutenção dos valores de tensão da micro rede dentro dos limites operacionais estabelecidos, dois reguladores de tensão são utilizados. A posição dos TAPs dos reguladores é ilustrada pela Figura 8.26 e Figura 8.27.

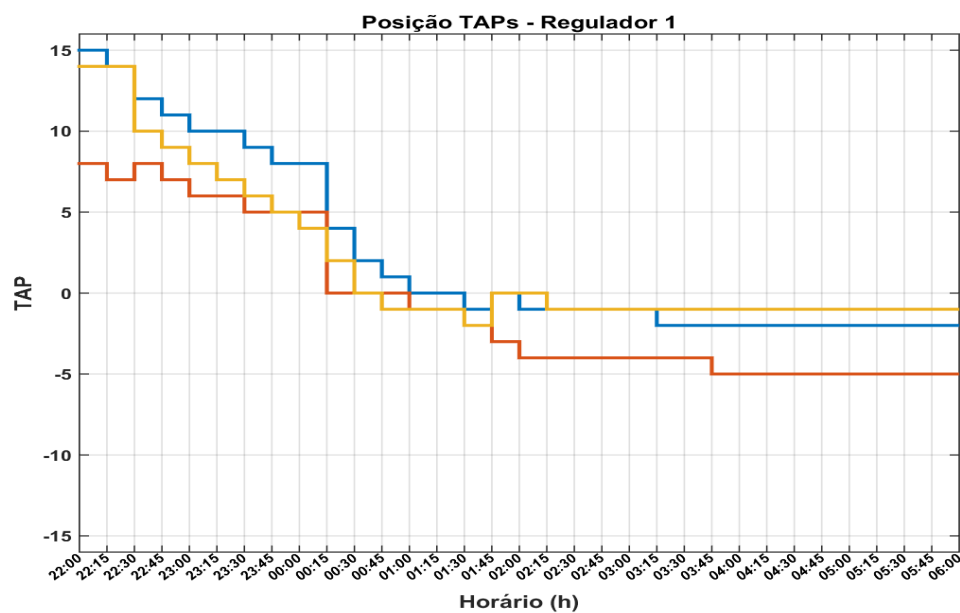


Figura 8.26: Posição dos taps do Regulador 1 – Cenário 2

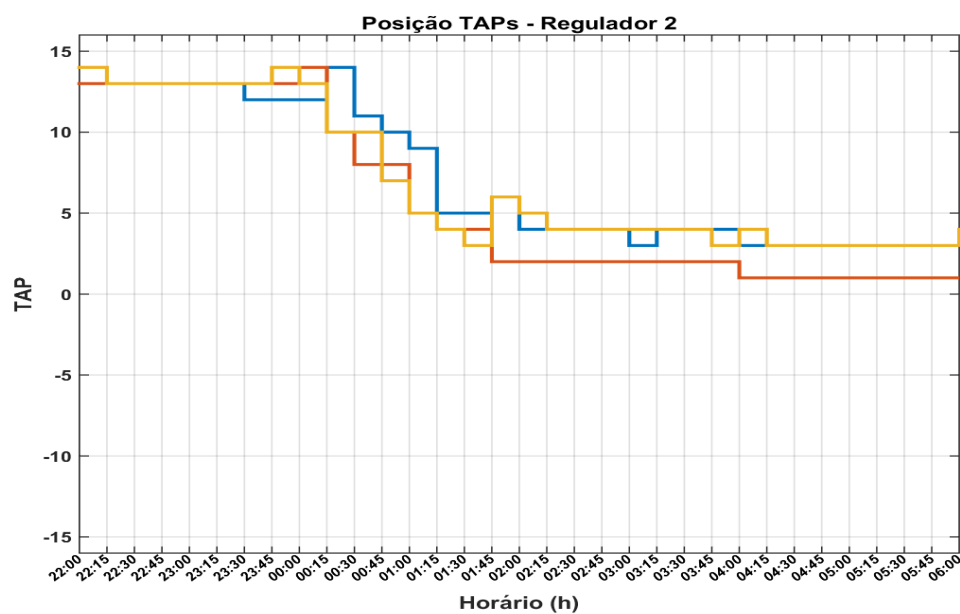


Figura 8.27: Posição dos taps do Regulador 2 – Cenário 2

8.3.1.6 *Frequência – Micro Rede*

Como os controles primário e secundário são executados pela rede principal quando em operação conectada, e por barra de referência quando em operação ilhada, os desbalanços presentes no micro rede são absorvidos e uma frequência de referência é proporcionada a micro rede durante todo o período analisado, como ilustrado pela Figura 8.28.

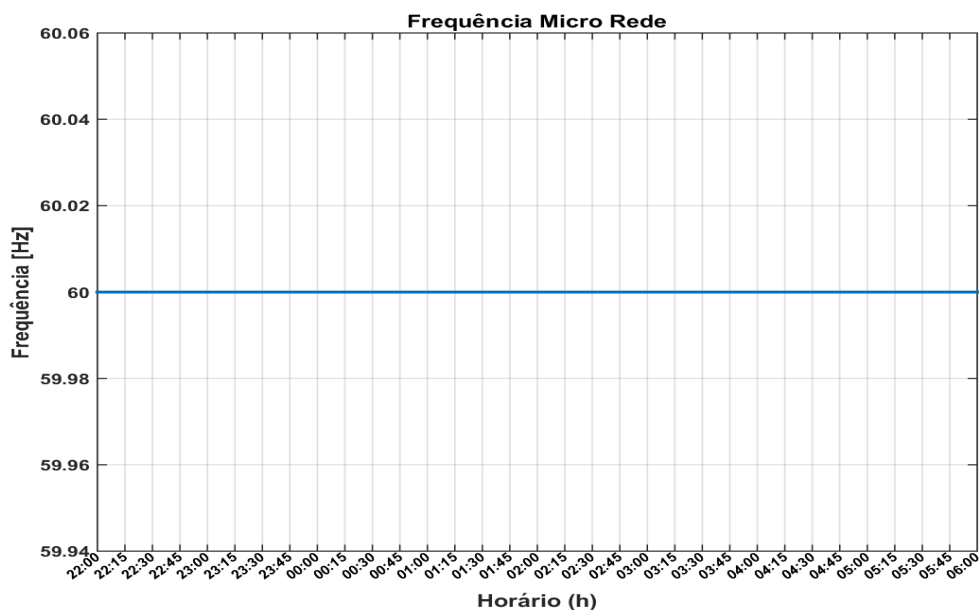


Figura 8.28: Nível de frequência da micro rede – Cenário 2

8.3.1.7 *Grupo de Prioridade Atendido*

O cenário analisado retrata uma micro rede com autossuficiência energética que por ocasião de uma ocorrência na rede principal passa a operar em modo ilhado. Deste modo, os grupos de prioridade de carga atendido serão o de LV '4', quando em operação conectada à rede principal, e LV '3' quando em operação ilhada, sendo a demanda da micro rede completamente suprida durante todo o período analisado.

Os grupos de prioridade de carga atendidos são apresentados na Figura 8.29.

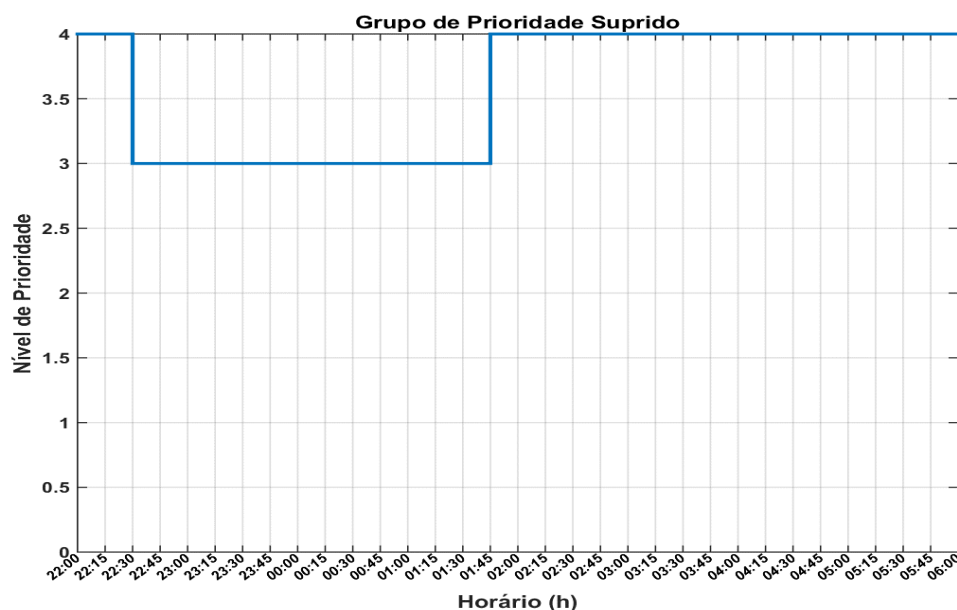


Figura 8.29: Grupo de Prioridade Atendido – Cenário 2

8.3.1.8 Conclusões Parciais

Os resultados para o Cenário 2 indicam que uma micro rede com autossuficiência energética, controle primário e secundário provido por barra de referência e que por ocasião de uma ocorrência na rede principal venha a se ilhar, é capaz de executar sob a perspectiva estática o completo atendimento a demanda de maneira satisfatória e respeitando os limites operacionais de tensão e frequência impostos.

Contudo, a desconexão pode impactar negativamente o processo de carregamento de VEHs, que poderá não ser concluído para todas as unidades do sistema dentro do período desejado.

8.3.2 *Micro Rede em modo de Gerenciamento de Demanda*

Esta seção apresenta o segundo modo de operação da micro rede ilhada, que consiste no ilhamento da micro rede sem autossuficiência energética. Neste cenário, o sistema necessita de uma política de gerenciamento de demanda para a manutenção do atendimento de modo parcial a micro rede, podendo a operação de VEHS como unidades armazenadoras de energia despacháveis ser requisitada.

Os casos fundamentais de operação da micro rede em modo ilhado na condição de gerenciamento de demanda consistem em:

- Operação da Micro Rede em modo Ilhado;
 - Micro Rede operando em modo de Prioridade de Cargas. Suprimento da demanda realizado por Geração Local e Despacho de veículos elétricos;
 - Controle primário provido por barra de referência (Swing);
 - Controle secundário provido por barra de referência (Swing).
 - Micro rede ilhada sem reconexão à rede principal.
 - Micro rede ilhada com reconexão à rede principal.
 - Controle primário provido por Controle *Droop* Aplicado a Micro Redes;
 - Ausência de controle secundário;
 - Controle secundário provido pelo método de Controle de Frequência baseado em *Droop* Aplicado a Micro Redes.
 - Micro rede ilhada sem reconexão à rede principal.

- Micro rede ilhada com reconexão à rede principal.

Nesta seção os modos de operação descritos pelos Cenários 3.1 e 4.2, representados na Tabela 8.1 são apresentados e analisados.

8.3.2.1 *Controle Primário Provido por Controle Droop Aplicado a Micro Redes e Ausência de Controle Secundário*

Este cenário consiste em uma micro rede sem autossuficiência energética que dispõe de controle primário executado pela metodologia *droop*, porém não possui nenhuma metodologia para controle secundário.

Nesta configuração, o sistema exerce uma política de gerenciamento de demanda que pode levar a necessidade de corte de carga e atuação de VEHs como unidades armazenadoras de energia despacháveis.

Esta seção aborda o Cenário 3.1 que possui as seguintes características associadas a micro rede:

- Operação da Micro Rede em modo Ilhado;
 - Micro Rede operando em modo de Prioridade de Cargas. Suprimento da demanda realizado por Geração Local e Despacho de veículos elétricos;
 - Controle primário provido por Controle *Droop* Aplicado a Micro Redes;
 - Ausência de controle secundário;
 - Micro rede ilhada com reconexão à rede principal.

8.3.2.1.1 Demanda Micro Rede

Para o Cenário 3.1, similar ao Cenário 2, assume-se a ocorrência de uma contingência na rede principal que leva a micro rede a necessidade de operação em modo ilhado às 22:30h com reconexão a rede principal às 1:45h.

A partir da Figura 8.30 pode-se observar que no momento de ilhamento, 22:30h, existe uma significativa queda na demanda do sistema, essa diminuição é proveniente do gerenciamento da demanda executado, devido a não autossuficiência energética da micro rede e a necessidade de garantia do suprimento aos grupos de maior prioridade durante seus períodos funcionais.

Às 23:45h ocorre novamente a diminuição do grupo de prioridade atendido para LV '1', sendo retomado para LV '2' às 00:15h. Essa situação pode ocorrer por dois motivos. O primeiro se refere a indisponibilidade de potência instantânea para atendimento do grupo de prioridade de LV '2'. A segunda se refere a observação que se executado o atendimento ao grupo de prioridade de LV '2' durante este intervalo, o suprimento ao grupo de prioridade de LV '1' (maior prioridade) será interrompido antes do fim de seu período de funcionalidade.

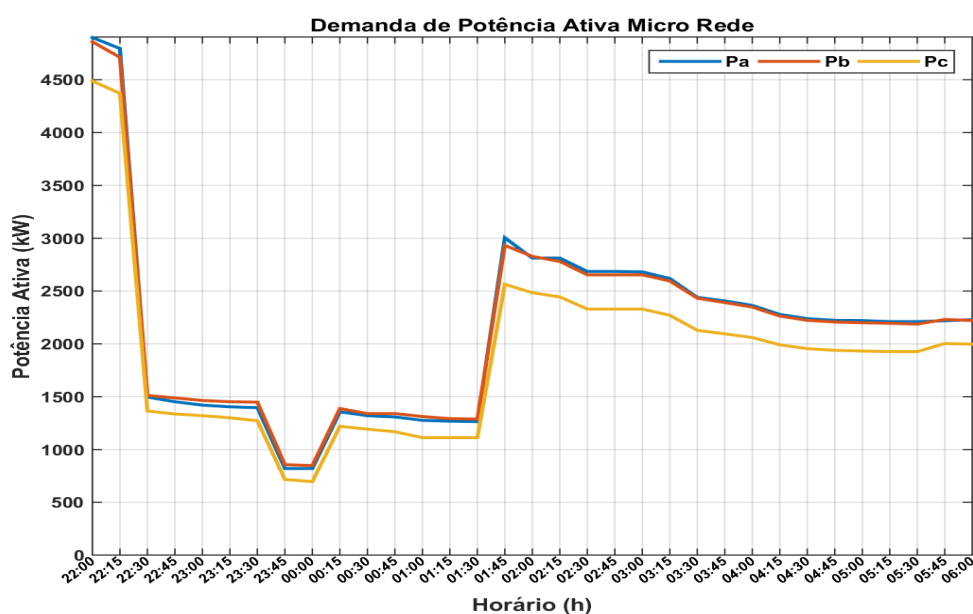


Figura 8.30: Demanda de potência ativa micro rede – Cenário 3.1

8.3.2.1.2 Geração, Demanda e Perdas Trifásicas Micro Rede

A Figura 8.31 ilustra os perfis de geração, demanda e perdas trifásicas relativos a micro rede durante a operação em modo conectado à rede principal e ilhado.

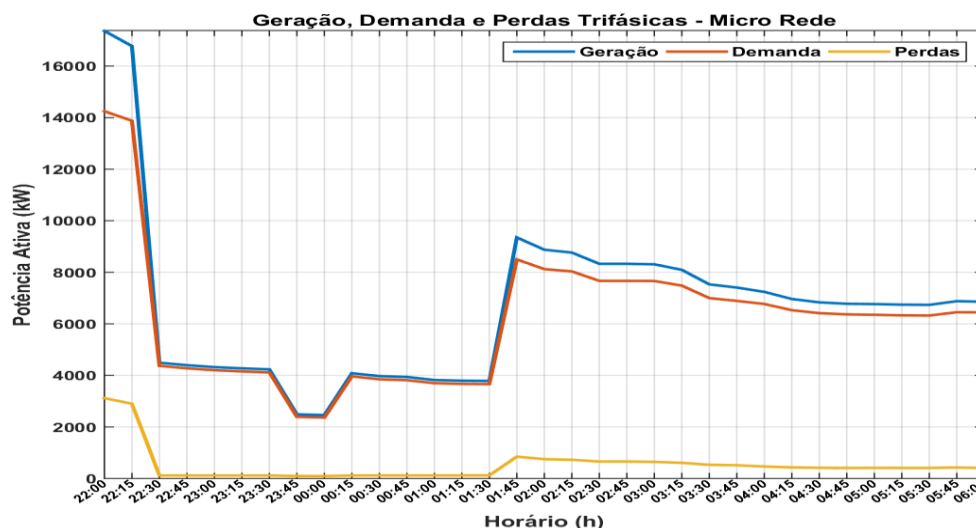


Figura 8.31: Geração, demanda e perdas trifásicas micro rede – Cenário 3.1

8.3.2.1.3 Geração Micro Rede

A Figura 8.32 apresenta as parcelas de contribuição de cada agente gerador do sistema. A partir de sua análise torna-se claramente observável a necessidade de corte de carga para manutenção do suprimento a micro rede.

Visto que, a demanda requisitada pela micro rede quando em operação conectada à rede principal, é muito superior a capacidade de suprimento da geração local, o despacho de unidades VEHs operando como armazenadores de energia torna-se necessário para o atendimento ao grupo de prioridade de carga de LV '2'.

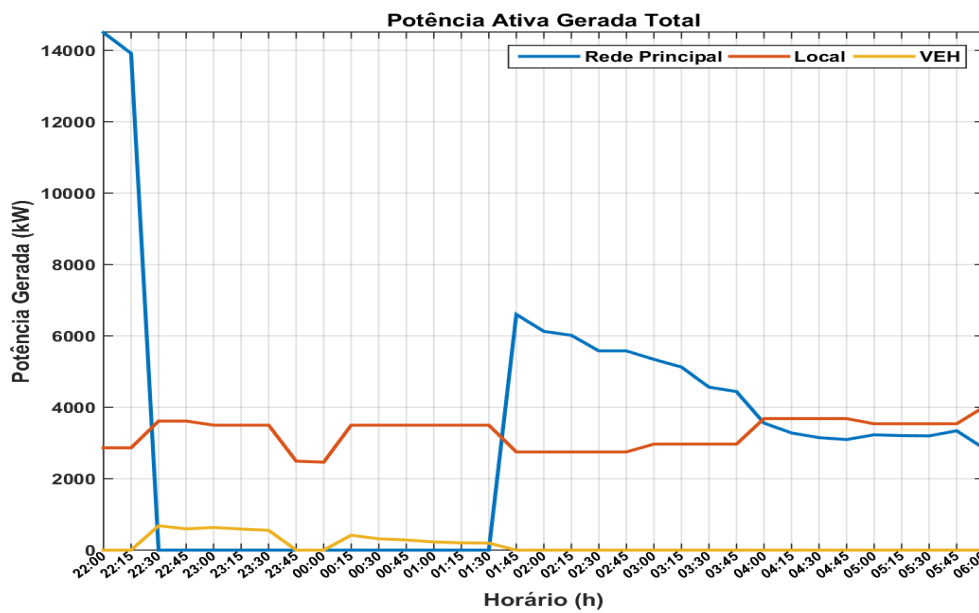


Figura 8.32: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal, geração local e VEHs – Cenário 3.1

8.3.2.1.3.1 Geração Suprida a Micro Rede – Rede Principal

O suprimento fornecido pela rede principal a micro rede é descrito pela Figura 8.33.

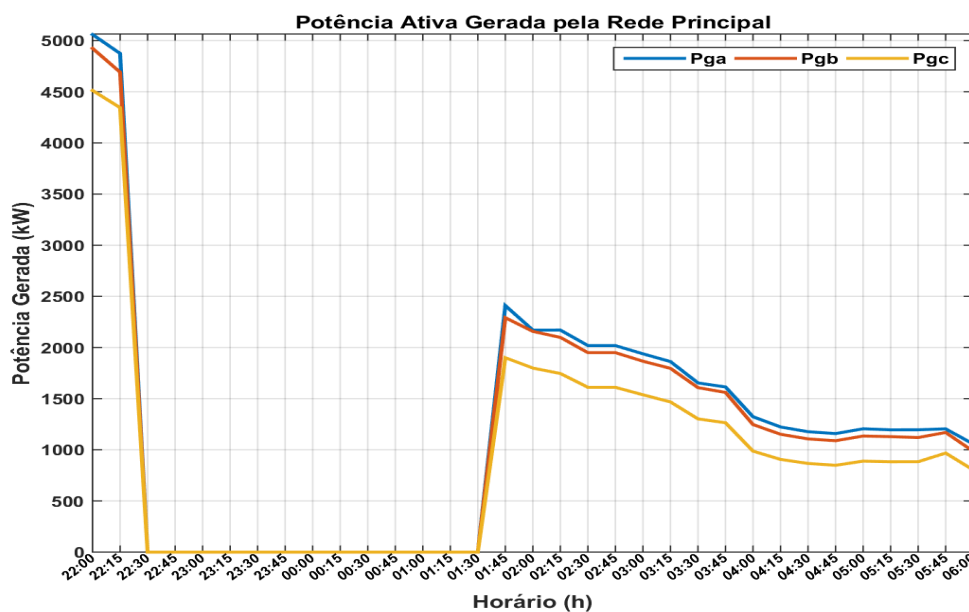


Figura 8.33: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal – Cenário 3.1

8.3.2.1.3.2 Geração Suprida a Micro Rede – Geração Local

A geração local para este cenário de operação é composta por unidades despacháveis e unidades não despacháveis, fontes renováveis.

A contribuição quando em modo de operação conectado à rede principal é balanceada e pré-estabelecida pelo operador para as unidades despacháveis, e não controlada para as unidades renováveis.

Quando em modo de operação ilhado, caso o despacho das unidades VEHs esteja em curso, essas assumiram o desbalanço de potência entre as fases, e o despacho das unidades geradoras despacháveis será balanceado. Contudo, quando o atendimento a micro rede for executado somente pelas unidades geradoras despacháveis e não despacháveis, a contribuição das unidades geradoras despacháveis ocorrerá de maneira desbalanceada visando a adequação ao atendimento à demanda da micro rede, como ilustrado pela Figura 8.34.

