

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**CONTROLE DE MICRORREDES CA:
ESTUDO DA REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA E TENSÕES**

HENRIQUE TANNÚS DE MOURA CARVALHO

Uberlândia
2019

HENRIQUE TANNÚS DE MOURA CARVALHO¹

**CONTROLE DE MICRORREDES CA:
ESTUDO DA REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA E TENSÕES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica – Eletrônica de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Ernane Antônio A. Coelho

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ernane Antônio Alves Coelho – UFU (Orientador)

Prof. Dr. Henrique José Avelar – CEFET MG (Membro Externo)

Prof. Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas – UFU

Prof. Dr. Gustavo Brito de Lima – UFU

Uberlândia

2019

¹ Trabalho financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Bolsa DS), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG (processo APQ-03554-16) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

C331c
2019 Carvalho, Henrique Tannús de Moura, 1994-
 Controle de microrredes CA [recurso eletrônico] : estudo da
 regulação de frequência e tensões / Henrique Tannús de Moura
 Carvalho. - 2019.

 Orientador: Ernane Antônio Alves Coelho.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
 Modo de acesso: Internet.
 Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.320>
 Inclui bibliografia.
 Inclui ilustrações.

 1. Engenharia elétrica. 2. Eletrônica de potência. 3. Geração
 distribuída de energia elétrica. 4. Conversores de corrente elétrica. I.
 Coelho, Ernane Antônio Alves, 1962- (Orient.) II. Universidade Federal
 de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III.
 Título.

CDU: 621.3

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262

**CONTROLE DE MICRORREDES CA:
ESTUDO DA REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA E TENSÕES**

HENRIQUE TANNÚS DE MOURA CARVALHO

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica – Eletrônica de Potência.

Prof. Ernane Antônio Alves Coelho, Dr.
Orientador

Prof. José Rubens Macedo Júnior, Dr.
Coordenador da Pós-Graduação

Uberlândia
2019

Dedico ao dedicado leitor,
esperando que o texto lhe seja útil
de algum modo.

Desejo prosperidade em seus
estudos, e que estes sejam aplicados
sempre de maneira ética e
progressista.

AGRADECIMENTOS

Meus pais, irmã e avós

Antônio O. C. Neto

Bruno P. Ramos

CAPES

Cláudio O. Júnior

CNPq

Prof. Enes G. Marra

Ênio C. Rezende

Prof. Eric N. Chaves

Prof. Ernane Antônio A. Coelho

FAPEMIG

Fernando C. Melo

Gabriel Marçal

Prof. Gustavo Brito

Prof. Henrique Avelar

Joaquim H. Reis

Lucas P. Pires

Prof. Luiz Carlos G. de Freitas

Magson Gudiel

Matheus Soares

Prof. Nei Oliveira

Prof. Rodrigo Rimoldi

Rosa Eliza Z. Naves

Membros da banca examinadora

Servidores da Faculdade de Engenharia Elétrica - FEELT

Cada qual com sua forma e posição, foram todas “peças do quebra-cabeças” que “formou” este trabalho!

Muito obrigado!

Tudo foi calculado, exceto como viver.

Jean Paul Sartre

Que é mesmo a minha neutralidade senão a maneira cômoda, talvez,
mas hipócrita, de esconder minha opção ou meu medo de acusar a injustiça?
Lavar as mãos em face da opressão é reforçar o poder do opressor, é optar por ele.

Paulo Freire

RESUMO

O foco deste trabalho é apresentar um estudo sobre o controle de microrredes em CA, abordando principalmente o controle secundário para regulação de tensão e frequência durante operação isolada (ilhada). Os principais aspectos sobre o controle de microrredes CA são discutidos através de uma revisão bibliográfica, com foco em estratégias distribuídas e hierárquicas, apresentando os objetivos, principais limitações e vantagens das técnicas mais relevantes. Como principal contribuição, é proposto e estudado, através de diversas simulações computacionais, um controle secundário para regulação da frequência e tensões da microrrede. Algumas características principais da estratégia são: descentralização total; simplicidade na implementação, ajuste e modelagem matemática. Adicionalmente, são apresentados e validados por simulação: uma estratégia para compensação da queda de tensão em regime permanente nas impedâncias virtuais, sem prejuízo na sua contribuição dinâmica; uma simples adaptação na implementação do controle secundário proposto para funcionamento adequado em sistemas com unidades geradoras de capacidades nominais distintas. Ainda que o eixo central do trabalho seja a qualidade da energia na microrrede em operação ilhada - especificamente no tocante à frequência e amplitude das tensões - o assunto da distribuição equitativa de potência entre as unidades geradoras é resgatado em diversos pontos ao longo do texto, devido à sua grande importância e forte relação com a técnica adotada para o controle primário e secundário. O controle secundário estudado não trouxe problemas para a distribuição de potência, tendo, inclusive, melhorado os desvios na distribuição de potência reativa em diversos casos.

Palavras-Chave: Controle de microrredes; Controle Secundário; Geração Distribuída; Sistemas Multiagentes; Microrredes CA; Paralelismo de inversores; *Droop Control*.

ABSTRACT

This work focuses on presenting a study about the control of AC microgrids, mainly addressing the secondary control for frequency and voltage regulation during isolated (islanded) operation. The main issues regarding the control of AC microgrids are discussed through a bibliographical review, focusing on distributed and hierarchical strategies, presenting the objectives, main limitations and advantages of the most relevant techniques. As the most important contribution, is the proposal and study, by means of several computational simulations, of a secondary control to regulate the frequency and voltages of the microgrid. The main features of the strategy are: complete decentralization; simplicity of implementation, tuning and mathematical modeling. In addition, are presented and validated with computational simulations: a strategy for steady state compensation of the voltage drop at the virtual impedances, without cancelling its dynamic contribution; a simple modification in the implementation of the proposed secondary control for proper operation in systems with generating units of distinct nominal power ratings. Although the electric power quality in the microgrid for islanded operation, with respect to frequency and voltages amplitude, is the central axis of this work, the problem of power sharing between generating units is discussed at several points throughout the text, because of its great importance and strong relation with the technique adopted for primary and secondary control. The studied secondary control did not caused problems for the power sharing, and even reduced the deviations in the reactive power sharing in several analyzed cases.

Keywords: Control of Microgrids; Secondary Control; Distributed Generation; Multi-agent Systems; AC Microgrids; Parallel Operation of Inverters; Droop Control.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - DIAGRAMA TÍPICO DE UMA MICRORREDE CA COM CONTROLE HIERÁRQUICO	26
FIGURA 2.2- DIAGRAMA TÍPICO DE UM CONTROLE INTERNO	28
FIGURA 2.3 - DIAGRAMA DA IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE PRIMÁRIO.....	32
FIGURA 2.4 - MICRORREDE ASSIMÉTRICA E IMPEDÂNCIAS VIRTUAIS.....	38
FIGURA 2.5 - EXEMPLOS DE GRAFOS.....	50
FIGURA 2.6 - EXEMPLOS DE DIGRAFOS	51
FIGURA 3.1 - ESQUEMA DA MR	70
FIGURA 3.2 - ESQUEMA INTERNO DE CADA UG	71
FIGURA 4.1 - ESQUEMA DA MR SIMULADA	80
FIGURA 4.2 - TOPOLOGIAS CONSIDERADAS PARA A REDE DE DADOS	82
FIGURA 4.3 - POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA DE SAÍDA E POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA DE REFERÊNCIA PARA O CASO 1B.....	91
FIGURA 4.4 - FREQUÊNCIAS E TENSÕES PARA O CASO 1B.....	91
FIGURA 4.5 - POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA DE SAÍDA E POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA DE REFERÊNCIA PARA O CASO 1C.....	92
FIGURA 4.6 - FREQUÊNCIAS E TENSÕES PARA O CASO 1C.....	93
FIGURA 4.7 - POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA DE SAÍDA PARA O CASO 2B.....	94
FIGURA 4.8 - FREQUÊNCIAS E TENSÕES PARA O CASO 2B.....	94
FIGURA 4.9 - POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA DE SAÍDA PARA O CASO 2C.....	95
FIGURA 4.10 - FREQUÊNCIAS E TENSÕES PARA O CASO 2C.....	96
FIGURA 4.11 - POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA DE SAÍDA PARA O CASO 4B.....	97
FIGURA 4.12 - FREQUÊNCIAS E TENSÕES PARA O CASO 4B.....	98
FIGURA 4.13 - POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA DE SAÍDA PARA O CASO 4C.....	99
FIGURA 4.14 - FREQUÊNCIAS E TENSÕES PARA O CASO 4C.....	100
FIGURA 4.15 – POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA DE SAÍDA PARA O CASO 2B – REDE DE DADOS COM AMOSTRAGEM EM 10 Hz	100
FIGURA 4.16 – FREQUÊNCIAS E TENSÕES PARA O CASO 2B – REDE DE DADOS COM AMOSTRAGEM EM 10 Hz.....	101
FIGURA 4.17 - POTÊNCIAS ATIVAS DE SAÍDA, FREQUÊNCIAS E TENSÕES PARA O CASO 2C – GANHOS MODIFICADOS	102
FIGURA 4.18 - POTÊNCIAS ATIVAS, FREQUÊNCIAS E TENSÕES PARA SISTEMA DO CASO 2A.....	103
FIGURA 5.1 - TOPOLOGIAS CONSIDERADAS PARA A REDE DE DADOS	108

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 - PARÂMETROS GERAIS DO SISTEMA SIMULADO	81
TABELA 4.2 - IMPEDÂNCIAS DAS LINHAS, IMPEDÂNCIAS VIRTUAIS E IMPEDÂNCIAS TOTAIS PARA CADA CASO	85
TABELA 4.3 - RESULTADOS PARA REGIME PERMANENTE COM UGs DE MESMA POTÊNCIA	87
TABELA 4.4 - IMPEDÂNCIAS DAS LINHAS, IMPEDÂNCIAS VIRTUAIS E IMPEDÂNCIAS TOTAIS PARA CADA CASO	90
TABELA 5.1 - PARÂMETROS GERAIS DO SISTEMA SIMULADO	106
TABELA 5.2 - IMPEDÂNCIAS DAS LINHAS ELÉTRICAS PARA CADA SITUAÇÃO	107
TABELA 5.3 - COEFICIENTES DE INCLINAÇÃO DO CONTROLE PRIMÁRIO PARA CADA SITUAÇÃO	107
TABELA 5.4 - RESULTADOS PARA MR APENAS COM CONTROLE PRIMÁRIO - k_{pn} E k_{vn} BALANCEADOS (CB)	109
TABELA 5.5 - RESULTADOS PARA MR APENAS COM CONTROLE PRIMÁRIO - k_{pn} E k_{vn} REDUZIDOS (CR)	109
TABELA 5.6 - RESULTADOS PARA SISTEMA COM CONTROLE SECUNDÁRIO SEM PESOS - k_{pn} E k_{vn} BALANCEADOS (CB)	110
TABELA 5.7 - RESULTADOS PARA O SISTEMA COM CONTROLE SECUNDÁRIO COM PESOS - REDE DE DADOS COMPLETA (RC)	111
TABELA 5.8 - RESULTADOS PARA SISTEMA COM CONTROLE SECUNDÁRIO COM PESOS - REDE DE DADOS MÍNIMA (RM)	112

SIGLAS

CAN	<i>Controller Area Network</i>
cB	Coeficientes do controle primário balanceados (situação utilizada na simulação computacional)
cI	Coeficientes do controle primário iguais (situação utilizada na simulação computacional)
cR	Coeficientes do controle primário diferentes e reduzidos (situação utilizada na simulação computacional)
CS	Controle Secundário
CSF	Controle Secundário Restaurador de Frequência
CST	Controle Secundário Restaurador de Tensão
DAPI	<i>Distributed Averaging Proportional-Integral</i>
DrC	<i>Droop Control</i>
ExQ	Curva do tipo Tensão <i>versus</i> Potência reativa
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCL	Filtro do tipo “indutor – capacitor – indutor”
LD	Linhas elétricas com impedâncias distintas (situação utilizada na simulação computacional)
LI	Linhas elétricas iguais (situação utilizada na simulação computacional)
LQR	<i>Linear Quadratic Regulator</i> (Regulador Linear Quadrático)
MR	Microrrede
PI	Proporcional - Integral
P-Res	Proporcional - Ressonante
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
RC	Topologia da rede de dados completa (situação utilizada na simulação computacional)
RM	Topologia da rede de dados Mínima (situação utilizada na simulação computacional)
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