Deste modo, pode-se observar que o desbalanço na contribuição das unidades despacháveis ocorre apenas durante o atendimento ao grupo de prioridade de LV '1', uma vez que neste momento não há auxílio ao suprimento pelas unidades VEHs e a micro rede não se encontra conectada à rede principal.

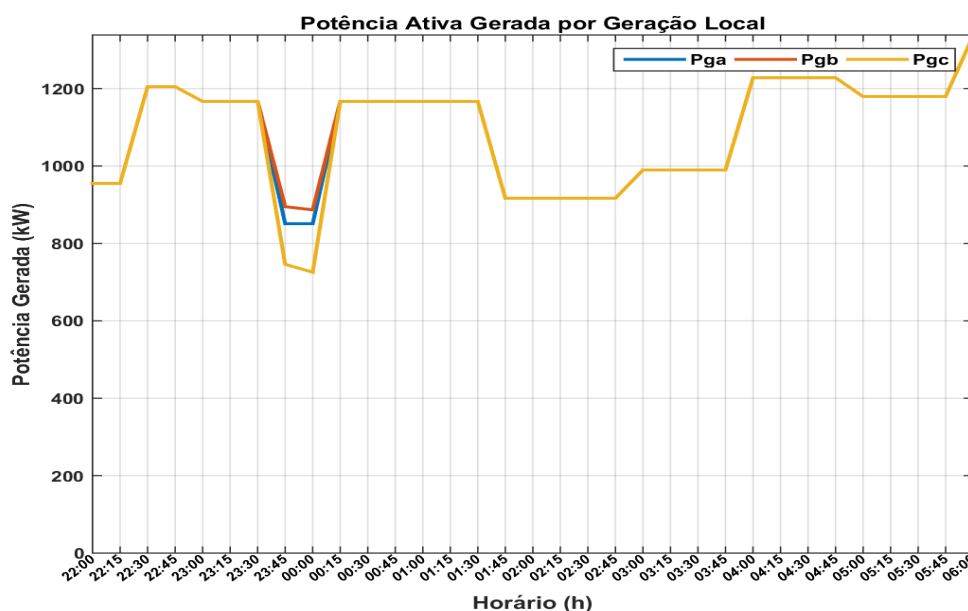


Figura 8.34: Potência ativa suprida a micro rede pela geração local – Cenário 3.1

8.3.2.1.3.3 Geração Suprida a Micro Rede – VEHs

A Figura 8.35 apresenta a atuação dos VEHs como unidades armazenadoras de energia não despacháveis. Pode-se observar que o despacho ocorre de maneira desbalanceada visando a normalização do desbalanço presente na demanda da micro rede, e o atendimento a parcela da demanda que a geração local despachável e não despachável não foi capaz de suprir.

Esse despacho desbalanceado é possível de obtenção pois os VEHs estão dispostos em fases diversas e pelo emprego de metodologias de controle. Essas pode ser associadas aos inversores para a determinação do montante de energia despachável por fase para cada unidade através dos dispositivos inteligentes.

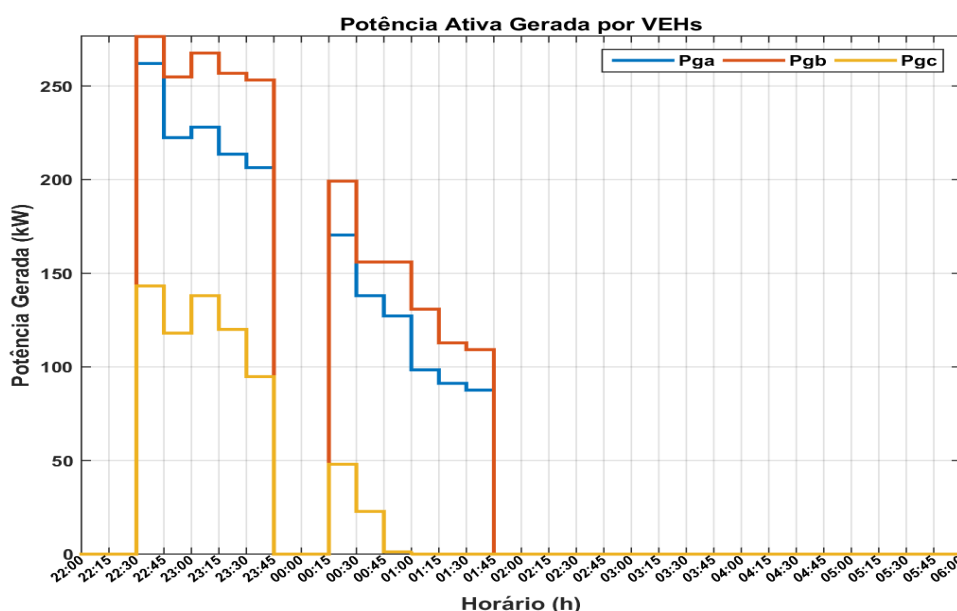


Figura 8.35: Potência ativa suprida a micro rede pela geração VEHs – Cenário 3.1

8.3.2.1.4 Operação VEHs

Para o Cenário 3.1 os VEHs são submetidos a dois estados de operação. Primeiramente o processo de carregamento, executado quando a micro rede encontra-se conectada à rede principal. E posteriormente, a operação como unidades armazenadoras de energia despacháveis, quando em modo de operação ilhado com necessidade de auxílio a geração local para o atendimento a demanda da micro rede.

8.3.2.1.4.1 *Processo de Carregamento VEHs*

O processo de carregamento de VEHs é apresentado pela Figura 8.36. Similar ao Cenário 2, devido a desconexão à rede principal o processo de carregamento não foi capaz de ser concluído para todas as unidades VEHs conectadas a micro rede.

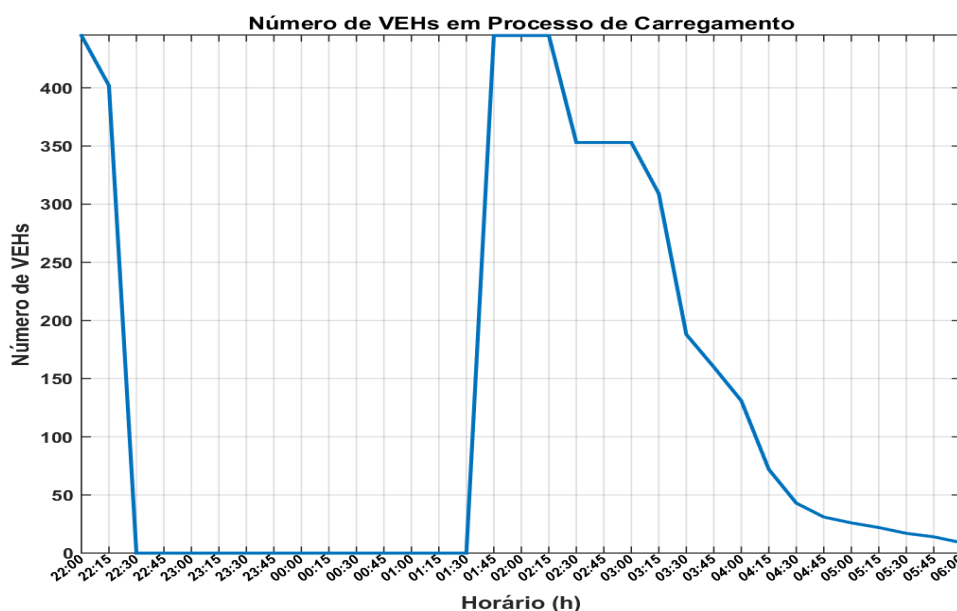


Figura 8.36: Número de VEHs em processo de carregamento – Cenário 3.1

8.3.2.1.4.2 *VEHs Operando como Armazenadores de Energia*

Devido a não autossuficiência energética da micro rede, durante a operação em modo ilhado as unidades VEHs podem operar como armazenadores de energia despacháveis.

A Figura 8.37 apresenta o número de VEHs disponíveis para atuação como unidades armazenadoras de energia ao longo do período analisado. Pode-se observar que ao decorrer da operação isolada o número de unidades VEHs passíveis de despacho reduz.

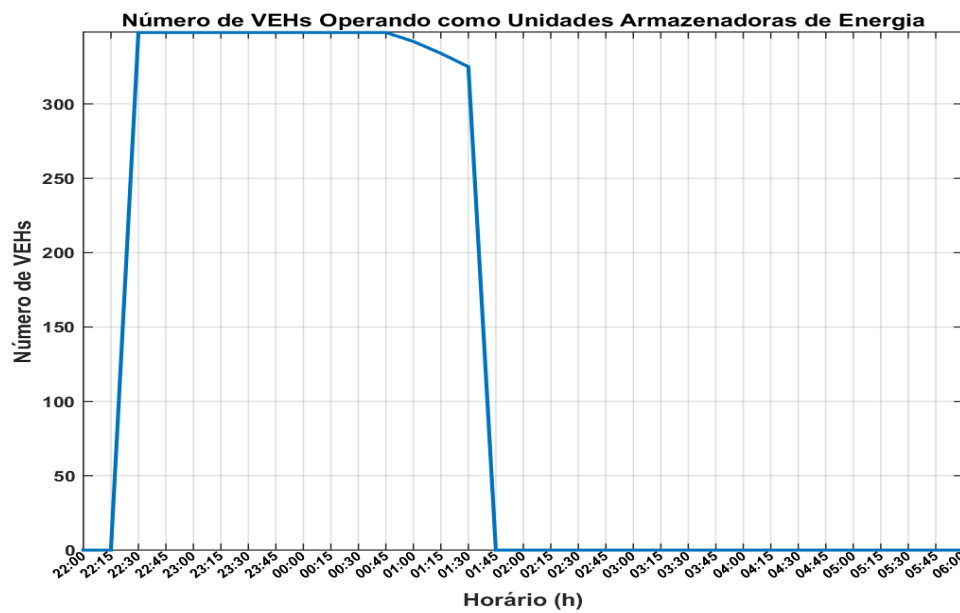


Figura 8.37: Número de VEHS operando como armazenadores de energia despacháveis
– Cenário 3.1

8.3.2.1.4.3 *Energia Armazenada - VEHS*

A redução do número de unidades VEHS passíveis de despacho se deve ao deplecionamento da energia disponível na bateria, fazendo com que algumas unidades atinjam o limite inferior de carga que o proprietário permite ao operador utilizar de seu VEH em situações emergenciais.

Como pode-se observar detalhadamente pela Figura 8.38, durante o período ilhado há uma significativa redução na energia armazenada nas unidades VEHS, seguido de um crescimento exponencial após a reconexão com a rede principal.

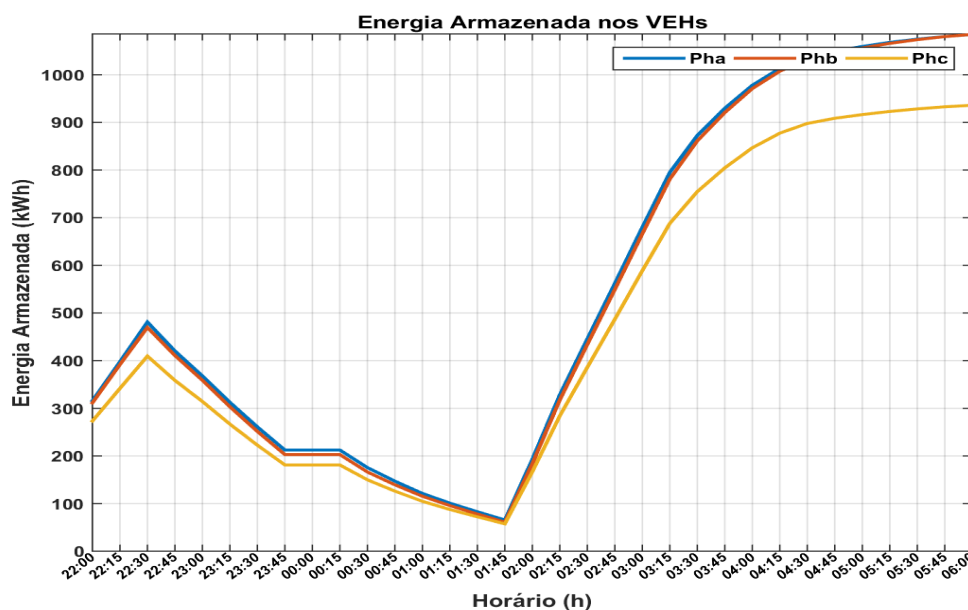


Figura 8.38: Energia armazenada nas unidades VEHs – Cenário 3.1

8.3.2.1.4.4 Potência Disponível para Despacho - VEHs

Intimamente ligada a energia armazenada e ao número de VEHs habilitados para operação como armazenadores de energia, A potência disponível para despacho das unidades VEHs é apresentada pela Figura 8.39.

Pode-se observar que sua tendência acompanha a energia armazenada nos VEHs, e possui um significativo aumento logo após a reconexão da micro rede à rede principal.

Esse aumento se deve as unidades VEHs que haviam atingido o limite inferior de carga permitido pelo proprietário, e que após a reconexão e retomada do processo de carregamento, o rapidamente superaram e novamente encontram-se habilitadas para a operação em modo de armazenadores de energia despacháveis. E aos novos VEHs que devido a durante esse intervalo de carregamento também superam seus limites inferiores de carga, passando assim a atuar como armazenadores de energia despacháveis. Proporcionando assim uma potência disponível para despacho superior a potência disponível no momento anterior ao ilhamento.

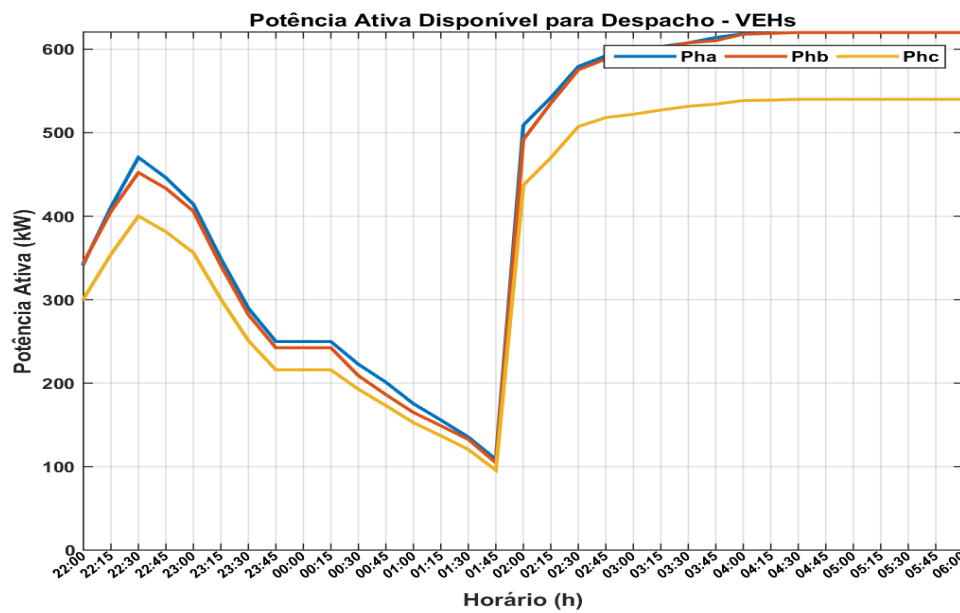


Figura 8.39: Potência ativa disponível para despacho nas unidades VEHs – Cenário 3.1

8.3.2.1.5 Perfil de Tensão – Micro Rede

A Figura 8.40 descreve os perfis de tensões máximas e mínimas da micro rede para cada fase, podendo-se observar uma íntima relação com os modos de operação e grupos de prioridade de cargas atendidos. Em geral, quanto maior o grupo de prioridade atendido, mais próximas aos limites operativos se encontram as tensões da micro rede.

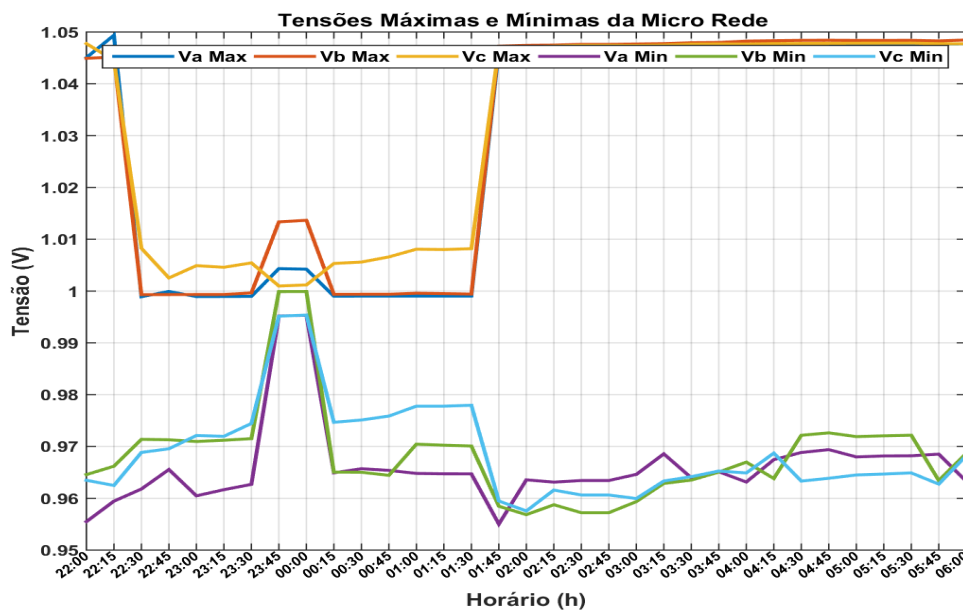


Figura 8.40: Tensões máximas e mínimas da micro rede por fase – Cenário 3.1

8.3.2.1.5.1 Regulação de Tensão - LTCs

A posição dos TAPs dos reguladores é ilustrada pela Figura 8.41 e Figura 8.42, estando sua atuação também relacionada as variações dos níveis de demanda da micro rede.

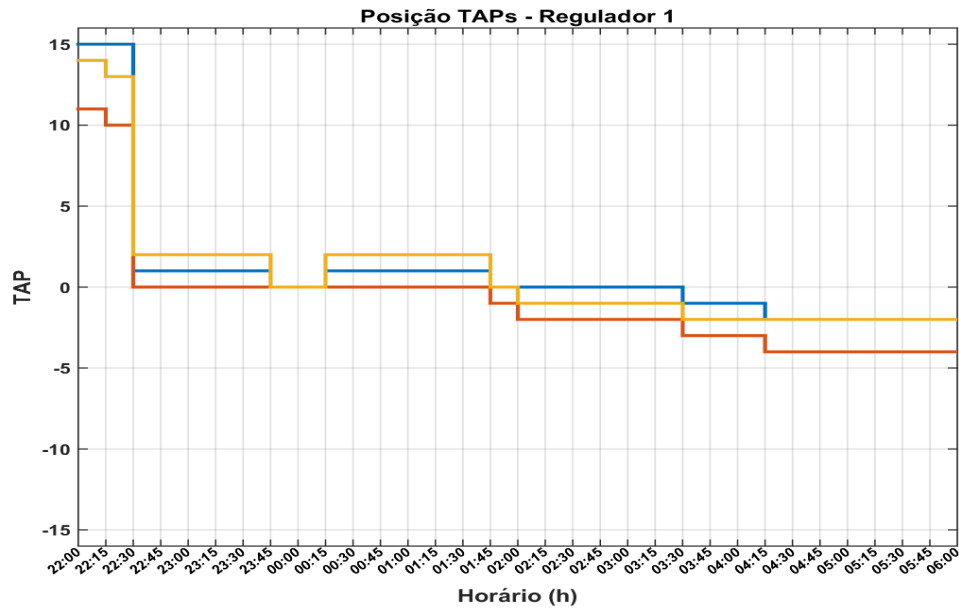


Figura 8.41: Posição dos taps do Regulador 1 – Cenário 3.1

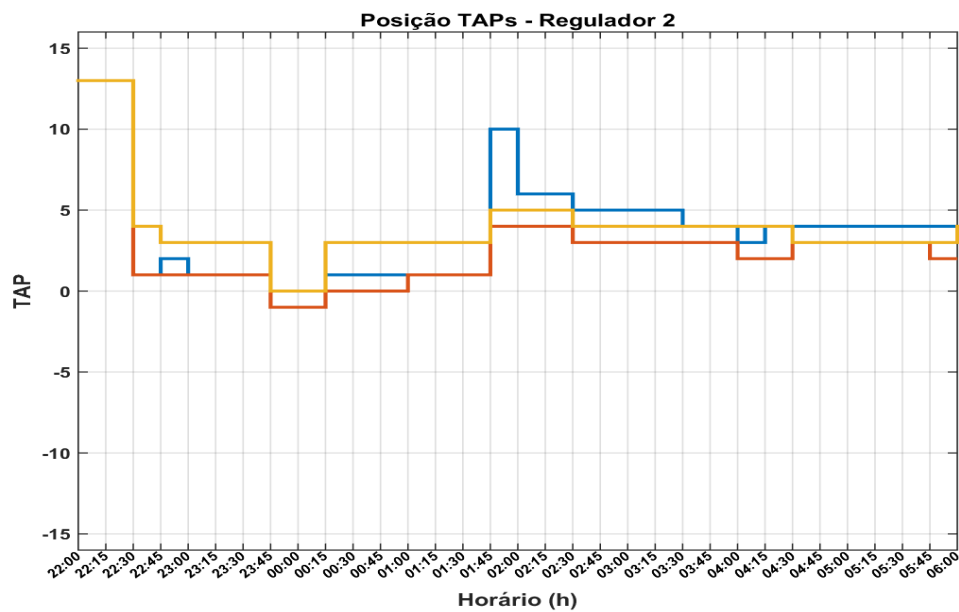


Figura 8.42: Posição dos taps do Regulador 2 – Cenário 3.1

8.3.2.1.6 Frequência – Micro Rede

Para o Cenário 3.1, a micro rede opera em modo ilhado com controle primário executado pelo método *droop* e ausência de controle secundário.