SOGI	<i>Second Order Generalized Integrator</i>
UG	Unidade Geradora
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i> (Fonte Ininterrupta de Energia)
$V \times P$	Curva do tipo Tensão <i>versus</i> Potência ativa
$V \times Q$	Curva do tipo Tensão <i>versus</i> Potência reativa
$\dot{V} \times Q$	Curva do tipo Derivada da tensão <i>versus</i> Potência reativa
$\theta \times P$	Curva do tipo Ângulo de fase da tensão <i>versus</i> Potência ativa
$\omega \times P$	Curva do tipo Frequência <i>versus</i> Potência ativa
$\omega \times Q$	Curva do tipo Frequência <i>versus</i> Potência reativa

SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

A_G	Matriz de Adjacência de um grafo G [adimensional]
$[A_{g_P}]_{NxN}$	Matriz de Adjacência para o CSF [adimensional - vetor]
$[A_{g_Q}]_{NxN}$	Matriz de Adjacência para o CST [adimensional - vetor]
a_{ij}	Elemento da Matriz de Adjacência relacionado à conectividade entre um i-ésimo vértice e um j-ésimo vértice [adimensional]
C_1	Coefficiente de projeto para determinação da grandeza dos k_p s [rad/s]
C_2	Coefficiente de projeto para determinação da grandeza dos k_v s [V]
C_E	Coefficiente de difusão [V/s]
D_G	Matriz de Grau dos Vértices de um grafo G [adimensional - vetor]
d_i	Grau de um i-ésimo vértice [adimensional]
$[D_{g_P}]_{NxN}$	Matriz de Grau dos Vértices para o CSF [adimensional - vetor]
$[D_{g_Q}]_{NxN}$	Matriz de Grau dos Vértices para o CST [adimensional - vetor]
DPR	Desvio Padrão Relativo [adimensional - %]
DPR.E	Desvio Padrão Relativo das Tensões [adimensional - %]
DPR.Q	Desvio Padrão Relativo das Potências Reativas [adimensional - %]
DP _n	Desvio entre o valor da potência ativa fornecida pela n-ésima UG e o que ela “deveria estar fornecendo” (P_n^*) [adimensional - %]
DQ _n	Desvio entre o valor da potência reativa fornecida pela n-ésima UG e o que ela “deveria estar fornecendo” (Q_n^*) [adimensional - %]
E_0	Amplitude nominal eficaz (referência) de tensão da MR (225V) [V]
E_c	Amplitude da tensão no barramento de carga [V]
E_{c_n}	Valor dinâmico para substituição da constante E_0 no DrC da n-ésima UG, quando utilizada a compensação da queda de tensão na impedância virtual [V]
E_{dr_n}	Referência, ditada pelo <i>droop control</i> , para a amplitude da tensão de saída da n-ésima UG [V]

$\mathbf{E_G}$	Vetor das arestas de um grafo \mathbf{G} [adimensional -vetor]
\bar{E}_j	Estimativa da média das tensões calculada por uma UG vizinha da n-ésima UG [V]
E_n	Amplitude eficaz da tensão de saída da n-ésima UG [V]
$E_n(t)$	Tensão instantânea de saída da n-ésima UG [V]
\bar{E}_n	Estimativa da média das tensões calculada pela n-ésima UG [V]
$E_{ref_n}(t)$	Referência instantânea para a tensão de saída da n-ésima UG [V]
E_{refh}	Referência de tensão para o CS homogêneo [V]
\mathbf{G}	Grafo de nome G [adimensional-vetor]
$I_{o_n}(t)$	Corrente instantânea de saída da n-ésima UG [A]
k_{d_n}	Coefficiente da malha adicional de deslocamento de fase [rad/W]
k_{in}	Ganho integral do CS homogêneo [Var/(V.s)]
k_{p_n}	Coefficiente de inclinação do <i>droop</i> $\omega \times P$ da n-ésima UG [rad/(W.s)]
$[k_{pr}]_{N \times N}$	Matriz diagonal dos coeficientes do CSF [W/s - vetor]
k_{pr_n}	Coefficiente do CSF da n-ésima UG [W/s]
k_{prp_n}	Ganho proporcional do CS homogêneo [Var/V]
$[k_{qr}]_{N \times N}$	Matriz diagonal dos coeficientes do CST [Var/s - vetor]
k_{qr_n}	Coefficiente do CST da n-ésima UG [Var/s]
k_{v_n}	Coefficiente de inclinação do <i>droop</i> $V \times Q$ da n-ésima UG [V/Var]
$\mathbf{L_G}$	Matriz Laplaciana de um grafo \mathbf{G} [adimensional - vetor]
L_L	Indutância da carga [H]
L_{v_n}	Indutância virtual da n-ésima UG [H]
L_n	Indutância da linha elétrica entre a n-ésima UG e o barramento de carga [H]
$L_{ntot.}$	Indutância total de linha da n-ésima UG (soma da indutância física com indutância virtual) [H]
n	Número identificador para cada UG ($n = [1, ..., N]$) [adimensional]

N	Quantidade de UGs da MR, quantidade de agentes de um sistema ou quantidade de vértices de um grafo [adimensional]
$N\mathbf{s}_i$	Vetor dos vértices vizinhos do vértice i [adimensional - vetor]
$[P]_{Nx1}$	Matriz das potências ativas [W-vetor]
p_n	Potência instantânea de saída da n-ésima UG [V.A]
P_n	Potência ativa (média) de saída da n-ésima UG [W]
P_n^*	Potência ativa que a n-ésima UG “deve fornecer” com base na demanda atual e sua capacidade nominal em relação às demais [W]
P_{no_n}	Potência ativa nominal (capacidade nominal) da n-ésima UG [W]
$[P_{ref}]_{Nx1}$	Matriz das potências ativas de referência [W-vetor]
P_{ref_n}	Potência ativa de referência (ou de equilíbrio) da n-ésima UG [W]
P_t	Potência ativa gerada total (soma das potências ativa de saída de todas as UGs) [W]
p_v	Proporção da compensação da queda de tensão na impedância virtual [adimensional]
$[Q]_{Nx1}$	Matriz das potências reativas [Var-vetor]
q_n	Potência reativa instantânea de saída da n-ésima UG [V.A]
Q_n	Potência reativa (média) de saída da n-ésima UG [Var]
Q_n^*	Potência reativa que a n-ésima UG “deve fornecer” com base na demanda atual e sua capacidade nominal em relação às demais [Var]
Q_{no_n}	Potência reativa nominal (capacidade nominal) da n-ésima UG [Var]
$[Q_{ref}]_{Nx1}$	Matriz das potências reativas de referência [Var - vetor]
Q_{ref_n}	Potência reativa de referência (ou de equilíbrio) da n-ésima UG [Var]
Q_t	Potência reativa gerada total (soma das potências reativa de saída de todas as UGs) [Var]
R_L	Resistência da carga [Ω]
R_n	Resistência da linha elétrica entre a n-ésima UG e o barramento de carga [Ω]
R_{v_n}	Resistência virtual da n-ésima UG [Ω]

S_{no_n}	Potência aparente nominal (capacidade nominal) da n-ésima UG [VA]
t_d	Atraso de tempo da rede de dados [s]
u_i	Entrada do agente i [adimensional]
\mathbf{V}_G	Vetor dos vértices de um grafo G [adimensional - vetor]
V_{no}	Classe nominal de tensão da MR (Ex. 380/220V) [V]
\mathbf{X}	Vetor contendo todos os estados x_i do sistema [adimensional - vetor]
\mathbf{X}_{eq}	Vetor dos estados do sistema em equilíbrio [adimensional - vetor]
x_i	Estado do agente i [adimensional - vetor]
<hr/>	
α	Decisão coletiva [adimensional]
γ	Autovetor de \mathbf{L}_G [adimensional-vetor]
ΔE	Variação na tensão de saída da n-ésima UG [V]
$\Delta \bar{E}$	Diferença entre a média das tensões de saída das três UGs (E_1 , E_2 e E_3) e a referência (E_0) [V]
Δe_v	Queda de tensão instantânea na impedância virtual [V]
ΔP_n	Variação na potência ativa de saída da n-ésima UG [W]
ΔQ_n	Variação na potência reativa de saída da n-ésima UG [Var]
$\Delta \omega$	Variação da frequência da microrrede [rad/s]
θ_n	Fase instantânea e absoluta da tensão de saída da n-ésima UG [rad]
θ_{2n}	Fase instantânea e absoluta da tensão de saída da n-ésima UG utilizando malha adicional de deslocamento de fase no droop control [rad]
λ	Autovalor de \mathbf{L}_G [adimensional]
ω_0	Frequência angular nominal da microrrede [rad/s]
ω_f	Frequência angular de corte do filtro de medição de potência ativa e reativa [rad/s]
ω_n	Frequência angular da tensão de saída da n-ésima UG [rad/s]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVOS	21
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
2. CONTROLE DE MICRORREDES CA	24
2.1 INTRODUÇÃO	24
2.2 CONTROLE INTERNO	26
2.3 CONTROLE PRIMÁRIO	30
2.3.1 Impedância Virtual	34
2.3.2 Distribuição de Potência	36
2.4 CONTROLE SECUNDÁRIO	44
2.4.1 Controles Baseados em Consenso	46
2.4.2 Controle de Tensão Homogêneo	61
2.5 CONTROLE TERCIÁRIO	62
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
3. O CONTROLE SECUNDÁRIO PROPOSTO	64
3.1 INTRODUÇÃO	64
3.2 RESTAURADOR DA FREQUÊNCIA	65
3.3 RESTAURADOR DE TENSÃO PROPOSTO	67
3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REDE DE DADOS	71
3.5 UTILIZAÇÃO COM IMPEDÂNCIAS VIRTUAIS	76
3.6 UTILIZAÇÃO COM UGs DE CAPACIDADES DIFERENTES	77
3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
4. RESULTADOS PARA UGs DE CAPACIDADES NOMINAIS IGUAIS	80
4.1 INTRODUÇÃO	80
4.2 CASOS DE ESTUDO	84
4.3 RESULTADOS EM REGIME PERMANENTE	86
4.4 RESULTADOS DINÂMICOS	89
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
5. RESULTADOS PARA UGs DE CAPACIDADES NOMINAIS DIFERENTES	106
5.1 INTRODUÇÃO	106
5.2 CASOS DE ESTUDO	107
5.3 RESULTADOS SEM CONTROLE SECUNDÁRIO	109
5.4 RESULTADOS COM CONTROLE SECUNDÁRIO	110
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	115
6.1 CONCLUSÕES FINAIS	115
6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	121
6.3 PUBLICAÇÕES	123
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124



1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

As microrredes (MRs) apareceram de forma inerente à evolução dos sistemas elétricos de potência que incorporam geração distribuída [1] e dos sistemas de fonte ininterrupta de energia (*Uninterruptible Power Supply* – UPS) [2]. Não há uma definição fechada e consolidada do termo “microrrede”, mas pode ser entendido como uma rede elétrica de distribuição local, com controle próprio, formada pela interconexão de geradores distribuídos, cargas locais e elementos armazenadores de energia [3].

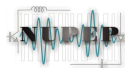
A geração na MR é prioritariamente baseada em fontes renováveis de energia associadas a conversores estáticos (pequenos geradores eólicos ou hidráulicos, painéis fotovoltaicos e célula à combustível, por exemplo) e geralmente as unidades geradoras (UGs) possuem capacidade individual menor que 100 kW [4]. As cargas normalmente são residenciais e/ou comerciais [1].

As MRs devem possuir sistemas próprios de controle de sua operação, que podem ser distribuídos ao longo dela, centralizado ou a mistura de ambos os tipos [5]. Do ponto de vista do usuário/consumidor, é esperado que a MR ofereça alto nível de automação, flexibilidade, eficiência, confiabilidade, qualidade de energia e que possa trabalhar como fonte ininterrupta de energia para cargas críticas [1], [4].

A temática “controle de microrredes” é bastante atual e relevante, o que pode ser comprovado pelo número de publicações recentes em periódicos e eventos de grande peso científico, por exemplo: [3], [6-17].