Devido a ausência do controle secundário, a frequência da micro rede é diretamente dependente da variação de demanda a qual é submetida.

Por meio da observação do perfil de frequência apresentado pela Figura 8.43 e dos grupos de prioridades atendidos pela micro rede, descritos pela Figura 8.44, essa relação se torna facilmente constatada.

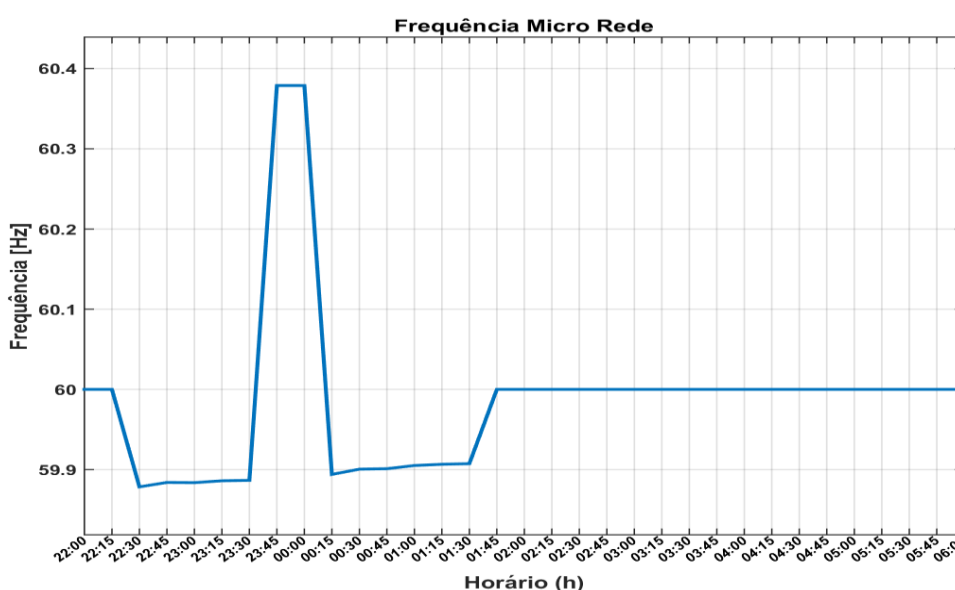


Figura 8.43: Nível de frequência da micro rede – Cenário 3.1

8.3.2.1.7 Grupo de Prioridade Atendido

Devido a não autossuficiência energética por parte da micro rede, após o ilhamento, a política de gerenciamento de demanda identificou que o grupo de prioridade de LV ‘2’ é o maior agrupamento de cargas possível de ser suprido, que mantém a garantia do atendimento aos grupos com níveis de prioridade superior durante os seus respectivos períodos de funcionalidade.

Entretanto, ao longo da operação da micro rede em modo ilhado identificou-se que haveria insuficiência de potência disponível para a manutenção do atendimento ao

grupo de prioridade de LV '2', executando o suprimento ao grupo de prioridade antecedente (LV '1') por duas janelas de tempo, 30 min, e posteriormente reestabelecendo o atendimento ao agrupamento de LV '2'.

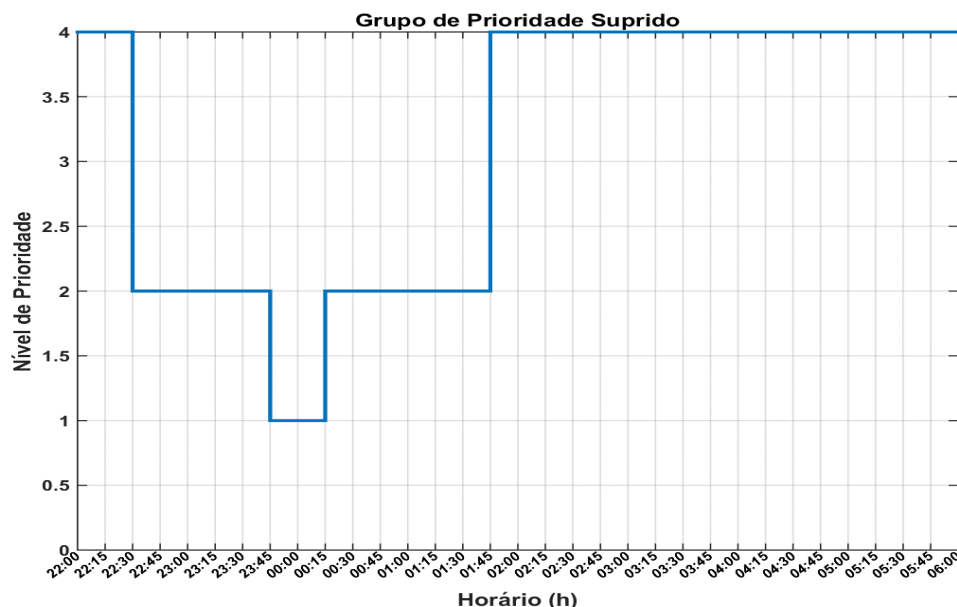


Figura 8.44: Grupo de Prioridade Atendido – Cenário 3.1

8.3.2.1.8 Conclusões Parciais

A partir dos resultados é possível observar que devido as significativas variações de demanda as quais a micro rede foi submetida durante a operação ilhada, a ausência de controle secundário acarretou em severas variações de frequência que não se adequam aos limites estabelecidos por norma.

Entretanto, deve-se ressaltar que para configurações nas quais não estão presentes grandes variação de demanda, o controle primário *droop* sem auxílio de controle secundário, por vezes será suficiente para a manutenção do sistema operando dentro dos limites estabelecidos, como observado no Capítulo 5 - Controle Primário *Droop* Aplicado a Micro Redes.

A próxima seção apresenta o comportamento da micro rede em modo ilhado considerando a participação de metodologia para controle secundário. Contudo, deve-se evidenciar que apesar do rompimento dos limites de frequência, todos os outros componentes se comportaram de maneira adequada e os limites de tensão foram preservados durante todo o período analisado.

8.3.2.2 *Controle Primário Provido por Controle Droop e Controle Secundário Provido pelo Método de Controle de Frequência baseado em Droop Aplicado a Micro Redes*

Esta seção apresenta o Cenário 4.2 que consiste no ilhamento de uma micro rede sem autossuficiência energética com atuação da política de gerenciamento de demanda, para a manutenção do atendimento de modo parcial as cargas da micro rede, podendo ser requisitada a operação de VEHs como unidades armazenadoras de energia despacháveis.

Diferente do Cenário 3.1, este cenário prove a micro rede capacidade de controle secundário e assume uma ocorrência de ilhamento sem reconexão à rede principal dentro do período analisado.

Estando as seguintes características associadas a micro rede para este cenário:

- Operação da Micro Rede em modo Ilhado;
 - Micro Rede operando em modo de Prioridade de Cargas. Suprimimento da demanda realizado por Geração Local e Despacho de veículos elétricos;
 - Controle primário provido por Controle *Droop* Aplicado a Micro Redes;
 - Controle secundário provido pelo método de Controle de Frequência baseado em *Droop* Aplicado a Micro Redes.
 - Micro rede ilhada sem reconexão à rede principal.

8.3.2.2.1 Demanda Micro Rede

Para o Cenário 4.2 assume-se a ocorrência de uma contingência na rede principal que induz a micro rede a operação em modo ilhado às 22:30h, que se estende ao longo de todo o período analisado.

A partir da Figura 8.45 pode-se observar que no momento do ilhamento, 22:30h, existe uma significativa queda na demanda do sistema. Esta diminuição é ocasionada pela política de gerenciamento de demanda, empregada para a maximização do volume de cargas atendidas e bem-estar social, redução de perdas econômicas a sociedade, tal como para a garantia do suprimento aos grupos de maior prioridade durante os períodos funcionais para micro redes sem autossuficiência energética operando em modo ilhado.

Nesta perspectiva, uma nova redução no agrupamento de cargas supridas ocorre de 23:45h às 00:15h, e posteriormente de 1:45h às 3:00h, onde são atendidas somente as cargas pertencentes ao grupo de prioridade de LV '1'.

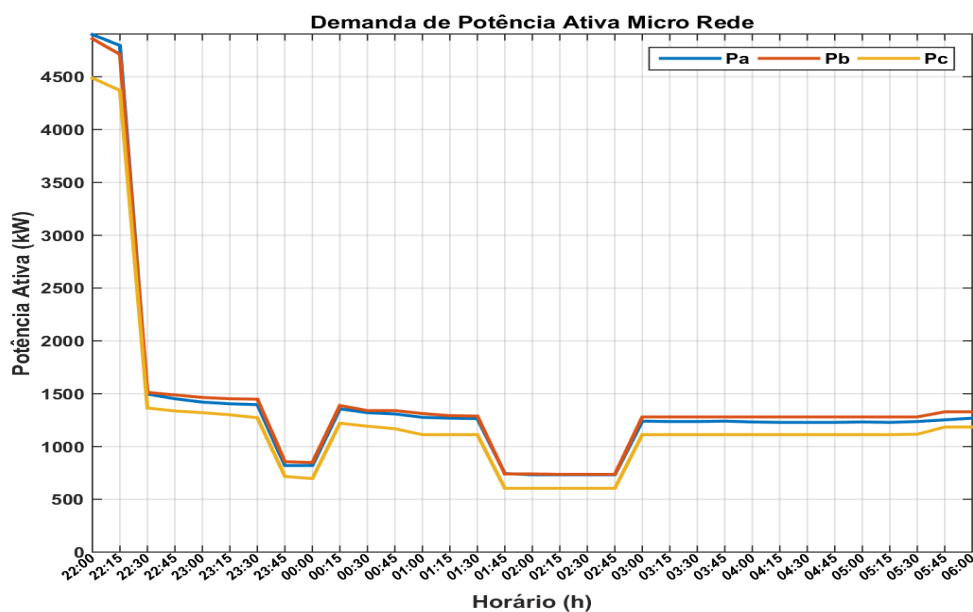


Figura 8.45: Demanda de potência ativa micro rede – Cenário 4.2

8.3.2.2.2 Geração, Demanda e Perdas Trifásicas Micro Rede

A Figura 8.46 exibe em uma perspectiva geral os perfis de geração, demanda e perdas trifásicas relativos a micro rede durante o período analisado.

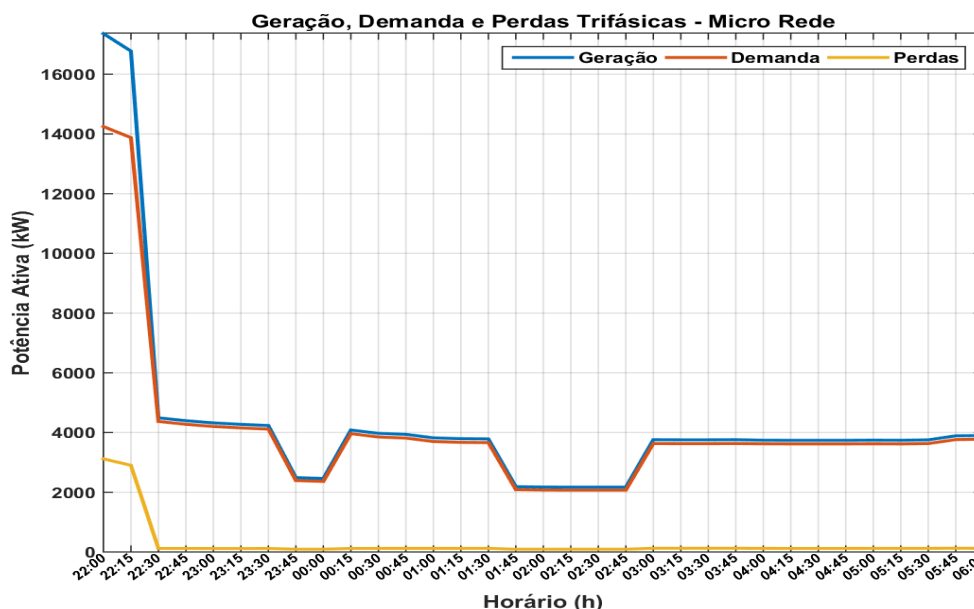


Figura 8.46: Geração, demanda e perdas trifásicas micro rede – Cenário 4.2

8.3.2.2.3 Geração Micro Rede

A Figura 8.47 apresenta as parcelas de contribuição de cada agente gerador do sistema.

A partir de sua análise torna-se claramente observável a necessidade de corte de carga para manutenção do suprimento a micro rede, visto que, a demanda requisitada pela micro rede quando em operação conectada à rede principal é muito superior a capacidade de suprimento da geração local, que necessita do auxílio do despacho de VEHs para o atendimento ao grupo de prioridade de carga de *LV '2'* durante o período de baixa contribuição das unidades não despacháveis (fontes renováveis), ocasionado pela baixa velocidade do vento e não incidência solar durante o início da madrugada.

A seguir as parcelas de contribuição de cada agente gerador do sistema serão detalhadas individualmente.

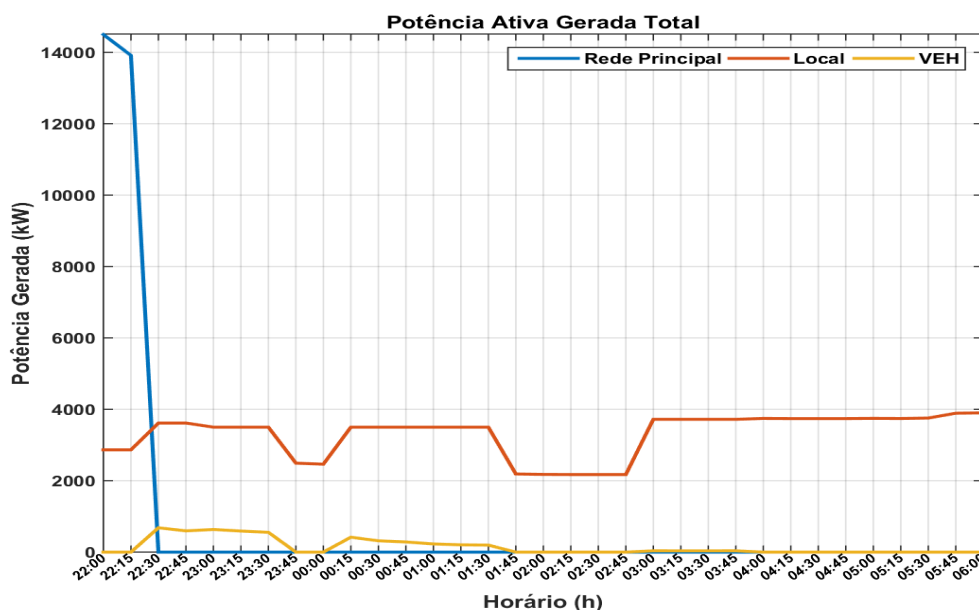


Figura 8.47: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal, geração local e VEHs – Cenário 4.2

8.3.2.2.3.1 Geração Suprida a Micro Rede – Rede Principal

O suprimento fornecido pela rede principal à micro rede é executado apenas durante os primeiros intervalos analisados previamente a ocorrência do ilhamento como descrito pela Figura 8.48.

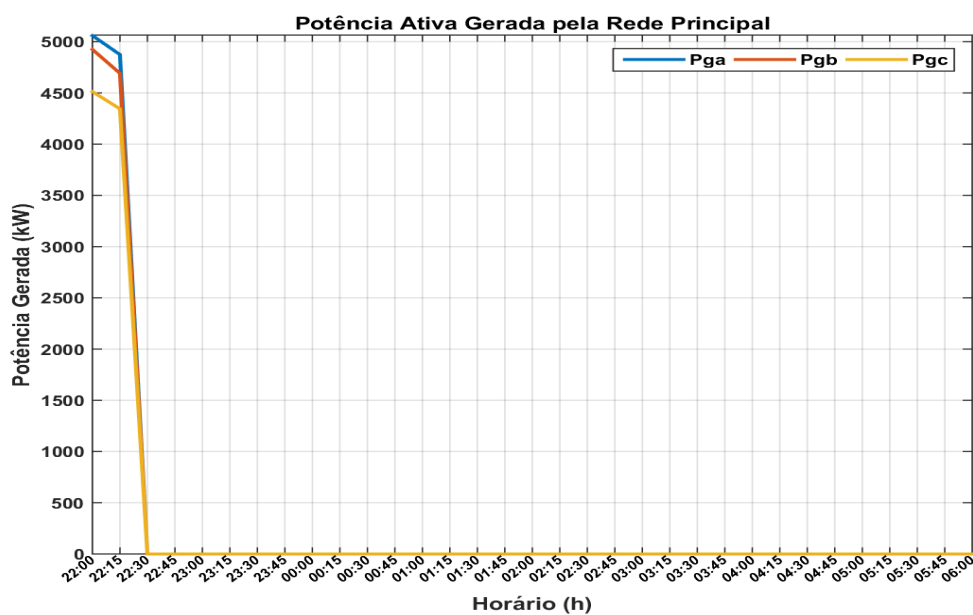


Figura 8.48: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal – Cenário 4.2

8.3.2.2.3.2 Geração Suprida a Micro Rede – Geração Local

A geração local para este cenário de operação é composta por unidades despacháveis e não despacháveis e sua funcionalidade ocorre de modo similar ao Cenário 3.1.

A contribuição quando em modo de operação conectado à rede principal é balanceada e pré-estabelecida pelo operador para as unidades despacháveis, e não controlada para as unidades renováveis.

Quando em modo de operação ilhado, caso o despacho das unidades VEHs esteja em curso, essas assumiram o desbalanço de potência entre as fases, e o despacho das unidades geradoras despacháveis será balanceado. Contudo, quando o atendimento a micro rede for executado somente pelas unidades geradoras despacháveis e não despacháveis, a contribuição das unidades geradoras despacháveis ocorrerá de maneira desbalanceada visando a adequação ao atendimento à demanda da micro rede, como ilustrado pela Figura 8.49.

Deste modo, pode-se observar que há desbalanço na contribuição das unidades despacháveis durante o atendimento ao grupo de prioridade de LV ‘1’ e a partir das 3:45h, uma vez que nestes momentos não há necessidade de auxílio ao suprimento por parte das unidades VEHs em todas as fases e a micro rede não se encontra conectada à rede principal.

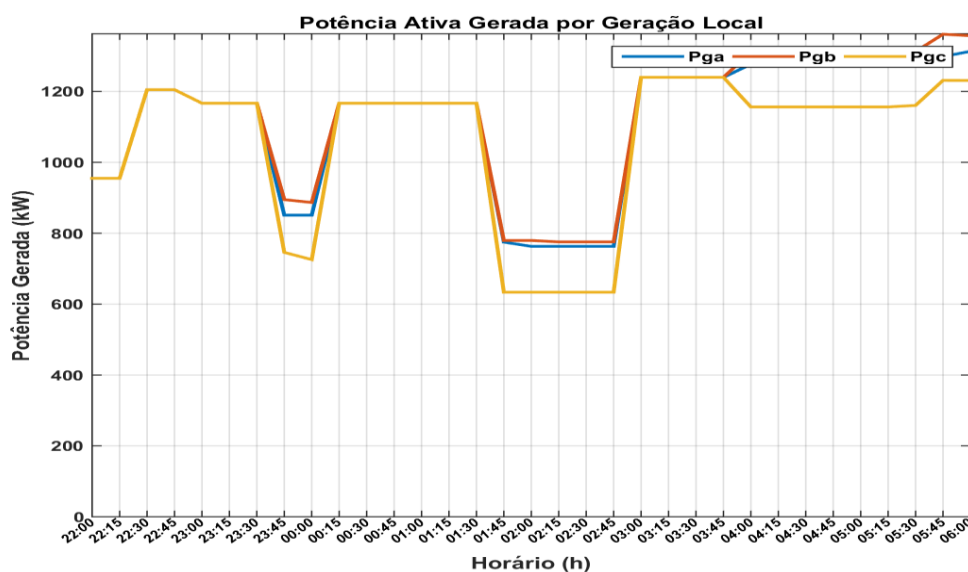


Figura 8.49: Potência ativa suprida a micro rede pela geração local – Cenário 4.2

8.3.2.2.3.3 Geração Suprida a Micro Rede – VEHs

A Figura 8.50 apresenta a atuação dos VEHs como unidades armazenadoras de energia não despacháveis. Pode se observar que o despacho ocorre de maneira desbalanceada visando a normalização do desbalanço presente na demanda da micro rede, e o atendimento a parcela da demanda que a geração local despachável e não despachável não foi capaz de suprir.

É interessante notar o período compreendido de 3:00h às 4:00h.

Devido ao aumento da contribuição não despachável (fontes renováveis), a geração local passa a ter capacidade de atendimento a demanda da micro rede com excessão de uma fase, que necessita da contribuição por parte dos VEHs em razão do desbalanço presente na micro rede.

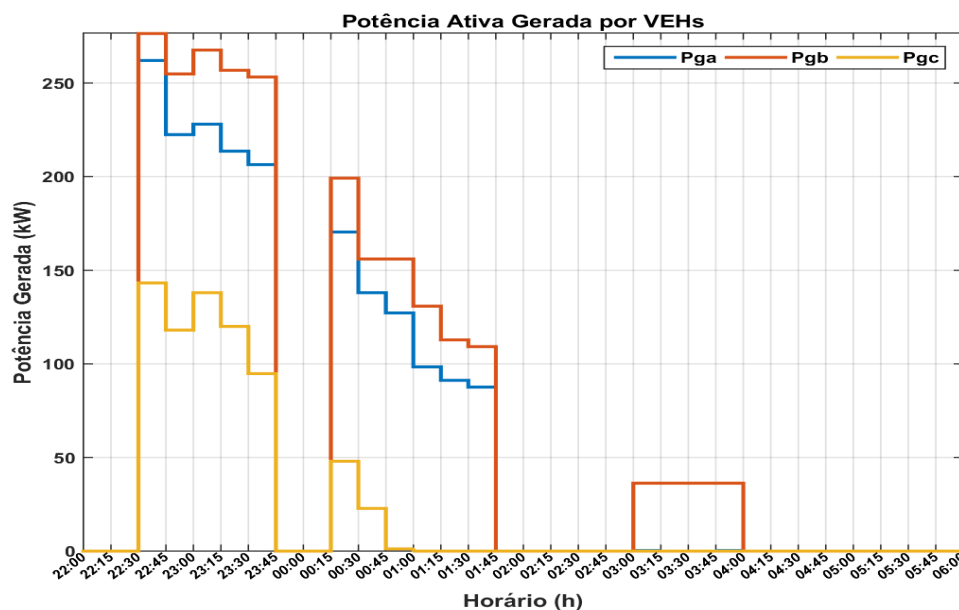


Figura 8.50: Potência ativa suprida a micro rede pela geração VEHs – Cenário 4.2

8.3.2.2.4 Operação VEHs

Para o Cenário 4.2 os VEHs são submetidos a dois estados de operação. O processo de carregamento, brevemente executado durante o período ao qual a micro rede encontra-se conectada à rede principal. E a operação como unidades armazenadoras de energia despacháveis, quando em modo de operação ilhado com necessidade de auxílio à geração local para o atendimento a demanda da micro rede.