Como característica importante, uma MR pode operar de forma conectada à rede elétrica tradicional (macrorrede), trocando potência com ela, ou operar em modo isolado - também conhecido como operação autônoma ou ilhada [18]. No primeiro caso, a frequência da MR e a tensão próxima ao ponto de conexão é controlada pela rede pública (sistema elétrico) e a geração distribuída deve, preferivelmente, suprir toda a potência demandada pelas cargas locais, recarregar os elementos armazenadores de energia com baixo estado de carga e enviar para a rede o excedente de geração, que normalmente é pequeno. No modo isolado, a responsabilidade da alimentação adequada das cargas fica toda com a MR.

A MR se difere dos sistemas ilhados convencionais, tais como os sistemas elétricos de navios, aviões e plataformas *offshore*, porque a conexão e desconexão da rede pública de distribuição é um evento regular e normalmente automático para as MRs [1].



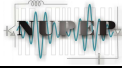
A presença de elementos armazenadores de energia ou fontes primárias despacháveis em pelo menos parte das UGs é importante para uma MR. Pois em operação ilhada, ela deve possuir reserva de energia - similar à “reserva girante” dos sistemas elétricos de potência - suficiente para garantir o funcionamento e atendimento das cargas, ao menos as principais, dada a inconstância e imprevisibilidade da maioria das fontes renováveis, como a eólica e fotovoltaica [5].

A forma de implementação da MR, tal como as características de suas cargas, UGs e a topologia de conexão entre os elementos, pode variar largamente, impactando fortemente no seu método de operação e controle, o que dificulta, e talvez impede, a criação de um método aplicado universalmente [1], [19]. Um exemplo disso é o custo-benefício da utilização de uma rede de dados para o controle, que depende principalmente da distância entre as UGs e o nível de confiabilidade e custo esperados. Portanto, os trabalhos desenvolvidos são adequados para MRs com determinadas características e cada um contará com seu conjunto de vantagens e desvantagens.

As unidades geradoras para sistemas de geração distribuída que operam sempre conectadas ao sistema elétrico normalmente trabalham como fontes de corrente, formadas por inversores com a corrente de saída diretamente controlada (*Current-Control Mode* - CCM), por permitir uma maior controlabilidade da corrente injetada na rede, que possui pesadas restrições de qualidade. Além disso, mandatoriamente e rapidamente encerram a sua operação, de forma automática, na ocorrência em caso de ilhamento. Nesse caso, ainda que o sistema seja um tipo de geração distribuída, não atende a definição de MR.

Já no caso da geração distribuída classificada como MR, via de regra o estágio de saída das UGs são formados por inversores com tensão de saída controlada (*Voltage-Control Mode* - VCM) [2], [5]. Ou seja, trabalham como fonte de tensão para serem capazes de alimentar as cargas em caso de ausência da rede elétrica [20].

Na realidade, ainda que essa seja a configuração mais frequente, não é mandatório que todas as UGs da MR operem em modo VCM, podendo coexistir com unidades do tipo CCM [21]. Teoricamente, basta que contenha pelo menos uma unidade VCM e que as características físicas do sistema completo e o esquema de controle adotado permitam que a MR trabalhe de forma adequada, distribuindo equitativamente as potências entre as UGs e sendo capaz de alimentar as cargas locais com qualidade satisfatória em caso de ilhamento. Este trabalho focará nas MRs formadas exclusivamente por inversores operando em VCM.



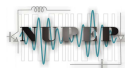
Existem as MRs em corrente contínua (CC), de ocorrência mais rara, onde a conexão das gerações distribuídas, elementos armazenadores e cargas são feitas por corrente contínua. Existem também as híbridas, que possuem partes trabalhando em CC e outras em CA. Mesmo nesse caso, a presença de inversores também é grande, dado que são bidirecionais por natureza, podendo fazer conversão CC-CA e CA-CC controlando o fluxo de potência entre as duas áreas [5]. Neste trabalho, a MR considerada é sempre CA, ficando omitido esse detalhe daqui em diante. Ademais, todas as UGs serão consideradas formadas por inversores [22], logo ambos os termos serão utilizados de forma equivalente, ficando o nome “inversor” utilizado com mais frequência nas análises de baixo nível, como as malhas de controle dos estados internos da UG.

A conexão em paralelo de fontes de tensão requer uma impedância de acoplamento, para que diferenças (de amplitude e fase) entre as tensões de saída sejam suficientemente permitidas sem a ocorrência de circulação de grandes correntes. Sob o ponto de vista físico, essa impedância pode ser a impedância dos próprios cabos que interligam as UGs entre si e com as cargas e, também, indutores inseridos na saída das UGs em série com os cabos. Normalmente os trabalhos denominam essa impedância de “linha de transmissão”, como por exemplo em [23]. Outros trabalhos, como [24], a denominam de “impedância de alimentador”.

Ainda com relação à impedância de acoplamento, no caso da presença de indutores físicos fazendo o seu papel, há trabalhos que tratam tal indutor como parte do filtro de saída do inversor, formando um filtro LCL [25], comportando como uma impedância de saída do inversor. É uma diferença apenas de ponto de vista durante a análise do circuito, não havendo alterações no papel elétrico ou matemático de tal indutor se a variável controlada do inversor for a tensão no capacitor do filtro LC ou LCL.

Conforme será melhor discutido em alguns pontos do texto, a impedância de acoplamento também pode ser implementada pelo sistema de controle do inversor. Normalmente, as duas implementações são realizadas (por via física e por *software*), somando-se os efeitos [26]. A implementação pelo controle possui duas principais frentes, uma é a chamada de “impedância virtual”, tal como trabalhado em [27], e a outra é através da malha de controle da tensão de saída do inversor, em que há um efeito de impedância de saída se a malha não rejeitar suficientemente o distúrbio relacionado à corrente de saída. Essa falta de rejeição pode ser proposital, para se obter os benefícios de uma maior impedância de acoplamento, como proposto em [26].

Em resumo, a impedância de acoplamento das UGs é um assunto bastante diverso, e com diferentes formas de implementação, nomenclaturas e ponto de vista para análise. A



impedância de acoplamento pode ser resultado do somatório do efeito de diversas impedâncias, por exemplo: impedância dos cabos; indutor físico inserido na saída das UGs (que pode ser tratado ou não como parte do filtro interno do inversor); impedância “emulada” através da técnica de impedância virtual, e impedância “emulada”, intencionalmente ou não, através de insuficiente rejeição ao distúrbio das malhas internas de controle do inversor.