8.3.2.2.4.1 Processo de Carregamento VEHs

Uma vez que o ilhamento se mantém durante todo o período analisado, os VEHs se encontram em processo de carregamento apenas durante os dois primeiros intervalos analisados, estando o número de VEHs em processo de carregamento apresentado pela Figura 8.51.

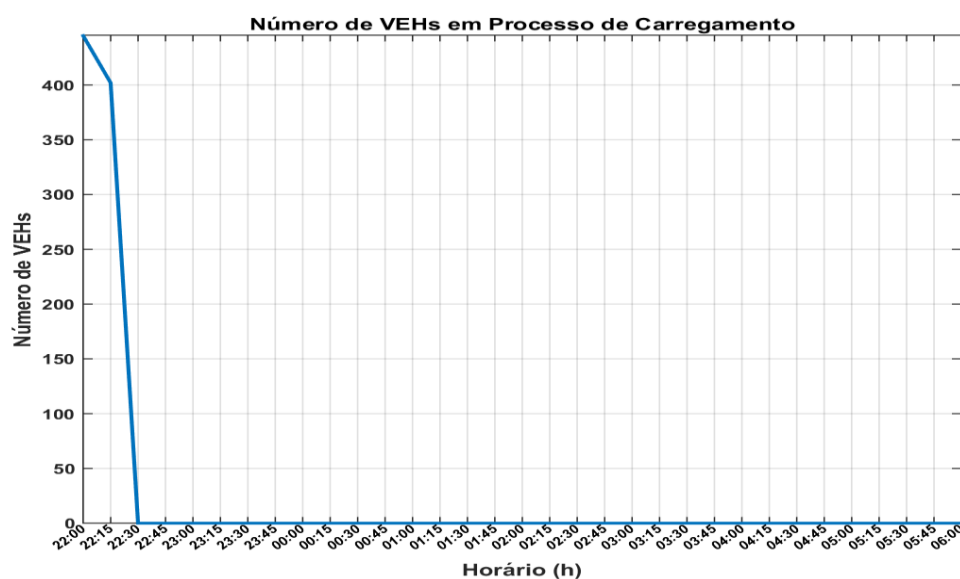


Figura 8.51: Número de VEHs em processo de carregamento – Cenário 4.2

8.3.2.2.4.2 VEHs Operando como Armazenadores de Energia

Devido a não autossuficiência energética da micro rede, durante a operação em modo ilhado as unidades VEHs podem operar como armazenadores de energia despacháveis.

A Figura 8.52 apresenta o número de VEHs disponíveis para atuação como unidades armazenadoras de energia despacháveis ao longo do período analisado.

Como esperado, ao decorrer da operação isolada o número de unidades VEHs passíveis de despacho reduz gradativamente. Contudo, é interessante notar a redução no número de unidades VEHs habilitadas para despacho ocorre por degraus, se mantendo constante durante significativos intervalos de tempo antes do decréscimo. Esse fato ocorre devido ao nível de carga disponível, e ao tempo necessário para o deplecionamento da bateria ao limite mínimo de carga permitido a unidade VEH.

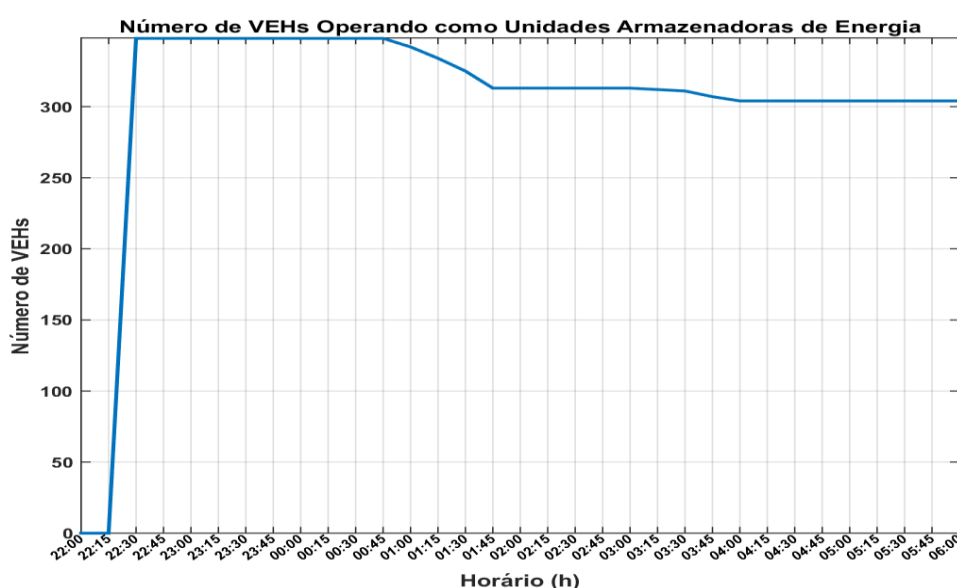


Figura 8.52: Número de VEHs operando como armazenadores de energia despacháveis
– Cenário 4.2

8.3.2.2.4.3 Energia Armazenada - VEHs

A Figura 8.53 apresenta a energia disponível nas unidades VEHs, sendo possível observar que a taxa de descarregamento é diretamente relacionada ao nível de contribuição dos VEHs à micro rede e ao número de unidades VEHs habilitadas como armazenadores de energia despacháveis.

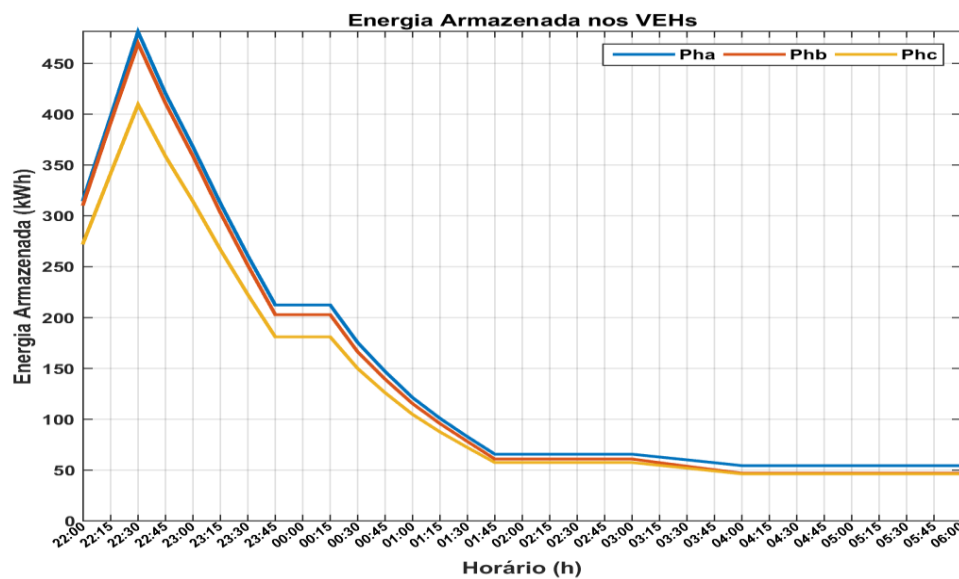


Figura 8.53: Energia armazenada nas unidades VEHS – Cenário 4.2

8.3.2.2.4.4 Potência Disponível para Despacho - VEHS

A Figura 8.54 ilustra a potência disponível para despacho das unidades VEHS. Pode-se notar que a disponibilidade de potência para despacho é relacionada a energia armazenada nos VEHS e ao número de unidades habilitadas como armazenadores de energia despacháveis.

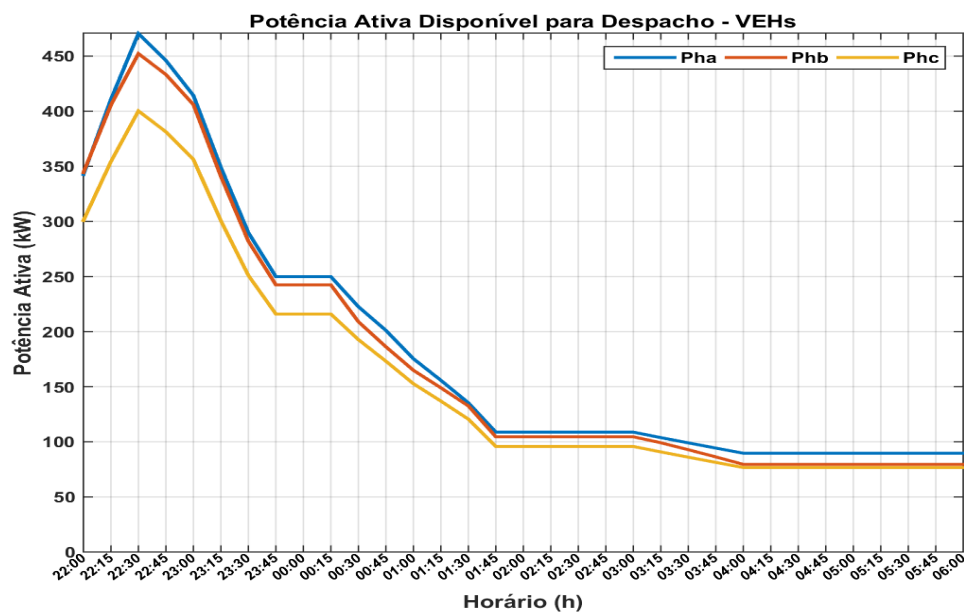


Figura 8.54: Potência ativa disponível para despacho nas unidades VEHS – Cenário 4.2

8.3.2.2.5 Perfil de Tensão – Micro Rede

A Figura 8.55 descreve os perfis de tensões máximas e mínimas da micro rede para cada fase, sendo constatada uma íntima relação com os modos de operação e grupos de prioridade de cargas atendidos.

Deve-se ressaltar que durante a atuação em modo de operação ilhado, as tensões das barras de geração da micro rede são redefinidas em 1,0 p.u. visando a melhor acomodação da possível contribuição das unidades VEHs, e manutenção dos níveis de tensão inferiores ao limite operacional superior.

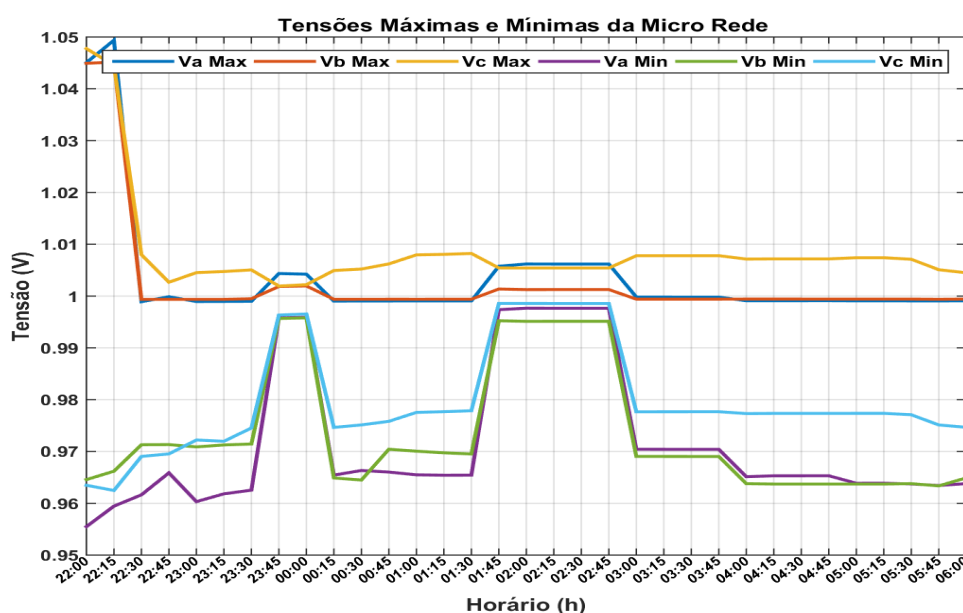


Figura 8.55: Tensões máximas e mínimas da micro rede por fase – Cenário 4.2

8.3.2.2.5.1 Regulação de Tensão - LTCs

A posição dos TAPs dos reguladores é ilustrada pela Figura 8.56 e Figura 8.57. Deve-se notar que sua atuação se relaciona diretamente as variações no nível de atendimento à demanda da micro rede.

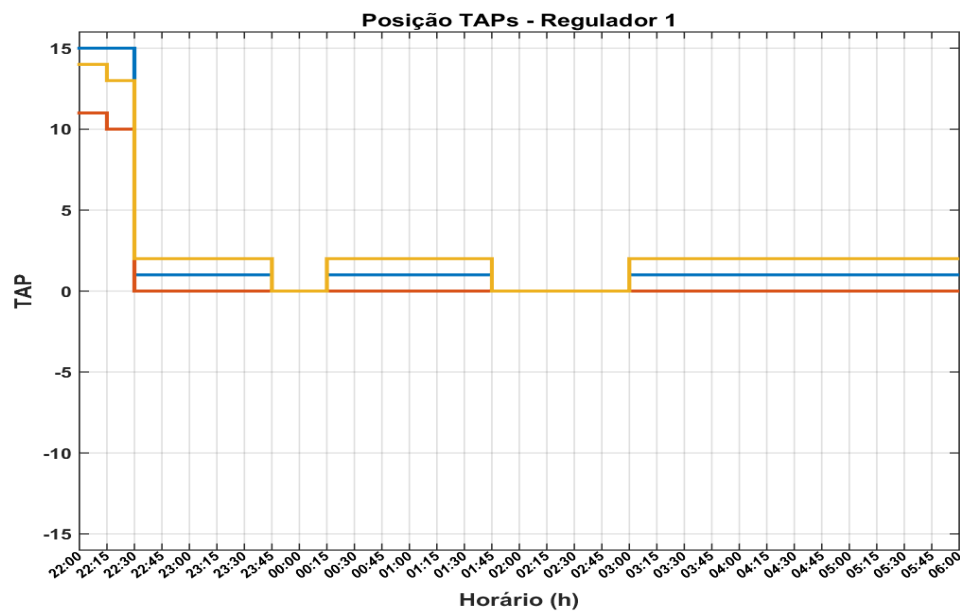


Figura 8.56: Posição dos taps do Regulador 1 – Cenário 4.2

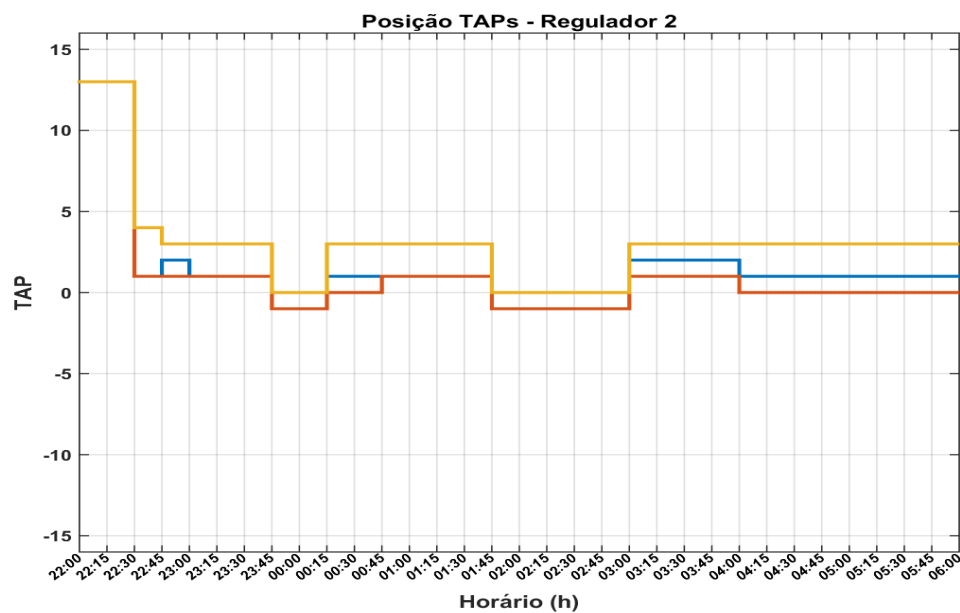


Figura 8.57: Posição dos taps do Regulador 2 – Cenário 4.2

8.3.2.2.6 Frequência – Micro Rede

Para o Cenário 4.2, a micro rede opera em modo ilhado com controle primário executado pelo método *droop* e controle secundário provido pelo método de controle de frequência baseado em *droop* aplicado a micro redes.

Por meio da observação do perfil de frequência apresentado pela Figura 8.58 nota-se que diferentemente do Cenário 3.1, com ausência de controle secundário, a frequência da micro rede para o Cenário 4.1 se encontra extremamente próxima ao valor de referência durante todo período de ilhamento, sofrendo pequenas flutuações ao longo das variações de demanda.

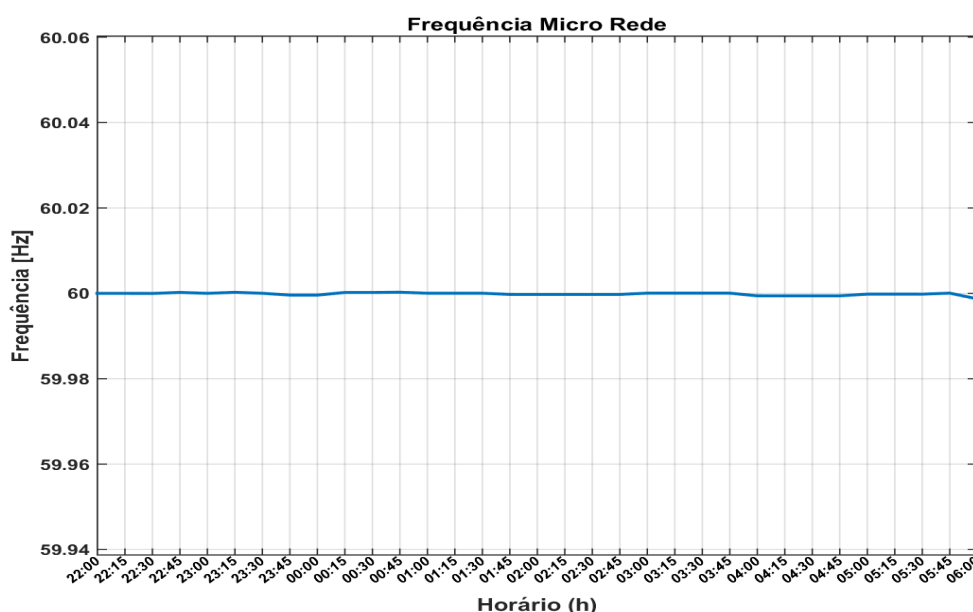


Figura 8.58: Nível de frequência da micro rede – Cenário 4.2

8.3.2.2.7 Grupo de Prioridade Atendido

Devido a não autossuficiência energética por parte da micro rede, após o ilhamento, a política de gerenciamento de demanda identificou que o grupo de prioridade de LV '2' é o maior agrupamento de cargas possível de ser suprido, sem que fosse afetado o atendimento ao longo do período de funcionalidade do(s) grupo(s) com nível(is) de prioridade superior.

Contudo, em determinados momentos ao longo da operação onde a potência disponível seria insuficiente para o atendimento ao grupo de prioridade de LV '2', o suprimento foi executado ao grupo de prioridade antecedente (prioridade superior), na situação LV '1', e posteriormente reestabelecido ao grupo de LV '2' quando a geração local dispunha de capacidade para o suprimento à demanda de maneira satisfatória, sem afetar o período funcional dos grupos de maior prioridade.

Essa ação é possibilitada pela ferramenta de gerenciamento de demanda que traça o comportamento do sistema e determina os grupos de prioridade que podem ser supridos durante cada janela de tempo visando a maximização da utilização do potencial energético disponível na micro rede.

Os grupos de carga supridos ao longo do período analisado são apresentados pela Figura 8.59.

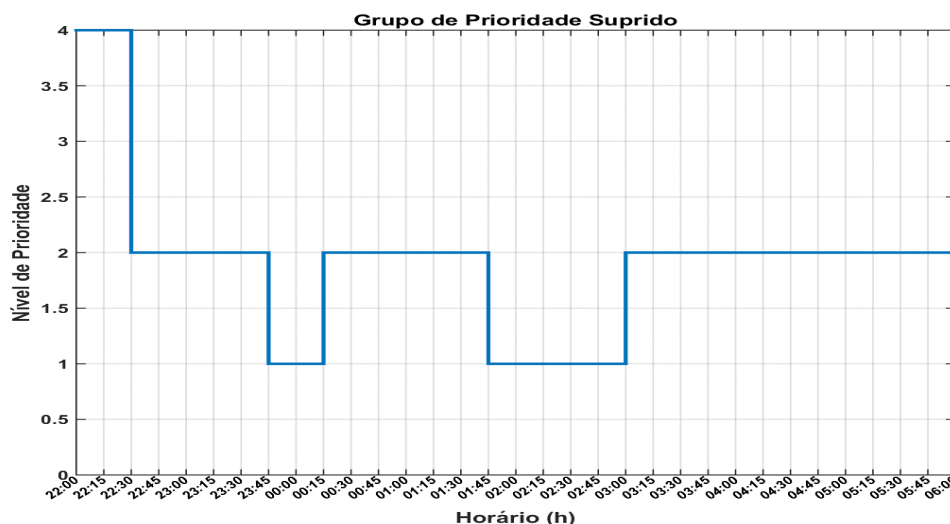


Figura 8.59: Grupo de Prioridade Atendido – Cenário 4.2

8.3.2.2.8 Conclusões Parciais

Os resultados indicam que as metodologias propostas de gerenciamento de demanda e controle secundário são extremamente eficientes em suas propostas e pertinentes a operação de micro redes em modo ilhado.

A partir dos resultados é possível observar que a frequência da micro rede não sofre impactos quando submetida a significativas variações de demanda, como as ocasionadas na ausência de controle secundário, respeitando os limites operacionais durante todo o período analisado.

Sendo a metodologia de gerenciamento de demanda capaz de traçar o comportamento do sistema e determinar de maneira precisa, os grupos de prioridade que devem ser supridos durante cada janela de tempo para a maximização da utilidade do potencial energético disponível na micro rede em operação isolada.

9. Conclusão

Esse trabalho aborda diversos aspectos operacionais de micro redes sob a perspectiva estática, desenvolvendo e propondo diversas metodologias para a operação, análise e planejamento de micro redes.

- Ferramenta para execução de fluxo de potência para micro redes considerando o método de controle *droop*, participação de geração local despachável, não despachável e inserção de VEHs;
- Controle de frequência baseado em *droop* aplicado a micro redes;
- Processo de carregamento controlado de unidades VEHs;
- Operação de veículos elétricos como unidades armazenadoras de energia despacháveis;
- Dispositivo inteligente para controle, medição, processamento, atuação e comunicação do conjunto VEH-Carregador com o agente operador do sistema;
- Política de suprimento para micro redes em situação de ilhamento baseada em grupos de prioridade e período funcional de operação;
- Interface gráfica para análise em tempo real do comportamento da micro rede.

Cada uma das metodologias propostas apresenta uma significativa contribuição para a análise e operação de micro redes.

A grande contribuição deste trabalho reside na união das metodologias propostas para *criação de uma ferramenta* capaz de desenvolver análises estáticas, de planejamento e operação para micro redes conectadas à rede principal e/ou operando em modo ilhado.

Para a validação e demonstração do potencial da ferramenta desenvolvida na realização de atividades de análise, operação e planejamento de micro redes, diversas configurações de micro redes foram testadas.

Dentre elas destacam-se a micro rede conectada à rede principal, micro rede ilhada com autossuficiência energética, micro rede ilhada sem autossuficiência energética, situações de ilhamento com reconexão a rede principal, ilhamento sem reconexão a rede principal e os diversos métodos de controle disponibilizados.

Sendo possibilitada as considerações de controle primário executado por barra de referência ou método *droop* associado ao controle secundário executado por barra de referência, controle de frequência baseado em método *droop* para micro redes ou ausência de controle secundário.

Ao todo, 13 modos operacionais fundamentais são possibilitados gerando incontáveis cenários quando distintas perspectivas são adotadas como foco de estudo, a exemplo, a análise da capacidade de sobrevivência da micro rede ao período de ilhamento, e a influência que os distintos participantes exercem nessa capacidade, como volume de energia armazenada nos VEHs, potência instalada disponível para despacho, geração local não despachável, período funcional dos grupos de carga, entre outros.

Por meio de sua alta capacidade de gerenciamento, o processo de carregamento de veículos elétricos é desenvolvido de maneira controlada, e na ocorrência de ilhamento, as unidades VEHs podem atuar como armazenadores de energia despacháveis para auxiliar a micro rede através do dispositivo inteligente associado ao conjunto VEH-Carregador para regulação do despacho.

O ajuste da demanda em modo de operação ilhado é proporcionado pela política de gerenciamento de demanda para micro redes em situação de ilhamento, não executando apenas uma metodologia de corte de carga, mas traçando o comportamento futuro do sistema e de maneira precisa, executando a determinação dos grupos de prioridade que devem ser supridos durante cada janela de tempo para a maximização da utilidade do potencial energético disponível na micro rede em operação isolada. Proporcionando o melhor bem estar ao usuário dentro das limitações impostas pelo ilhamento.

Que via a interface gráfica desenvolvida, pode-se acompanhar em tempo real todo o funcionamento da micro rede e executar o registro dos parâmetros de interesse para a realização de futuras análises e relatórios.

Os resultados apresentam uma ferramenta robusta capaz de operar micro redes com as mais diversas configurações e submetidas aos mais adversos cenários dentro dos limites estabelecidos por norma ou pré-definidos pelo agente operador, por meio de uma variada gama de metodologias de controle e ferramentas para gerenciamento de demanda e despacho de unidades geradoras.

Como trabalhos futuros propostas para análises dinâmicas sob as perspectivas de estabilidade angular e de tensão devem ser desenvolvidas para verificação do comportamento de micro redes durante o período transitório. Metodologias para otimização dos recursos disponíveis em micro redes são outra frente com grande potencial de pesquisa, tal como análises e métodos para determinação de regiões ótimas para criação de micro redes em sistemas tradicionais de grande porte.

Artigos Publicados

Ao longo do período de desenvolvimento deste trabalho seis artigos foram produzidos.

1. **RODRIGUES, Y. R.**; SOUZA, M. F. Z. ; ZAMBRONI DE SOUZA, ANTONIO CARLOS ; LOPES, I. L.. “Unbalanced Load Flow for Microgrids Considering Droop Method”. *Power Engineering Society General Meeting*, Boston, 2016.
2. **RODRIGUES, Y. R.**; SOUZA, M. F. Z. ; ZAMBRONI DE SOUZA, ANTONIO CARLOS. “Considerations on islanded microgrid frequency control capability within different generation configurations”. *12th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, Curitiba, 2016.
3. **RODRIGUES, Y. R.**; MONTEIRO, M. R. ; MONTEIRO, J. R. ; NUNES, F. B. ; RIBEIRO, P. F. ; SOUZA, A. C. Z.. “Impact of Non-Linear Loads and Renewable Generation on a University Research Building”. *17th International Conference on Harmonics And Quality Of Power*, Belo Horizonte, 2016.
4. **RODRIGUES, Y. R.**; MONTEIRO, M. R. ; RIBEIRO, P. F. ; ZAMBRONI DE SOUZA, ANTONIO CARLOS. “Demand Profile Processing Methodology for Information Acquisition”. *12th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, Curitiba, 2016.
5. **RODRIGUES, Y. R.**; MONTEIRO, M. R. ; SOUZA, A. C. Z. ; PINHEIRO, C. A. M.. “Determinação de Condições Operativas Estáveis para Sistemas Elétricos: Uma Abordagem por Redes Neurais”. *X Congresso Brasileiro de Planejamento Energético*, Gramado, 2016.
6. **RODRIGUES, Y. R.**; SOUZA, M. F. Z. ; ZAMBRONI DE SOUZA, ANTONIO CARLOS. “Influence of Load Types and Renewable Generation in Microgrids Load Margin”. *6th International Conference on CLEAN ELECTRICAL POWER*, Ligure, 2017.

Apêndice A

Este apêndice apresenta os resultados para a operação da micro rede referente ao Cenário 3.2, sendo as seguintes características associadas a micro rede.

- Operação da Micro Rede em modo Ilhado;
 - Micro Rede operando em modo de Prioridade de Cargas. Suprimento da demanda realizado por Geração Local e Despacho de veículos elétricos;
 - Controle primário provido por Controle *Droop* Aplicado a Micro Redes;
- Ausência de Controle secundário;
 - Micro rede ilhada sem reconexão à rede principal.

A.1 Resultados

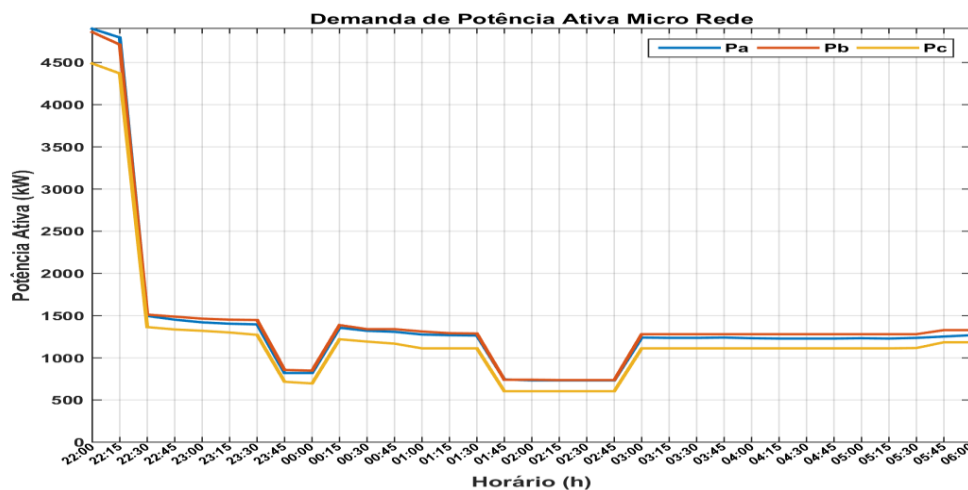


Figura A.1: Demanda de potência ativa micro rede – Cenário 3.2

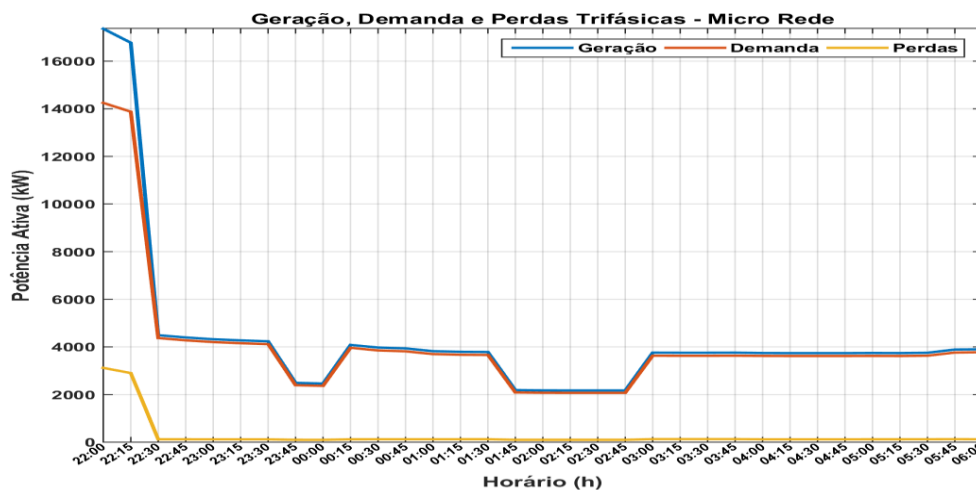


Figura A.2: Geração, demanda e perdas trifásicas micro rede – Cenário 3.2

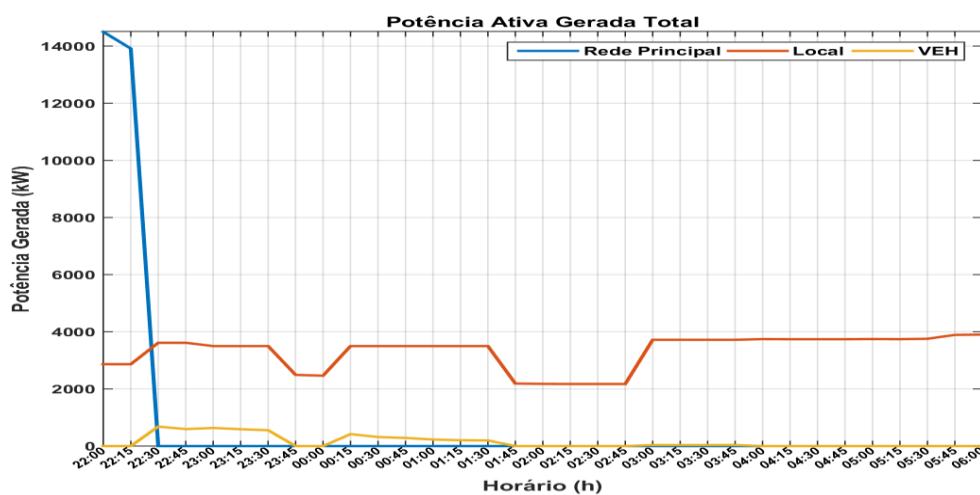


Figura A.3: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal, geração local e VEHs – Cenário 3.2

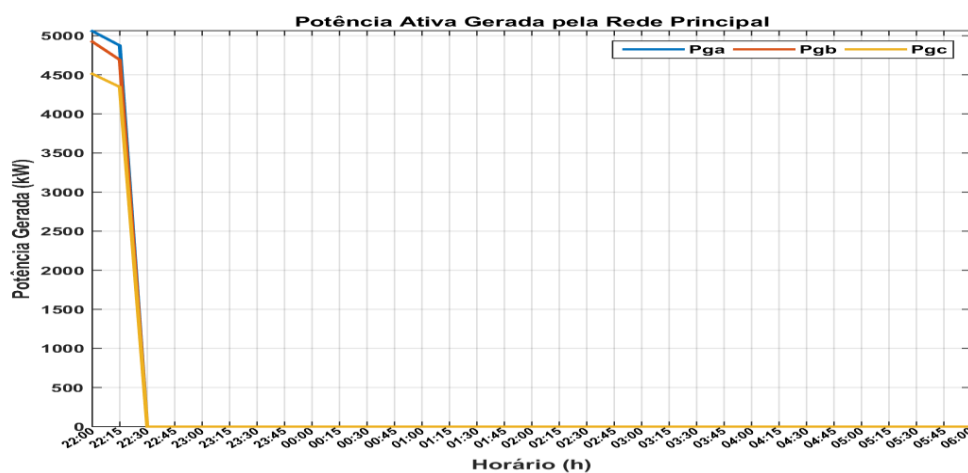


Figura A.4: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal – Cenário 3.2

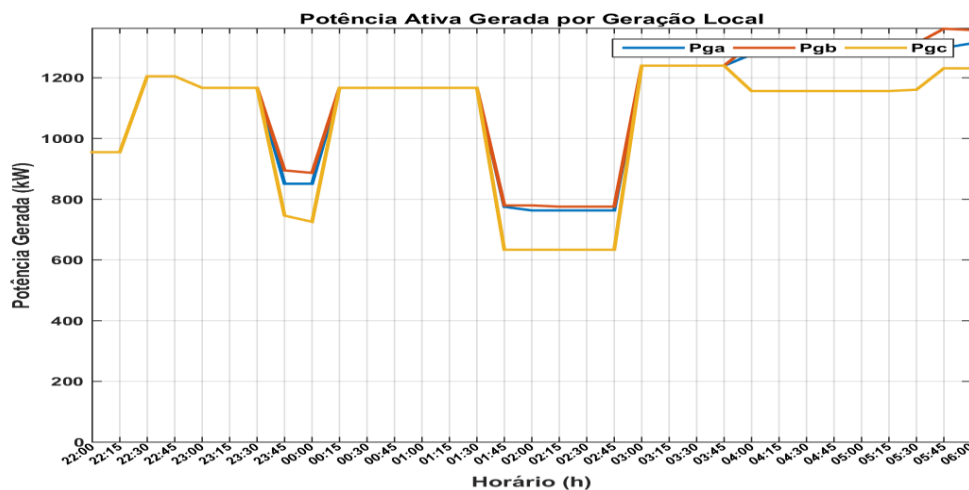


Figura A.5: Potência ativa suprida a micro rede pela geração local – Cenário 3.2

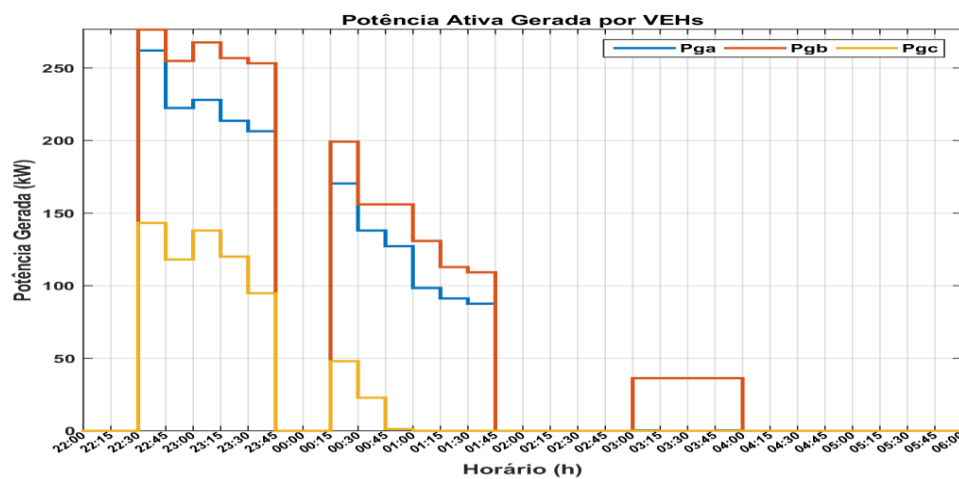


Figura A.6: Potência ativa suprida a micro rede pela geração VEHs – Cenário 3.2

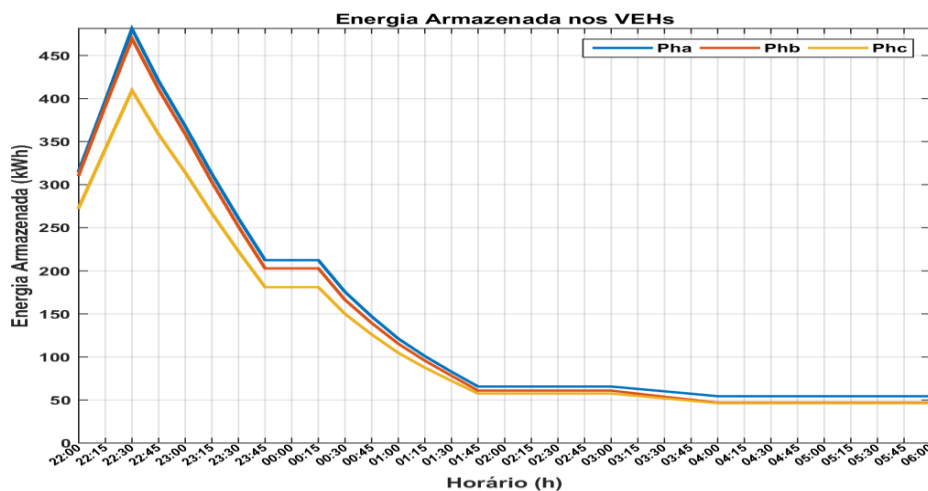


Figura A.7: Energia armazenada nas unidades VEHs – Cenário 3.2

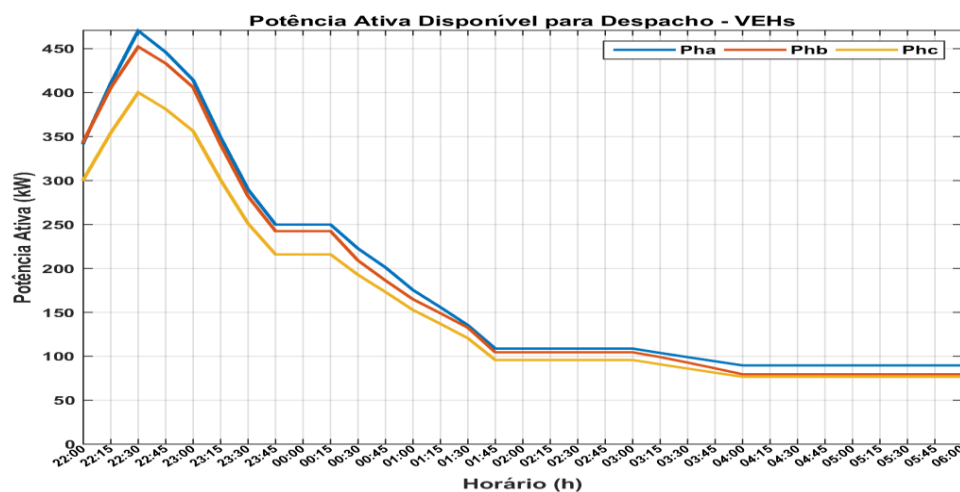


Figura A.8: Potência ativa disponível para despacho nas unidades VEHs – Cenário 3.2

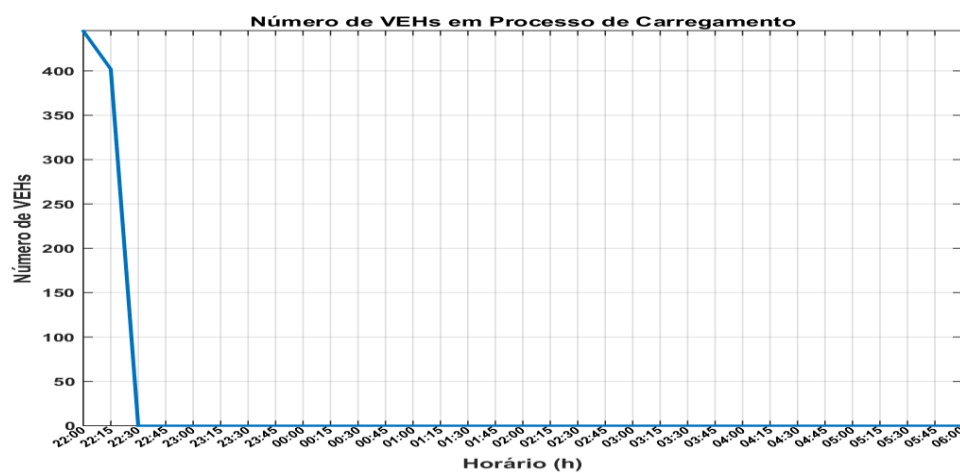


Figura A.9: Número de VEHs em processo de carregamento – Cenário 3.2

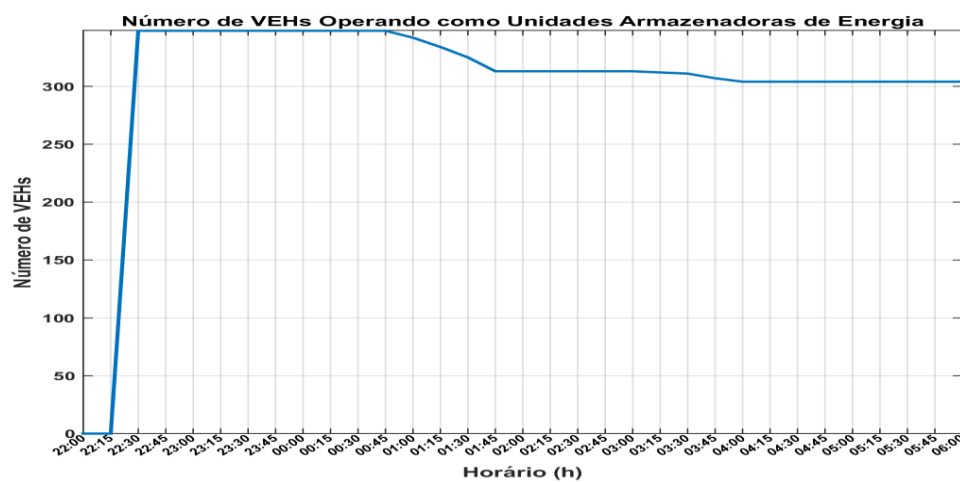


Figura A.10: Número de VEHs operando como armazenadores de energia despacháveis – Cenário 3.2