Diferentemente de sistemas clássicos de controle do tipo linear com uma entrada e uma saída, o sistema englobando a MR com seus controles não possui comportamento muito intuitivo, por ser autônomo, não linear, distribuído, hierárquico e multivariável. Ferramentas clássicas como: diagrama de *bode*; margem de fase; margem de ganho; constantes de tempo; coeficiente de amortecimento; função de transferência; método de Ziegler Nichols e critério de Routh Hurwitz possuem aplicabilidade muito limitada neste contexto. Por isso, a análise e projeto via simulações computacionais sob diferentes situações é absolutamente útil e necessária.

Na operação ilhada, o controle da MR será encarregado prioritariamente de:

- Realizar a distribuição dinâmica da potência demandada pelas cargas e linhas de transmissão entre as UGs, na proporção adequada;
- Garantir que as tensões dos barramentos fiquem dentro dos limites adequados de amplitude, frequência e distorção.

Conforme será detalhado, a tendência atual é de uma abordagem hierárquica para o controle da MR, compreendendo as seguintes camadas: controle interno, controle primário, controle secundário e controle terciário. Basicamente, o controle interno garante a operação adequada dos inversores das UGs de modo a trabalharem como fontes de tensão controlada de alto desempenho. O controle primário cuida da estabilização da operação em paralelo dos geradores, distribuindo a potência entre as unidades.

O controle secundário é, em termos gerais, responsável pela regulação de tensão e frequência do sistema, pois normalmente o controle primário tem como desvantagem de sua operação o desvio da frequência e dos níveis de tensão ao longo da MR. O controle terciário atua no modo conectado à rede elétrica ou conectado à outra MR, cuidando do fluxo de potência entre rede pública e MR ou entre MRs.

O controle secundário (CS) será o maior foco deste trabalho, todavia o controle primário também deve ser estudado, pois ambos se relacionam fortemente. A diferença é que o controle primário aqui tratado está na sua proposta clássica, enquanto o CS é uma proposta nova.



1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho pode ser sintetizado como: abordagem do problema da regulação de tensão e frequência de MRs durante operação ilhada, através do que é denominado de CS, seguindo a linha teórica de controle distribuído e hierárquico. O texto visa discutir os aspectos técnicos do problema, apresentar um algoritmo para realização de tal objetivo e mostrar resultados para validação do funcionamento e melhor esclarecimento a respeito do comportamento do sistema como um todo.

O controle proposto pode ser empregado em uma microrrede com número qualquer de UGs, bastando que possam operar como fontes de tensão controladas (de alto desempenho de resposta) e sejam despacháveis. Todavia, para simplificação, o sistema tratado nos resultados será composto por três UGs, com topologia radial em estrela, com três linhas de transmissão e barramento único de carga. Apenas será considerada a operação da MR no modo isolado. Maiores detalhes serão apresentados nos momentos oportunos.

Para obtenção do objetivo geral, a metodologia se baseou nos seguintes objetivos específicos (não necessariamente nesta ordem):

- Revisão bibliográfica sobre as técnicas atualmente mais relevantes de controle de microrredes, com foco na operação ilhada e regulação de tensão e frequência, para melhor compreensão sobre o assunto e contextualização da proposta do trabalho dentro do estado da arte;
- Escolha do controle primário através do *droop control* convencional e dissertação sobre suas vantagens e limitações. A justificativa geral de tal escolha é simplificação do estudo, conforme será melhor discutido adiante.
- Proposição de uma técnica distribuída para CS para regulação da frequência e tensões, que consiga interfacear com o controle primário via *droop control* convencional de forma simples e sem prejudicar seu funcionamento. Na revisão bibliográfica para o presente trabalho, não foram encontradas técnicas iguais à proposta, apenas similares em alguns aspectos;
- Validação da obtenção do objetivo geral, parte via análise matemática e parte via simulações computacionais em regime permanente e no domínio do tempo;
- Verificação, por simulações computacionais, da influência do CS estudado na distribuição de potência entre as UGs;



- Elaboração de uma estratégia para compensação da queda de tensão em regime permanente nas impedâncias virtuais, que seja simples, distribuída e não prejudique o amortecimento causado por elas;
- Variação extensa dos parâmetros físicos e de controle durante as simulações, visando uma maior generalização dos resultados obtidos e melhor compreensão dos efeitos de cada parâmetro no sistema. Adicionalmente, o emprego de perturbações de grandes sinais nos casos simulados, para que as não linearidades do sistema sejam testadas;
- Inclusão de um atraso de tempo de 100 ms em todos os ramos da rede de dados nas simulações, para verificação (restrita, porém simples) da influência do atraso de tempo no CS estudado;
- Conversão da linha de dados, inicialmente simulada no domínio do tempo contínuo com atraso, para uma rede no domínio discreto com taxa de amostragem de 10 Hz e *Zero Order Hold*. Esse resultado visa aproximar mais de uma condição real, já que a rede de dados, na prática, será implementada digitalmente. Uma taxa de 10 Hz é bem razoável para redes de dados aplicadas à microrredes e é de fácil obtenção em campo [17].

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente capítulo faz uma contextualização do trabalho, introduzindo brevemente a temática em que ele se encontra, que é: controle aplicado à MRs CA. As definições e premissas iniciais para o trabalho são apontadas, mostrando as suas delimitações. Os objetivos e a justificativa são discutidos.

O segundo capítulo discute a problemática do controle de MRs, sendo feita uma revisão da literatura. As malhas de controle são discutidas do controle interno ao terciário, com maior detalhamento no primário e secundário e menor detalhamento no terciário.

O terceiro capítulo é voltado para a apresentação e discussão teórica do CS proposto. É feita uma breve consideração sobre a rede de dados, mostrando que o sistema CAN seria uma boa opção para implementação prática do controle proposto. Uma adaptação simples no algoritmo, necessária para quando a MR integrar UGs de capacidades nominais distintas, é descrita. Também é discutida a interação do CS com o sistema de impedâncias virtuais,

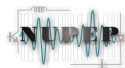


apresentando uma proposta para compensação da queda de tensão em regime permanente nelas, sem prejuízo das suas contribuições dinâmicas.