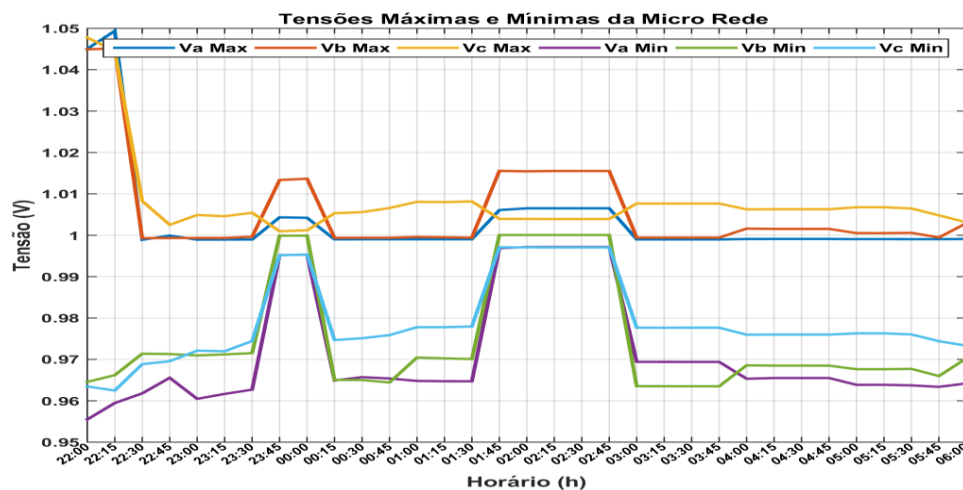


Figura A.11: Tensões máximas e mínimas da micro rede por fase – Cenário 3.2

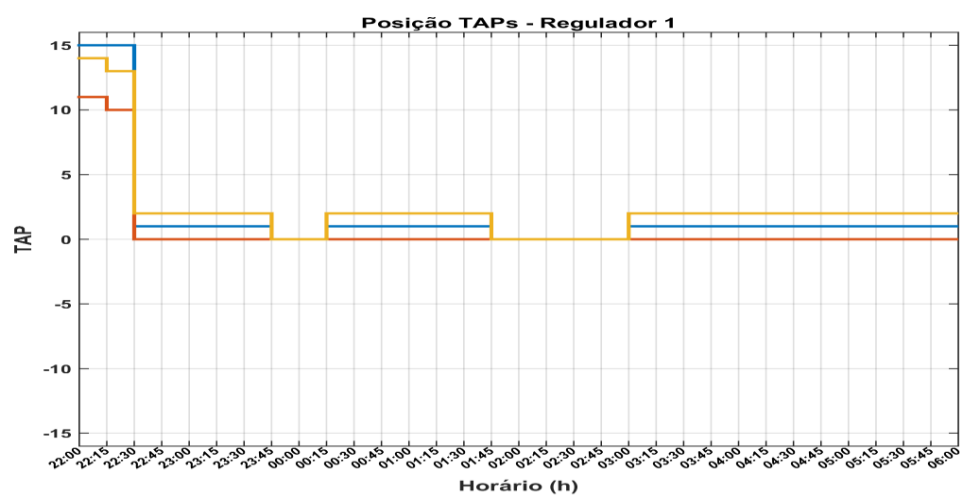


Figura A.12: Posição dos taps do regulador 1 – Cenário 3.2

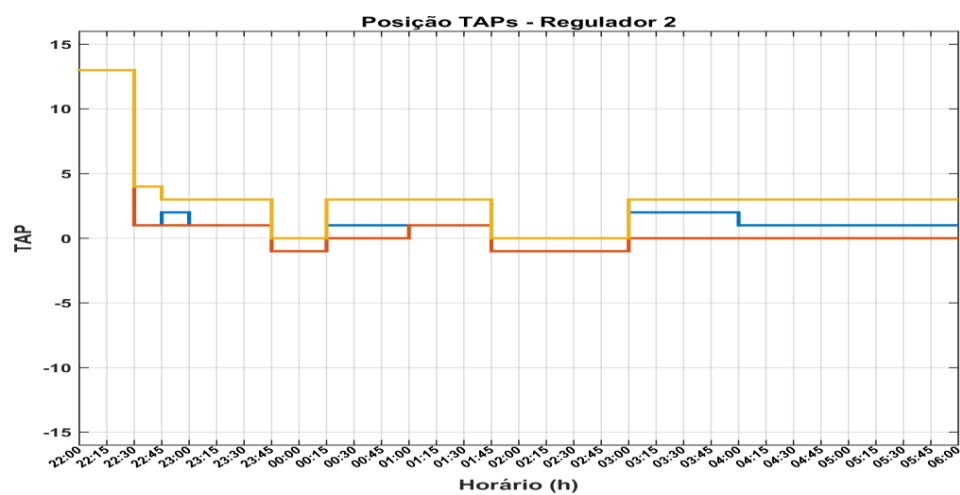


Figura A.13: Posição dos taps do regulador 2 – Cenário 3.2

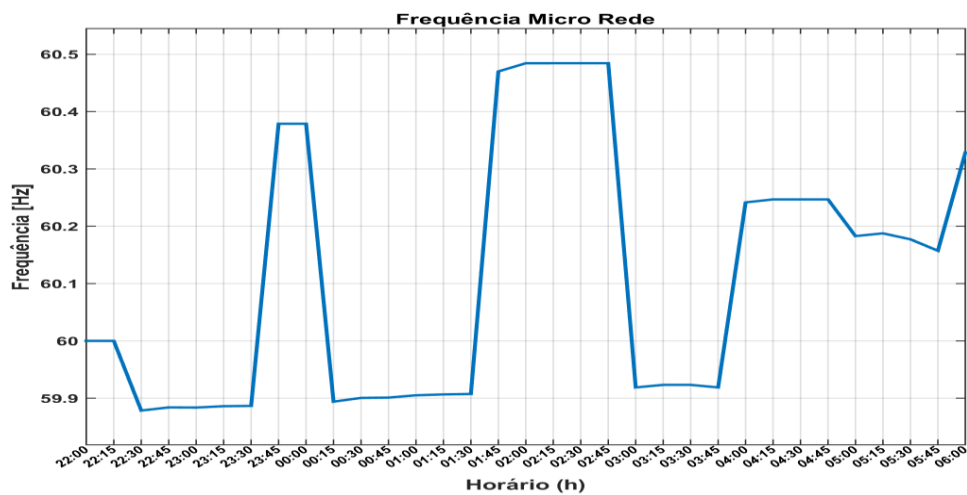


Figura A.14: Nível de frequência da micro rede – Cenário 3.2

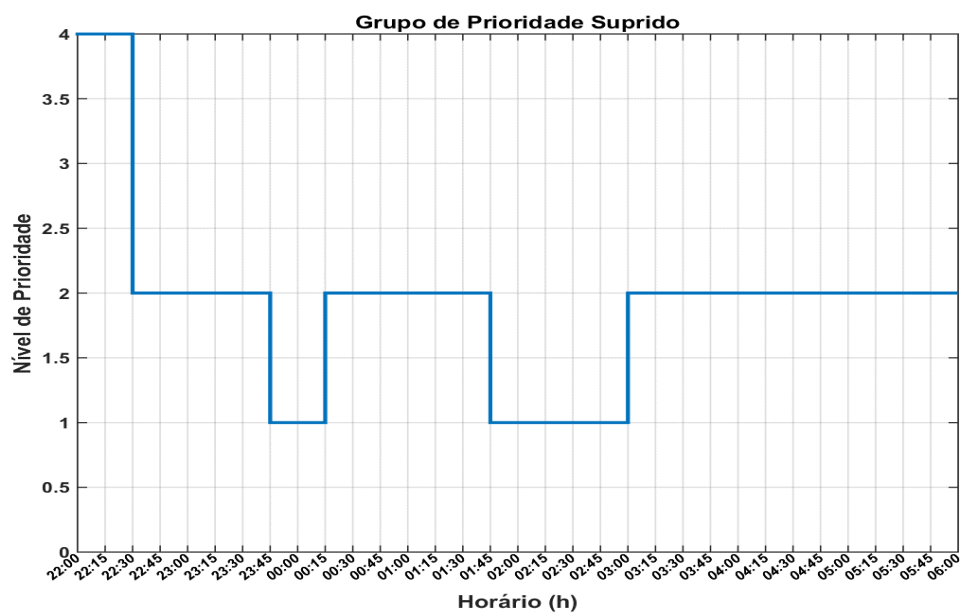


Figura A.15: Grupo de Prioridade Atendido – Cenário 3.2

Apêndice B

Este apêndice apresenta os resultados para a operação da micro rede referente ao Cenário 4.1, sendo as seguintes características associadas a micro rede.

- Operação da Micro Rede em modo Ilhado;
 - Micro Rede operando em modo de Prioridade de Cargas. Suprimento da demanda realizado por Geração Local e Despacho de veículos elétricos;
 - Controle primário provido por Controle *Droop* Aplicado a Micro Redes;
 - Controle secundário provido pelo método de Controle de Frequência baseado em *Droop* Aplicado a Micro Redes.
 - Micro rede ilhada com reconexão à rede principal.

B.1 Resultados

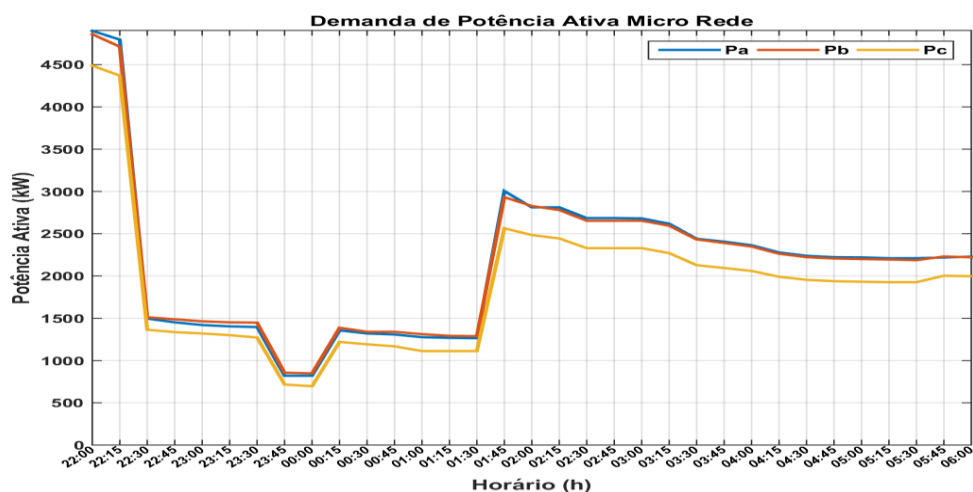


Figura B.16: Demanda de potência ativa micro rede – Cenário 4.1

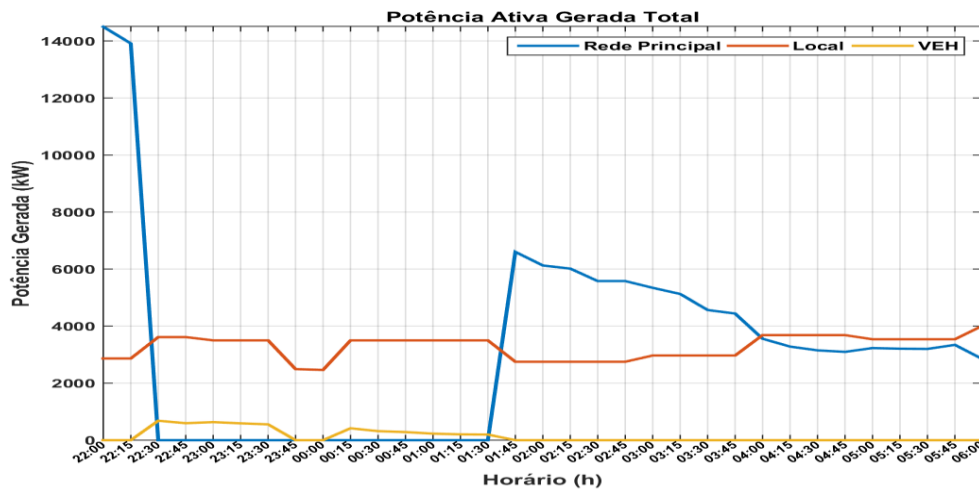


Figura B.17: Geração, demanda e perdas trifásicas micro rede – Cenário 4.1

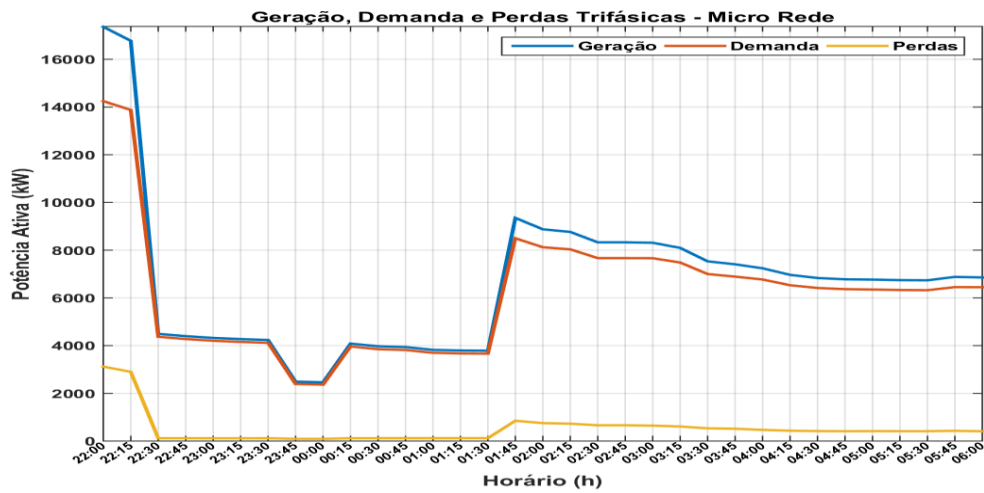


Figura B.18: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal, geração local e VEHs – Cenário 4.1

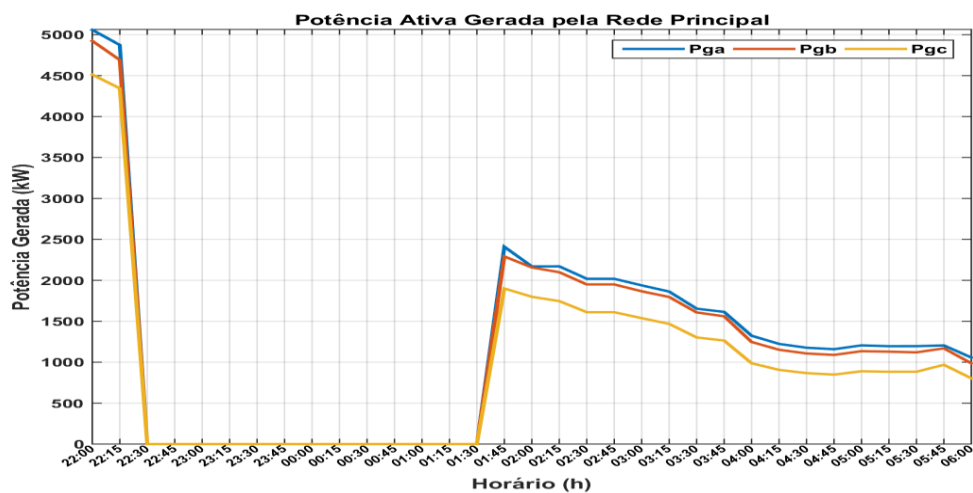


Figura B.19: Potência ativa suprida a micro rede pela rede principal – Cenário 4.1

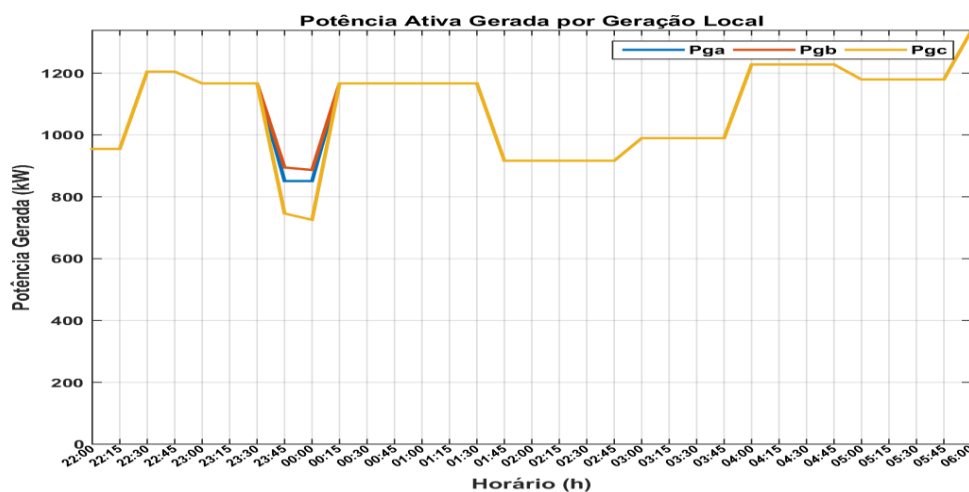


Figura B.20: Potência ativa suprida a micro rede pela geração local – Cenário 4.1

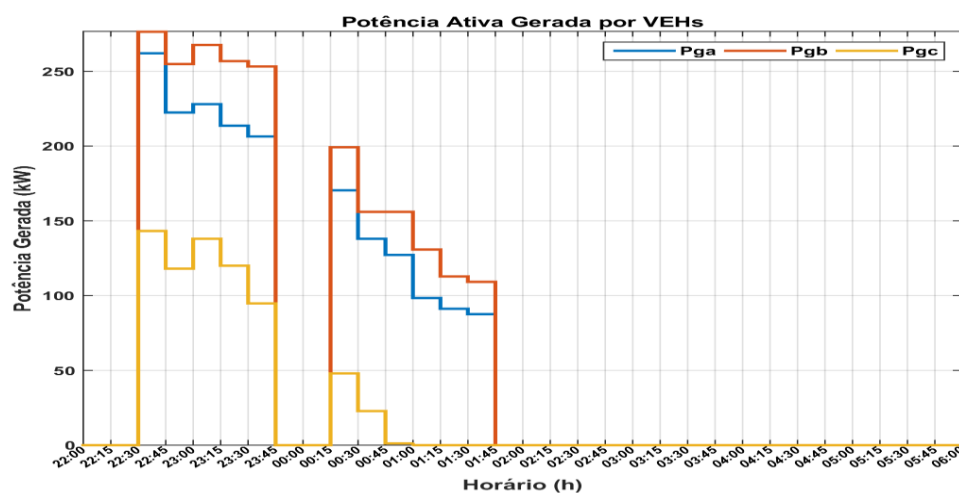


Figura B.21: Potência ativa suprida a micro rede pela geração VEHS – Cenário 4.1

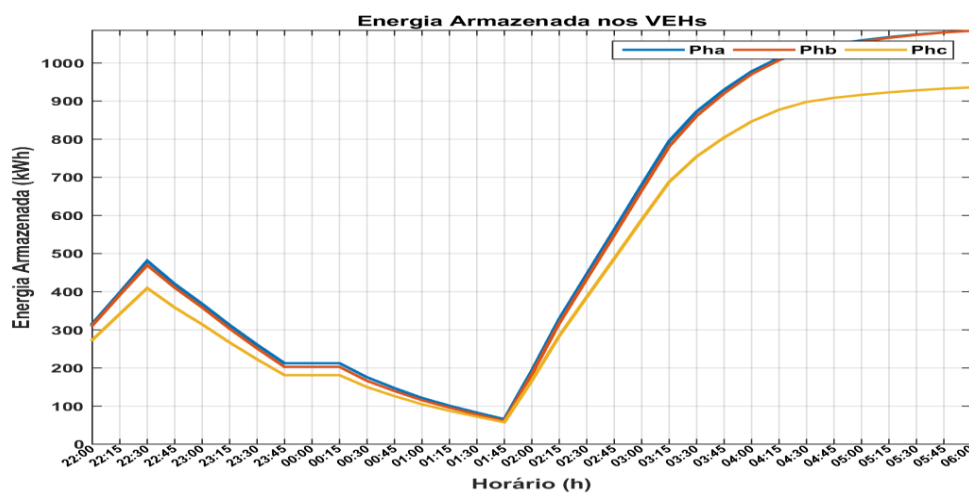


Figura B.22: Energia armazenada nas unidades VEHS – Cenário 4.1

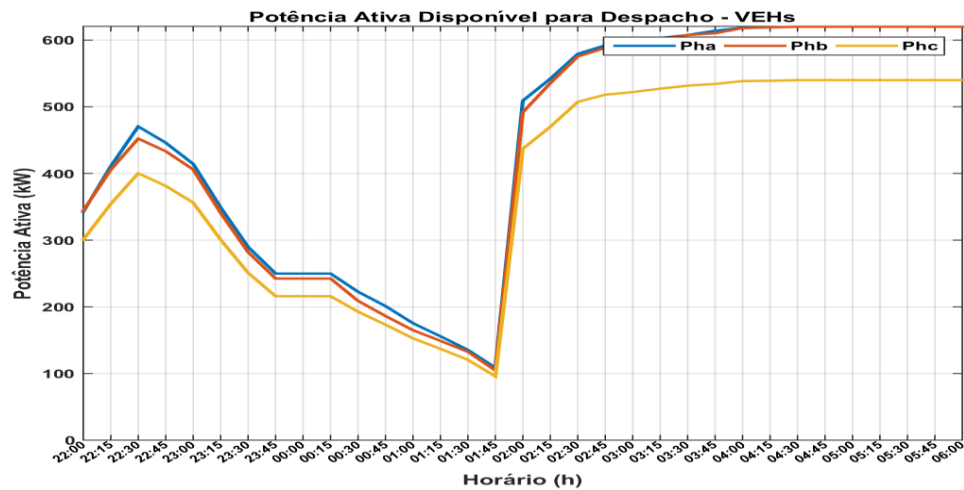


Figura B.23: Potência ativa disponível para despacho nas unidades VEHS – Cenário 4.1

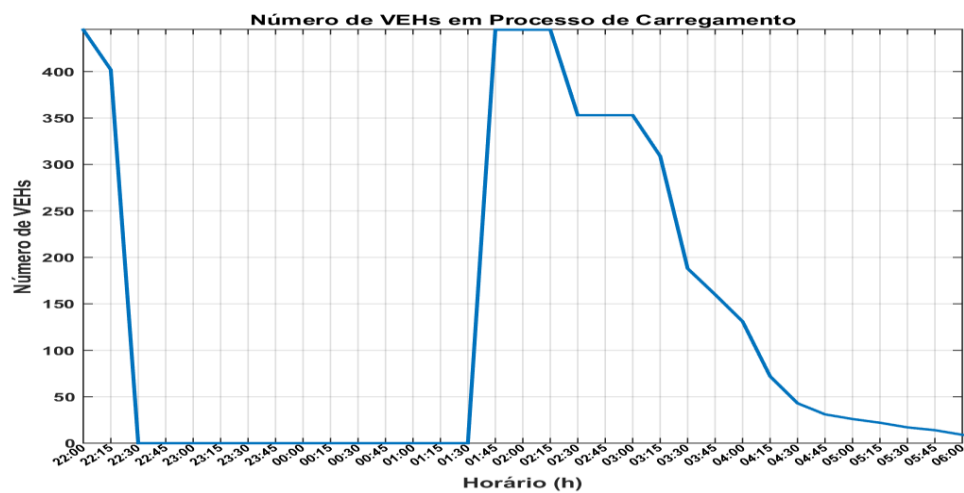


Figura B.24: Número de VEHS em processo de carregamento – Cenário 4.1

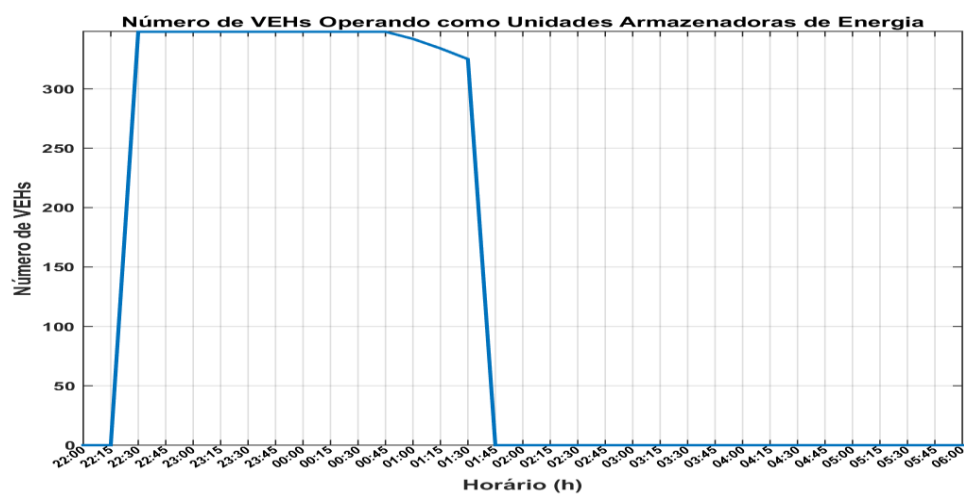


Figura B.25: Número de VEHS operando como armazenadores de energia despacháveis – Cenário 4.1

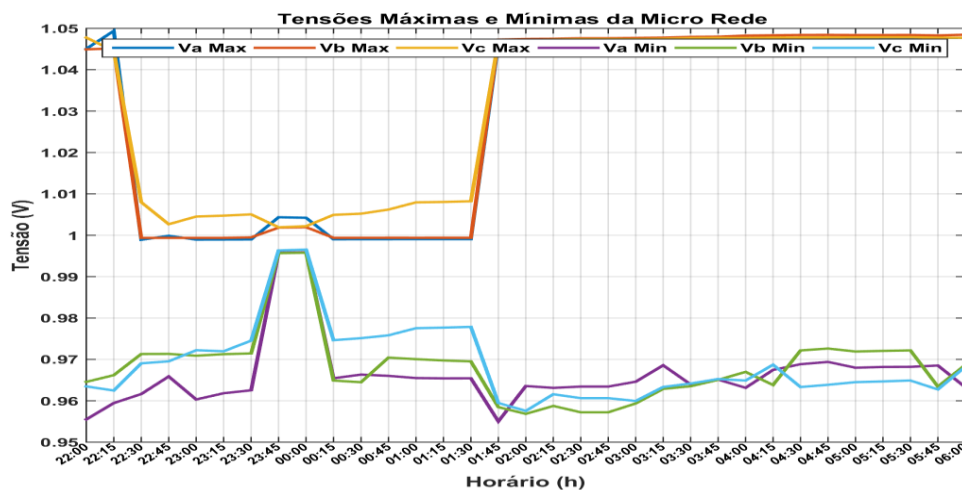


Figura B.26: Tensões máximas e mínimas da micro rede por fase – Cenário 4.1

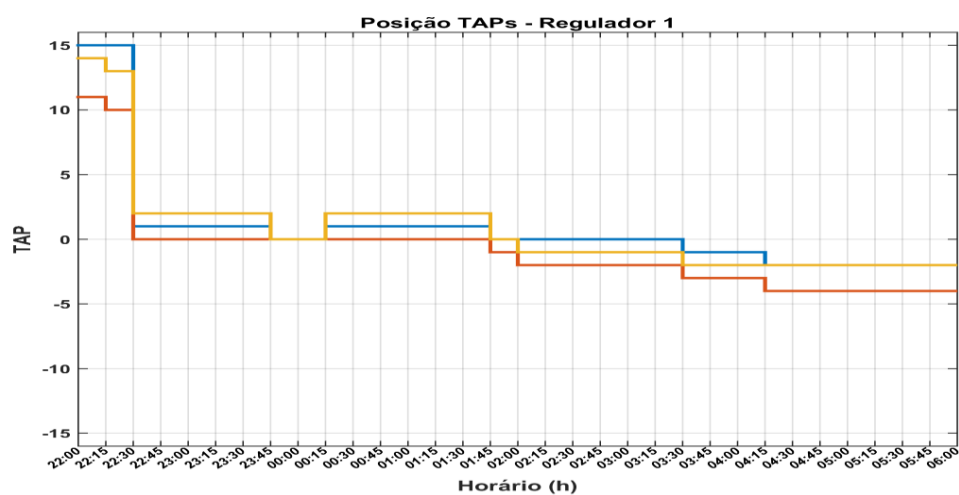


Figura B.27: Posição dos taps do regulador 1 – Cenário 4.1

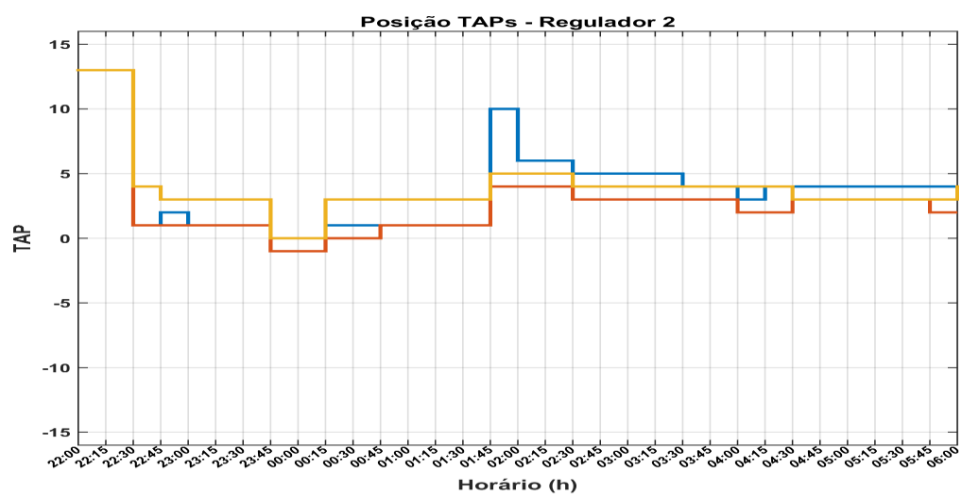


Figura B.28: Posição dos taps do regulador 2 – Cenário 4.1

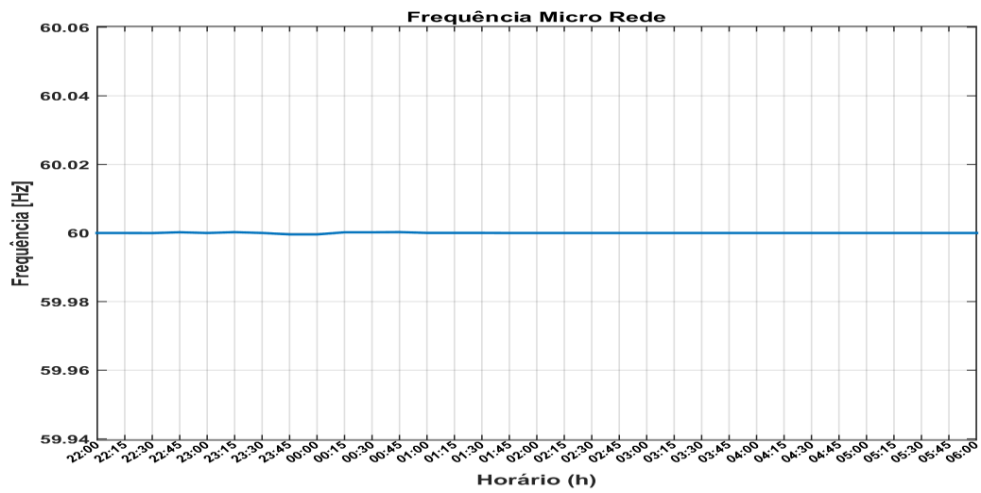


Figura B.29: Nível de frequência da micro rede – Cenário 4.1

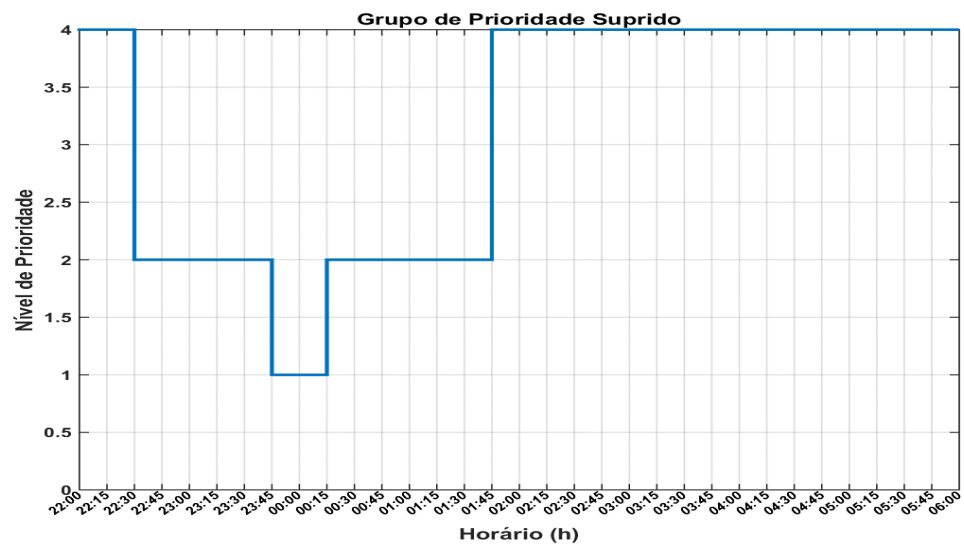


Figura B.30: Grupo de Prioridade Atendido – Cenário 4.1

REFERÊNCIAS

- [1] RAVICHANDRAN, A.; MALYSZ, P.; SIROUSPOUR, S.; EMADI, A., "The critical role of microgrids in transition to a smarter grid: A technical review," Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2013 IEEE, vol., no., pp.1-7, 16-19 June 2013.
- [2] MOHN, FRITZ WALTER, ZAMBRONI DE SOUZA, A. C.. "Tracing PV and QV Curves with the Help of a CRIC Continuation Method". IEEE Transactions on Power Systems, v. 21, p. 1104-1114, 2006.
- [3] M. M. ARAUJO, O. S. MENDEZ, R. B. PRADA, "Allocation of reactive power support based on a voltage source model", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 33, 439-444.
- [4] ARMANDO M. L. SILVA, J. G. C. COSTA, C. M. MATTAR, "A Probabilistic Approach for Determining the Optimal Amount of Transmission System Usage", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, 1557-1564.
- [5] R. V. OLIVEIRA, R. A. RAMOS, N. G. BRETAS, "An algorithm for computerized automatic tuning of power system stabilizers", Control Engineering Practice, vol. 18, 45-54.
- [6] M. C. RODRIGUEZ PAZ, RENATO GONÇALVES FERRAZ, ARTURO SUMAN BRETAS, ROBERTO C. LEBORGNE, "System unbalance and fault impedance effect on faulted distribution networks", Computers & Mathematics with Applications, vol. 60, 1105-1114.
- [7] PEÇAS LOPES, J.A., MOREIRA, C.L., MADUREIRA, A.G., 'Defining control strategies for microgrids islanded operation', IEEE Trans. on Power Systems, 21, (2), May 2006, pp. 916- 924.
- [8] GUERRERO, J.M., GARCÍA DE VICUÑA, L., MATAS, J., CASTILLA, M. AND MIRET, J., 'A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems', IEEE Trans. on Power Electron., 19, (5), September 2004, pp. 1205-1213
- [9] M. M. A. ABDELAZIZ, H. E. FARAG, E. F. EL-SAADANY, Y. A. I. MOHAMED, "A Novel and Generalized Three-Phase Power Flow Algorithm for Islanded Microgrids Using a Newton Trust Region Method", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 28, no. 1, pp. 190-201, 2013.
- [10] L. RESE, A. SIMÕES COSTA, A. SILVA, "A Modified Load Flow Algorithm for Microgrids Operating in Islanded Mode", IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2013, Brazil.

- [11] A. C. ZAMBRONI DE SOUZA, M. SANTOS, M. CASTILLA, J. MIRET, L. G. DE VICUÑA, D. MARUJO, “Voltage security in microgrids: a power flow-based approach considering droop-controlled inverters”, IET Renewable Power Generation, vol.9, no.8, pp.954-960, 2015.
- [12] FARAG, H. E.; EL-SAADANY, E.F.; EL SHATSHAT, R.; ZIDAN, A.; “A generalized power flow analysis for distribution systems with high penetration of distributed generation”. Electric Power Systems Research, No. 81, pp. 1499-1506, 2011.
- [13] RODRIGUES, Y. R.; SOUZA, M. F. Z.; ZAMBRONI DE SOUZA, ANTONIO CARLOS; LOPES, I. L.. Unbalanced Load Flow for Microgrids Considering Droop Method. IEEE PES General Meeting (PESGM), 2016, Boston.
- [14] RODRIGUES, Y. R.; SOUZA, M. F. Z.; ZAMBRONI DE SOUZA, ANTONIO CARLOS. “Considerations on islanded microgrid frequency control capability within different generation configurations”. 12th IEEE/IAS International Conference on INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON), 2016, Curitiba.
- [15] Electrek, “All new cars mandated to be electric in Germany by 2030”, Disponível em: <https://electrek.co/2016/06/14/all-new-cars-mandated-electric-germany-2030>, Acesso em: 12/12/2016.
- [16] DW, “German government confirms e-car subsidies”, Disponível em: <http://www.dw.com/en/german-government-confirms-e-car-subsidies/a-19217462>, Acesso em: 12/12/2016.
- [17] OLIVEIRA, D. Q., “Otimização Da Recarga De Veículos Elétricos E Híbridos Recarregáveis Em Sistemas De Distribuição”, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – Brasil, 2015.
- [18] KRAMER, B.; CHAKRABORTY, S.; KROPOSKI, B. “A Review of Plug-in Vehicles and Vehicle-to-Grid Capability”, Proc. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, pp. 2278–2283, 2008.
- [19] KEMPTON, W.; TOMIĆ, J.; “Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue”, Journal of Power Sources, No. 144, pp. 268–279, 2005a.
- [20] QUINN, C.; ZIMMERLE, D.; BRADLEY, T. H.; “The effect of communication architecture on availability, reliability, and economics of plug-in hybrid electric vehicle-to-grid ancillary services”. Journal of Power Sources, No. 195, pp. 1500-1509, 2010.
- [21] A. C. ZAMBRONI DE S AND B. I. L. LOPES, “Quasi-Dynamic Model and Strategy for Control Actions”, Electr. Power Components Syst., vol. 33, no. 9, pp. 1057–1070, 2005.
- [22] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. 01 de Janeiro de 2015. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf, Acesso em: 12/12/2016.

- [23] S. PADRÓN, M. HERNÁNDEZ, AND A. FALCÓN, “Reducing Under-Frequency Load Shedding in Isolated Power Systems Using Neural Networks. Gran Canaria: A Case Study”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 63–71, 2016.
- [24] Y. HONG, M. HSIAO, Y. CHANG, Y. LEE, AND H. HUANG, “Multiscenario Underfrequency Load Shedding in a Microgrid Consisting of Intermittent Renewables”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp. 1610–1617, 2013.
- [25] NASCIMENTO, B. N., “Uma Proposta De Metodologia De Corte De Carga Em Microrredes Ilhadas”, Tese (Doutorado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – Brasil, 2016.
- [26] RODRIGUES, Y. R., SOUZA, M. F. Z., SOUZA, A. C. Z., LOPES, I. L., OLIVEIRA, D. Q.. “Recharging Process Of Plug In Vehicles By Using Artificial Immune System And Tangent Vector”, 22nd International Conference and Exhibition on ELECTRICITY DISTRIBUTION (CIRED), 2013, Estocolmo.
- [27] REIS, YURI, ZAMBRONI DE SOUZA, ANTONIO CARLOS, LIMA, ISAIAS, ALMEIDA, ADRIANO BATISTA, ZAMBRONI DE SOUZA, MATHEUS FERREIRA. “Load margin assessment of systems with distributed generation with the help of a neuro-fuzzy method”, *IET Renewable Power Generation*, v. 9, p. 331-339, 2014.
- [28] ZAMBRONI DE SOUZA, A. C., CANIZARES, C., QUINTANA, V. H.. “New Techniques to Speed up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vector”. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, v. 12, n.3, p. 1380-1387, 1997.
- [29] COSTA, V. N., MONTEIRO, M. R., “Particle Swarm Optimization Applied to Reactive Power Compensation”, 17th International Conference on HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 2016, Belo Horizonte.
- [30] SRINIVAS, M. S.; “Distribution Load Flows: A brief review”. In: *Proc. of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol 2, pp. 942-945, Cingapura, 2000.
- [31] BROADWATER, R.P.; CHANDRASEKARAM, A.; HUDDLESTON, C.T.; KHAN, A.H.; “Power Flow Analysis of Unabanced Multiphase Radial Distribution Systems”, *ElectricPower System Research*, vol. 14, 1988.
- [32] SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X.; “A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 2, pp. 753-762, Maio 1988.
- [33] CHENG, C.S.; SHIRMOHAMMADI, D.; “A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 2, pp. 671-679, 1995.

- [34] CHEN, T. H.; CHEN, M.S.; HWANG, K. J.; KOTAS, P; CHEBLI, E. A.; “A Distribution System Power Flow Analysis - A Rigid Approach”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, pp. 1146-1152, 1991.
- [35] GARCIA, A. V.; MONTICELLI, A.; FRANÇA, A. M.; TANAKA, M.; MURARI, C. A. F.; “Automatização da Distribuição de Energia Elétrica: Simulação utilizando Fluxo de Carga Desacoplado Rápido”. 5º Congresso Brasileiro de Automática, pp. 256-261, Campina Grande, 1984.
- [36] GARCIA, A. V.; ZAGO, M. G.; “Fluxo de Carga Desacoplado Trifásico”. SBA Controle & Automação, Vol. 7, No. 1, pp. 1-6, Janeiro-Fevereiro-Março-Abril, 1996.
- [37] ARAVINDHABABU, P.; ASHOKKUMAR, R.; “A robust decoupled power flow for distribution systems”. Energy Conversion and Management, No. 52, pp. 1930-1933, 2011.
- [38] DZIMANO, B. S. G. Modeling of Photovoltaic Systems. Dissertação (Mestrado), The Ohio State University, USA, 2008.
- [39] MOREIRA, C. C. L. Identification and Development of Microgrids Emergency Control Procedures. Tese (Doutorado) — FEUP, Porto – Portugal, 2008.
- [40] VILLALVA, M.; GAZOLI, J.; FILHO, E. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 24, n. 5, p.1198–1208, May 2009.
- [41] Almeida, A. B., “Um Modelo Unificado para Análise de Geração Distribuída em Sistemas de Transmissão e Distribuição”, Tese (Doutorado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – Brasil, 2015.
- [42] TARNOWSKI, G. C. Metodologia de Regulação da Potência Ativa para Operação de Sistemas de Geração Eólica com Aerogeradores de Velocidade Variável. Dissertação (Mestrado) — UFRGS, Porto Alegre – Brasil, 2006.
- [43] J. YU, L. JING, L. HAITAO, W. MING, L. YANG, AND Y. HUI, “Research on Microgrid Reconfiguration under rural network fault”, Internacional Conference on Power System Technology, no. 7, pp. 1–4, 2014.
- [44] L. HUI, S. JIAN, AND L. SIGE, “Reliability Evaluation of Distribution System Containing MicroGrid”, Internacional Conference on Electric Distribution, 2010.
- [45] R. BILLINTON AND G. BAI, “Generatin Capacity Adequacy Associated with Wind Energy”, IEEE Trans. Energy Convers., vol. 19, no. 3, pp. 641–646, 2004.
- [46] ACKERMANN, “Wind Power in Power Systems”. England: John Wiley & Sons, 2005.