O quarto e quinto capítulos mostram resultados de simulação para o sistema com o CS proposto. No quarto, é feita a premissa de que as UGs são de mesma capacidade e no quinto elas são de capacidades diferentes. Diferentemente de muitos dos trabalhos na área de engenharia e ciências exatas, os resultados aqui mostrados não têm como foco principal a comprovação de algum fato já esperado ou deduzido, e sim um propósito de estudo e compreensão.

As simulações abordam diversas variações, visando uma análise mais didática e geral. São mostrados resultados tanto em regime permanente quanto dinâmicos, sendo que na realidade ambos advêm das mesmas simulações computacionais (no domínio do tempo), alterando apenas a forma de coleta, apresentação e análise dos dados.

No último capítulo são comentadas as conclusões gerais do trabalho, propostas para pesquisas futuras e as publicações geradas.



2. CONTROLE DE MICRORREDES CA

2.1 INTRODUÇÃO

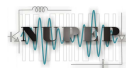
Este capítulo visa discutir o estado da arte sobre a temática do controle de MRs. São inúmeros os tratamentos propostos para tal problema, mas o foco será nas estratégias mais referenciadas nas publicações técnico-científicas dos últimos 15 anos.

Conforme já comentado, uma MR normalmente é formada por inversores, logo o controle de uma MR pode ser compreendido como o controle do paralelismo de inversores através de uma rede elétrica muitas vezes heterogênea [1], [2], [19], [22], [28]. Pode-se então dizer que as origens técnicas do conceito de MR surgiu de trabalhos, realizados principalmente na década de 80 e 90, envolvendo paralelismo de inversores para sistemas ininterruptos de fornecimento de energia para cargas críticas, dividindo a potência entre as unidades, visando aumento da confiabilidade e modularidade. Somando esses desenvolvimentos iniciais com a alavancada das energias renováveis e com a tendência atual de descentralização cada vez maior da geração, o conceito de MR se populariza.

O sistema de controle de uma MR tem sido tratado como multinível hierárquico, sendo dividido em: controle interno, primário, secundário e terciário. A velocidade (largura de banda) das malhas é decrescente, ou seja, o controle interno é o mais rápido e o terciário é o mais lento. A hierarquia se dá também pelo fato de que o controle interno recebe informações do controle primário, que recebe informações do CS e assim por diante [5].

As funções básicas dos controles podem ser resumidas em: Controle Interno: controlar internamente a UG de modo com que ela opere como fonte de tensão controlada de alta qualidade (por exemplo, as malhas de controle de tensão e corrente do inversor); Controle Primário: distribuir adequadamente potência ativa e reativa demandada pelas cargas e rede entre as UGs (é o controle do paralelismo entre as unidades); Controle Secundário: Garantir os níveis adequados de frequência e tensões ao longo da microrrede, em operação ilhada; Controle Terciário: controla o fluxo de potência entre a microrrede e a rede elétrica, em modo conectado.

Por questões de flexibilidade, confiabilidade e custo, a necessidade de comunicação entre as UGs de uma MR deve ser evitada, mas isso é difícil de ser feito para os controles secundário e terciário. Todavia, nesse caso, como a banda de comunicação requerida é menor, – devido à baixa velocidade de operação da malha – a sua utilização normalmente é bem aceita, diferentemente do que ocorre para os controles interno e primário [5], [29].



De um modo geral, o controle interno e o primário são totalmente distribuídos, o terciário é centralizado e o secundário pode ser um ou outro. Porém, principalmente por questões de confiabilidade e flexibilidade, é preferível que o CS seja distribuído.

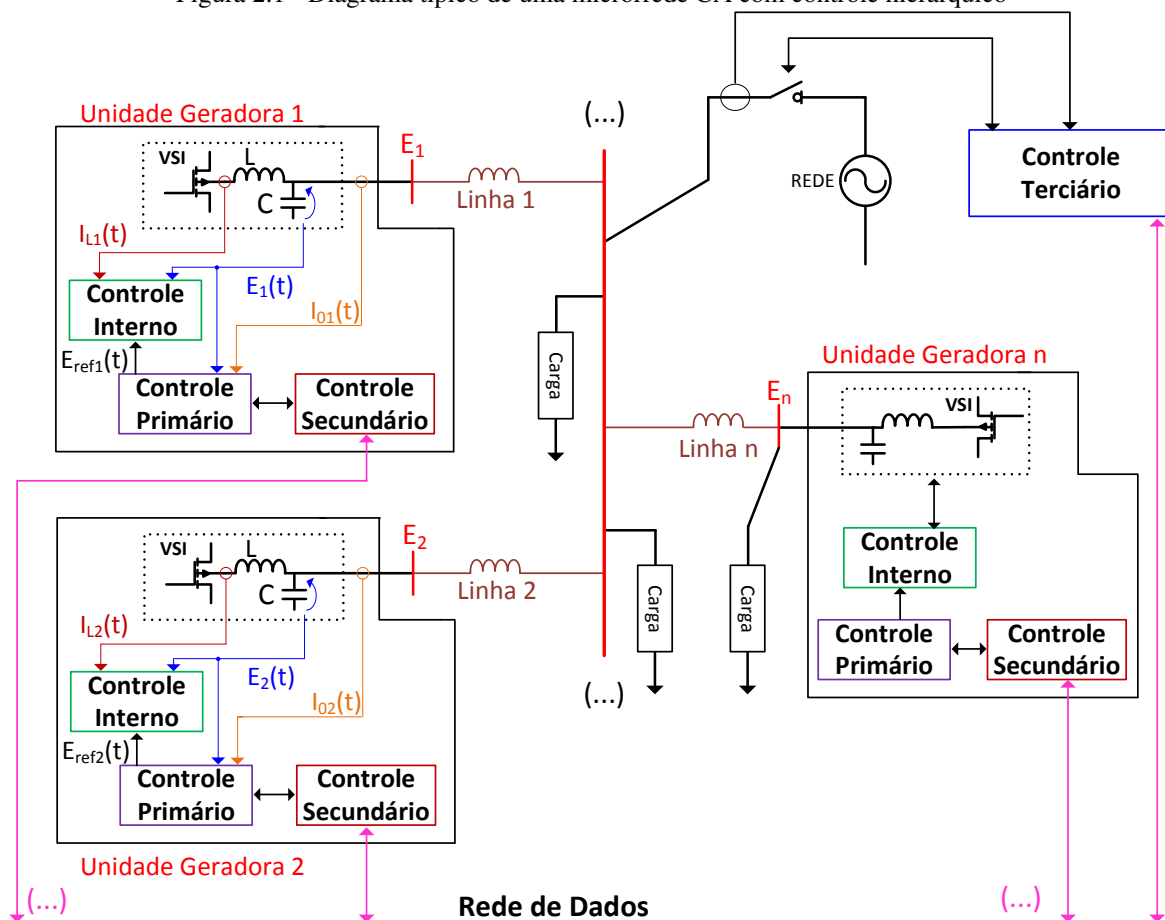
Adicionalmente, controles centrais tendem a ser mais dependentes da comunicação e sensíveis a atrasos na troca de informações do que os distribuídos [18], [30]. O principal motivo é que o controle centralizado precisa receber, calcular e enviar respostas para cada UG, sofrendo o efeito do atraso de tempo duas vezes. Já o controle distribuído em cada UG, mesmo quando requer comunicação, normalmente utiliza apenas variáveis de outras unidades (recebidas pela rede de dados) para calcular sua ação de controle que será empregada exclusivamente dentro da própria UG, ou seja, não envia o resultado de seus cálculos pela rede.