- [47] IEEE-USA, Board of Directors, "Position Statement: Plug-in Electric Hybrid Vehicles, 15 June 2007", Disponível em: www.ieeeusa.org/policy, Acesso em: 12/12/2006.
- [48] WIRASINGHA S. G.; SCHOFIELD N.; EMADI, A. "Plug-in hybrid electric vehicle developments in the US: trends, barriers, and economic feasibility", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Harbin, China, 2008.
- [49] TOMIC, J.; KEMPTON, W. "Using fleets of electric-drive vehicles for grid support". *Journal of Power Sources*, No. 168, pp. 459–468, 2007.
- [50] NELSON, R. F.; "Power requirements for batteries in hybrid electric vehicles". *Journal of Power Sources*, No. 91, pp. 2-26, 2000.
- [51] KARDEN, E.; PLOUMEN, S.; FRICKE, B.; MILLER, T.; SNYDER, K.; "Energy storage devices for future hybrid electric vehicles". *Journal of Power Sources*, No. 168, pp. 2-11, 2007.
- [52] R. LASSETER AND P. PIAGI, "Providing premium power through distributed resources", *Hawaii International Conference on System Science*, pp. 1–9, 2000.
- [53] J. A. P. LOPES, S. MEMBER, C. L. MOREIRA, AND A. G. MADUREIRA, "Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 916–924, 2006.
- [54] D. GEOGAKIS, S. PAPATHANASSIOU, N. HATZIARGYRIOU, A. ENGLER, AND C. HARDT, "Operation of a prototype microgrid system based on micro-sources equipped with fast-acting power electronics interfaces", *IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, pp. 2521–2526, 2004.
- [55] X. HUANG, X. JIN, T. MA, AND Y. TONG, "A Voltage and Frequency Droop Control Method for Microsources", *International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp. 20–25, 2011.
- [56] FARMER, C.; HINES, P.; DOWDS, J.; BLUMSACK, S.; "Modeling the Impact of Increasing PHEV Loads on the Distribution Infrastructure", *Proc. Of 43rd Hawaii International Conference on System Sciences 2010*, pp. 1-10, Hawaii, EUA, 2010.
- [57] EVANS, P. B.; KULLOOR, S.; KROPOSKY, B.; "Impacts of Plug-in Vehicles and Distributed Storage on Electric Power Delivery Networks", *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC'09*, pp. 838-846, Dearborn, EUA, 2009.
- [58] CLEMENT-NYNS, K.; HAESSEN, E.; DRIESEN, J.; "The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid". *Electric Power Systems Research*, No. 81, pp. 185-192, 2011.
- [59] ACHA, S.; GREEN, T. C.; SHAH, N.; "Effects of Optimized Plug-in Hybrid Vehicle Charging Strategies on Electric Distribution Network Losses". *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, p.1-6, 2010.

- [60] PAPADOPOULOS, P.; SKARVELIS-KAZAKOS, S.; GRAU, I.; AWAD, B.; CIPCIGAN, L. M.; JENKINS, N.; “Impact of Residential Charging of Electric Vehicles on Distribution Networks, a Probabilistic Approach”, 45th International Universities Power Engineering Conference, UPEC, pp.1-5, 2010.
- [61] KERSTING, W.H.; “Radial distribution test feeders”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. Disponível em: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/>, Acesso em: 12/12/2016.
- [62] OLIVEIRA, D. Q.; ZAMBRONI DE SOUZA, A. C.; ALMEIDA, A. B.; SANTOS, M. V.; LOPES, B. I. L.; MARUJO, D. “Microgrid management in emergency scenarios for smart electrical energy usage”, IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, 2015.

ANEXO A

Neste anexo as condições iniciais e parâmetros do sistema aplicados para a obtenção dos resultados são apresentados em formato *IEEE Common Data Format* (CDF). Para sua utilização basta copia-los e salvar com a extensão ‘cdf’. Os dados do sistema IEEE 34 barras original pode ser obtido em [61].

Parâmetros do Sistema

```

DATA BASE
% S ) ( conf ) ( line )
2500 1.609344 0.0003048 % colocar na mesma unidade, neste caso quantos km é uma milha e quantos km
é um pé
% isso aconteceu porque a unidade das impedâncias são ohms/milha e a unidade de comprimento da linha
é pé
-999
BUS DATA
%No ) ( nome ) AA T ( Va ) ( Vb ) ( Vc ) ( Aa ) ( Ab ) ( Ac ) (Vbase(kV)) ( Pga ) ( Qga ) ( Pgb
) ( Qgb ) ( Pgc ) ( Qgc ) ( Qgmin ) ( Qgmax ) (CoB)
800 SlackBus 1 3 1.0500 1.0500 1.0500 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 -99999.9 99999.9 800
802 Bus802 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 802
806 Bus806 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 806
808 Bus808 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 808
810 Bus810 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 810
812 Bus812 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 812
814 Bus814 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 814
850 Bus850 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 850
816 Bus816 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 816
818 Bus818 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 818
820 Bus820 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 820
822 Bus822 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 822
824 Bus824 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 824
826 Bus826 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 826
828 Bus828 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 828
830 Bus830 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 830
854 Bus854 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 854
852 Bus852 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 852
832 Bus832 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 832
858 Bus858 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 858
834 Bus834 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 834
842 Bus842 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 842
844 Bus844 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 844
846 Bus846 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 846
848 Bus848 1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 848

```

```

      860 Bus860      1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 860
      836 Bus836      1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 836
      840 Bus840      1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 840
      862 Bus862      1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 862
      838 Bus838      1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 838
      864 Bus864      1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 864
      888 Bus888      2 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 4.16 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 888
      890 Bus890      2 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 4.16 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 890
      856 Bus856      1 0 1.0000 1.0000 1.0000 0.0 -120.0 120.0 24.90 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 856
-999

```

BRANCH DATA

```

%De ) ( Pa ) P T (Length) (Config) %original
      800 802 1 0 2580 300
      802 806 1 0 1730 300
      806 808 1 0 10776 300 %32230
      808 810 1 0 5804 303
      808 812 1 0 12500 300 %37500
      812 814 1 0 14865 300 %29730
      814 850 1 0 10 301
      816 818 1 0 1710 302
      816 824 1 0 10210 301
      818 820 1 0 24075 302 %48150
      820 822 1 0 13740 302
      824 826 1 0 3030 303
      824 828 1 0 840 301
      828 830 1 0 10222 301 %20440
      830 854 1 0 520 301
      832 858 1 0 4900 301
      832 888 1 1 0 1
      834 860 1 0 2020 301
      834 842 1 0 280 301
      836 840 1 0 860 301
      836 862 1 0 280 301
      842 844 1 0 1350 301
      844 846 1 0 3640 301
      846 848 1 0 530 301
      850 816 1 0 310 301
      852 832 1 0 10 301
      854 856 1 0 11665 303 %23330
      854 852 1 0 12277 301 %36830
      858 864 1 0 1620 302
      858 834 1 0 5830 301
      860 836 1 0 2680 301
      862 838 1 0 4860 304
      888 890 1 0 10560 300
-999

```

BRANCH CONFIGURATION DATA

```

% No) ( Pha ) ( Raa ) ( Xaa ) ( Rab ) ( Xab ) ( Rac ) ( Xac ) ( Rbb ) ( Xbb ) ( Rbc ) ( Xbc ) ( Rcc ) (
Xcc ) ( Baa ) ( Bab ) ( Bac ) ( Bbb ) ( Bbc ) ( Bcc )
      300 ABC 1.3368 1.3343 0.2101 0.5779 0.2130 0.5015 1.3238 1.3569 0.2066 0.4591 1.3294
1.3471 5.3350 -1.5313 -0.9943 5.0979 -0.6212 4.8880
      301 ABC 1.9300 1.4115 0.2327 0.6442 0.2359 0.5691 1.9157 1.4281 0.2288 0.5238 1.9219
1.4209 5.1207 -1.4364 -0.9402 4.9055 -0.5951 4.7154
      302 A 2.7995 1.4855 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 4.2251 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
      303 B 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 2.7995 1.4855 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 4.2251 0.0000 0.0000
      304 B 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 1.9217 1.4212 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 4.3637 0.0000 0.0000
-999

```

TRANSFORMER CONFIGURATION DATA

```

% No) ( kVA ) ( R% ) ( X% ) (TapA) (TapB) (TapC) (PhaA) (PhaB) (PhaC) (Pha)
      1 500 1.9 4.08 1.000 1.000 1.000 0.0 0.0 0.0 ABC
-999

```

SHUNT CAPACITORS

```

%No ) (A-kVAr) (B-kVAr) (C-kVAr)
      844 100 100 100
      848 150 150 150
-999

```

SPOT LOADS

```

%No ) (L) (M) ( A-kW ) (A-kVAr) ( B-kW ) (B-kVAr) ( C-kW ) (C-kVAr)
      860 Y PQ 20 16 20 16 20 16
      840 Y I 9 7 9 7 9 7
      844 Y Z 135 105 135 105 135 105
      848 D PQ 20 16 20 16 20 16

```



```

      890 D I 150 75 150 75 150 75
      830 D Z 10 5 10 5 25 10
-999

```

DISTRIBUTED LOADS

```

%NoF) (NoT) (L) (M) ( A-kW ) (A-kVAr) ( B-kW ) (B-kVAr) ( C-kW ) (C-kVAr)
      802 806 Y PQ 0 0 30 15 25 14
      808 810 Y I 0 0 16 8 0 0
      818 820 Y Z 34 17 0 0 0 0
      820 822 Y PQ 135 70 0 0 0 0
      816 824 D I 0 0 5 2 0 0
      824 826 Y I 0 0 40 20 0 0
      824 828 Y PQ 0 0 0 0 4 2
      828 830 Y PQ 7 3 0 0 0 0
      854 856 Y PQ 0 0 4 2 0 0
      832 858 D Z 7 3 2 1 6 3
      858 864 Y PQ 2 1 0 0 0 0
      858 834 D PQ 4 2 15 8 13 7
      834 860 D Z 16 8 20 10 110 55
      860 836 D PQ 30 15 10 6 42 22
      836 840 D I 18 9 22 11 0 0
      862 838 Y PQ 0 0 28 14 0 0
      842 844 Y PQ 9 5 0 0 0 0
      844 846 Y PQ 0 0 25 12 20 11
      846 848 Y PQ 0 0 23 11 0 0
-999

```

REGULATOR DATA

```

% No) (NoF) (NoT) (Loc) (CoB) (P) (Band) (PTR) (CTR) ( Ra ) ( Xa ) ( Rb ) ( Xb ) ( Rc ) ( Xc )
(VoltA) (VoltB) (VoltC) (tA) (tB) (tC) (mP) (s)
      1 814 850 814 850 ABC 2.0 120 100 2.7 1.6 2.7 1.6 2.7 1.6 122
122 122 0 0 0 ABC 1
      2 852 832 852 832 ABC 2.0 120 100 2.5 1.5 2.5 1.5 2.5 1.5 124
124 124 0 0 0 ABC 1
-999

```



```

14      16 830 7 18 18 17 19 16 16 16 15 15 15 15 14 14 14 14
14      14 14 14 14 13 13 13 13 13 12 12 13 12 12 12 12 13 13
15      17 854 7 18 18 18 19 19 19 18 19 19 15 15 15 15 15
15      15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 14 14 14 14 14 14
0      18 856 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
18      19 852 7 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 18 18 18
18      17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17
19      20 832 7 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20
19      19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19
20      21 888 7 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 20 20 20 20
20      20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 19 19 19 19
19      22 890 7 21 21 21 21 20 20 21 20 19 19 19 19 19 19
19      18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 19 19 19 19
19      23 858 7 20 20 20 20 20 20 20 19 19 19 19 19 19 19
19      18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 19 19 20 21
12      24 864 1 15 15 15 15 15 15 15 15 15 14 14 14 12 12
12      11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11
18      25 834 7 19 19 21 19 19 19 19 19 19 19 19 19 18 18
18      18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 19 19 19 20
18      26 842 7 19 22 20 20 19 19 20 18 18 18 18 19 18 18
18      18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 19 19 18
17      27 844 7 19 19 19 18 18 18 17 17 17 17 17 17 17 17
17      17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17
17      28 846 7 19 19 19 19 19 19 17 17 17 17 17 17 17 17
17      17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17
25      29 848 7 30 30 30 30 30 30 30 30 29 29 29 29 25 25
25      25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25
%condominio
20      30 860 7 21 21 21 21 21 20 20 20 20 20 20 20 20 20
20      20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20
18      31 836 7 21 21 21 21 21 21 21 20 19 19 19 18 18 18
18      18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18
17      32 862 7 20 20 20 18 18 18 18 18 17 17 17 17 17 17
17      17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17
120     33 840 7 535 515 500 485 445 445 410 400 400 312 275 220 210 160 120
120     80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80
%shopping
0      34 838 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

%potencia reativa na fase a, em kVAr
%
22:00|22:15|22:30|22:45|23:00|23:15|23:30|23:45|00:00|00:15|00:30|00:45|01:00|01:15|01:30|01:45|02:00|02:15|0
2:30|02:45|03:00|03:15|03:30|03:45|04:00|04:15|04:30|04:45|05:00|05:15|05:30|05:45|06:00
loadga = [1 800 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
7 7 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
7 7 4 808 7 11 10 10 10 10 9 9 9 9 9 8 7 7 7
0 0 5 810 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
9 8 6 812 7 13 11 11 11 11 10 10 10 10 10 10 10 9 9
8 8 7 814 7 12 12 11 11 11 10 9 9 9 9 9 8 8 8
8 8 8 850 7 10 12 12 12 11 10 9 8 8 8 8 8 9 10 8
7 7 9 816 7 9 9 9 9 9 9 9 9 8 8 8 8 7 7 7
5 5 10 818 1 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
10 10 11 820 1 7 7 7 7 7 7 7 7 6 6 6 6 5 5
7 7 12 822 1 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 6 6
10 10 13 824 7 14 14 13 13 13 13 12 12 12 12 11 11 11 9 9
0 0 14 826 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
9 9 15 828 7 13 12 11 11 11 11 10 10 10 10 10 9 9 9 9
7 7 16 830 7 10 10 10 10 9 9 9 9 8 8 8 8 7 7 7
7 7 17 854 7 9 9 9 9 10 10 10 9 10 10 7 7 7 7
0 0 18 856 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
9 9 19 852 7 11 11 11 11 11 10 10 10 10 10 10 10 9 9 9
8 8 20 832 7 11 11 11 11 11 11 11 10 9 9 9 9 8 8 8
12 12 21 888 7 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 12 12 12 12 12
11 11 22 890 7 14 14 14 14 13 11 11 11 11 11 11 11 11 11
10 10 23 858 7 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10
10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 11 11 10 11 12

```


[illegible]

```

8      8      2 802 7 12 11 11 11 11 10 10 10 10 10 9 9 8 8 8
      8      8      8      8      8      8      8      8      8      8      8      8      8      8      8      8      8      8
17    17    3 806 7 19 19 19 19 19 19 19 19 18 18 18 18 17 17 19 19 17
      17    4 808 7 20 20 20 20 20 20 20 20 20 19 19 18 18 16 16 16 16
16    16    16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 17 17
      16    5 810 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
      0      6 812 7 20 20 20 20 20 19 19 19 19 18 18 17 17 16 16 16 16
16    16    16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 18 18
      16    7 814 7 19 19 19 19 18 18 18 18 18 18 18 18 17 17 17 17
17    17    17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 19 19
      17    8 850 7 19 20 20 20 19 19 18 18 18 18 18 18 17 17 17 17
17    17    17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 19 19
      17    9 816 7 19 21 20 20 19 19 19 19 18 18 17 17 16 16 16 16
16    16    16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 19 19
      16    10 818 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
      0      11 820 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
      0      12 822 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
      0      13 824 7 16 16 16 16 16 16 16 15 15 14 14 13 13 13 13 13
13    13    13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13
      13    14 826 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
      0      15 828 7 20 20 19 19 19 19 19 19 19 18 18 18 18 16 16 16 16
16    16    16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16
      16    16 830 7 22 22 21 20 20 20 20 19 18 18 18 18 16 16 16 16
16    16    16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 15 15 15
      16    17 854 7 20 20 20 20 20 20 18 18 18 16 16 15 15 15 15 15
15    15    15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15
      15    18 856 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
      0      19 852 7 23 23 21 21 21 21 19 19 19 16 15 13 13 13 13 13
13    13    13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13
      13    20 832 7 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 19 19 19 19 19 19
19    19    19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19
      19    21 888 7 21 21 21 21 20 20 20 20 20 19 19 19 19 19 19 19
19    19    19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19
      19    22 890 7 25 25 25 20 20 20 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19
19    19    19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19
      19    23 858 7 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 19 19 19 17 17 17
17    17    17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 19 19 19
      17    24 864 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
      0      25 834 7 20 20 20 20 21 18 18 18 18 18 18 18 17 17 17 17
17    17    17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 18 18 18
      17    26 842 7 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 19 18 18 18
18    18    18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 19 19 19
      18    27 844 7 25 25 24 24 23 22 21 21 20 20 18 18 18 18 18 18 18
18    18    18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 20 20 20
      18    28 846 7 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18
18    18    18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18
      18    29 848 7 29 27 26 26 26 23 22 21 21 21 21 21 21 21 21 21 21
21    21    21 21 21 21 21 21 21 21 21 21 21 21 21 21 21 21 21
condominio
30 860 7 19 19 19 19 19 18 18 18 18 18 17 17 16 16 16 16
16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16
      31 836 7 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 17 17 17 17
17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 19 19
      32 862 7 19 19 19 19 19 18 18 18 18 18 18 18 18 17 17 17 17
17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 18 18
      33 840 7 520 502 490 470 440 430 405 395 395 305 295 223 192 176 110
110 90 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80
      34 838 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

```

```
%Potência reativa na fase c, em kVAr
```

```

%
22:00|22:15|22:30|22:45|23:00|23:15|23:30|23:45|00:00|00:15|00:30|00:45|01:00|01:15|01:30|01:45|02:00|02:15|0
2:30|02:45|03:00|03:15|03:30|03:45|04:00|04:15|04:30|04:45|05:00|05:15|05:30|05:45|06:00

```

```

loadqc = [1 800 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
      2 802 7 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
      3 806 7 9 9 9 9 9 9 9 9 8 8 8 8 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
      4 808 7 14 13 13 12 11 11 11 10 10 10 10 10 9 9 9
9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9
      5 810 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
      6 812 7 12 12 11 10 9 9 9 9 9 9 9 8 8 8 8
8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
      7 814 7 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 9 9 9
9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9
      8 850 7 9 10 10 10 9 9 9 9 9 9 9 9 9 8 8 8
8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
      9 816 7 9 11 10 10 9 9 9 9 9 9 9 9 8 8 8 8
8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8

```

```

0      0      10 818 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0      11 820 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0      12 822 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0      13 824 7 8 8 8 8 8 8 8 7 7 7 6 6 6 6 6
6      6      14 826 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0      15 828 7 10 10 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 8
8      8      16 830 7 12 12 11 11 11 11 11 10 10 10 10 10 9 9 9
9      9      17 854 7 10 10 10 10 10 10 9 9 9 8 8 8 8 7
7      7      18 856 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0      19 852 7 15 14 11 11 11 11 10 10 10 9 8 7 7 7 7
7      7      20 832 7 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 10 10 9 9
9      9      21 888 7 13 13 13 13 12 12 12 12 12 12 12 11 11 11 11
11     11     22 890 7 15 15 15 13 13 13 11 11 11 11 11 11 11 11
11     11     23 858 7 11 11 11 11 10 10 10 10 10 10 9 9 8 8 8
8      8      24 864 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0      25 834 7 11 11 11 11 10 11 11 11 11 11 10 10 10 10 10
10     10     26 842 7 13 11 11 10 10 10 10 10 10 10 10 10 9 9 9
9      9      27 844 7 14 14 13 13 13 12 11 11 11 11 11 10 10 10 10
10     10     28 846 7 11 11 11 11 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10
10     10     29 848 7 16 15 15 15 15 15 14 13 13 12 12 12 12 12 12
12     12     30 860 7 11 11 11 11 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10
condomínio
10     10     31 836 7 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10
10     10     32 862 7 11 11 11 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10
10     10     33 840 7 335 332 315 280 280 240 225 220 163 145 125 116 95 85 85
85     65     45 45 45 45 45 45 45 45 45 45 45 45 45 45 45 %
shopping
0      0      34 838 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0      0      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

% String com os horários das demandas
Horario = {'22:00' '22:15' '22:30' '22:45' '23:00' '23:15' '23:30' '23:45' '00:00' '00:15' '00:30' '00:45'
'01:00' '01:15' '01:30' '01:45' '02:00' '02:15' '02:30' '02:45' '03:00' '03:15' '03:30' '03:45' '04:00'
'04:15' '04:30' '04:45' '05:00' '05:15' '05:30' '05:45' '06:00'};

```