A Figura 2.1 exibe um diagrama (elétrico e de controle) de uma microrrede CA típica que utiliza o sistema hierárquico de controle, para melhor entendimento do sistema como um todo. São exibidas três UGs apenas, mas deve-se ver o sistema como contendo um número qualquer de UGs. Para as UGs 1 e 2, o controle interno a elas é detalhado. Já a UG 3, o detalhamento foi menor apenas para compactação do desenho, mas, em geral todas as UGs contam com o mesmo esquema de controle, variando apenas parâmetros elétricos e de controle.

Ainda na Figura 2.1, muitas variáveis trocadas entre os controles não foram descritas, por dependerem da técnica particularmente adotada. O sistema foi desenhado com topologia radial, mas isso não é obrigatório, podendo ser de maior complexidade. A rede de dados normalmente é utilizada apenas pelo controle secundário e terciário. As fontes primárias e elementos armazenadores de energia não estão mostradas.

Deve-se focar na compreensão da distributividade dos controles, por exemplo, em uma microrrede com 15 UGs, o controle primário da microrrede (se for distribuído) deve ser visualizado como o resultado da interação conjunta de 15 “leis de controle primário” e 15 controles internos distribuídos em cada UG e os elementos elétricos da microrrede (cargas e linhas). O controle secundário distribuído da microrrede deve ser visualizado como resultado da interação de 15 “leis de controle secundário”, 15 “leis de controle primário” e 15 controles internos embarcados em cada UG com os elementos elétricos da microrrede e também com a rede de dados que acopla as 15 “leis de controle secundário”. Cada equação de controle em uma UG depende de variáveis de outras equações dentro da mesma UG e das equações das outras UGs, que se comunicam eletricamente (pela microrrede) e através da linha de dados.

Figura 2.1 - Diagrama típico de uma microrrede CA com controle hierárquico

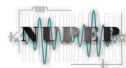


Fonte: o autor (2019).

2.2 CONTROLE INTERNO

Em alguns trabalhos, o controle interno não é considerado como parte do controle da MR, ficando o controle primário com a classificação de malha mais interna. Esse entendimento é compreensível, dado que o controle interno é necessário estar presente em uma unidade geradora mesmo que ela não faça parte de uma MR e esteja alimentando sozinha sua(s) carga(s).

Sua função é operar o conversor interno das UGs de forma a trabalharem como fontes de tensão com baixa distorção, alta velocidade de resposta, rejeição elevada de distúrbios e precisão no controle de fase e amplitude. Para melhor obtenção dos requisitos de desempenho supracitados e proteção contra sobrecorrentes transitórias, o controle interno normalmente é composto por mais de uma malha em cascata. Por exemplo, é comum a utilização de filtro LC na saída dos inversores, com uma malha externa de controle da tensão de saída - que é a tensão sobre o capacitor - e uma malha interna de corrente, de maior velocidade, para o indutor interno [31], [32].



A malha externa de tensão recebe: como referência, a tensão instantânea desejada na saída do inversor; como realimentação, a tensão de saída; como variável manipulada, a referência da malha interna de corrente. A malha interna de corrente, por sua vez, tem como variável manipulada a moduladora do chaveamento do inversor e, como variável realimentada, a corrente no indutor de filtro [32], [33].

O controle interno possui dois detalhes importantes. O primeiro é que sua referência é senoidal, com espectro bastante estreito, em torno de 60/50 Hz. O segundo, é que deve ser fortemente capaz de rejeitar distúrbios, de espectro localizado principalmente em torno de 60/50 Hz e suas harmônicas ímpares. Essa última característica é essencial para a aplicação em MRs, pois a tensão fornecida pelas unidades geradoras vizinhas e a tensão da rede elétrica (na operação conectada) funcionam como distúrbio para o controle interno, além de correntes harmônicas causadas por cargas eletrônicas e chaveamento interno das UGs.

Foi muito comum a utilização do Compensador Proporcional-Integral (PI) no controle interno, como em [23] e [34], dada a sua simplicidade, popularidade, baixo gasto computacional e possibilidade de implementação analógica. Entretanto, ele é capaz de seguir referências e rejeitar distúrbios estáticos, por possuir elevado ganho apenas em 0 Hz, apresentando erro em regime para sinais senoidais. Logo, para que atenda bem os requerimentos discutidos acima, ele deve ser implementado em referencial síncrono, normalmente utilizando a transformada de Park, para transladar a malha de controle da sua banda base (60/50 Hz) para a 0 Hz [35].

O referencial síncrono é fácil de ser implementado em inversores trifásicos, mas sua implementação em inversores monofásicos deve ser feita por emulação [20]. Visando facilitar a implementação e minimizar gastos computacionais com transformadas, nos últimos anos têm sido comum a utilização do compensador Proporcional-Ressonante (P-Res), que tipicamente possui ganho muito elevado em uma determinada frequência, largura de banda estreita e pequeno ganho proporcional para todas as frequências, podendo ser utilizado em referencial estacionário, como o sistema trifásico convencional (a,b,c) ou bifásico ortogonal (α,β) [20].

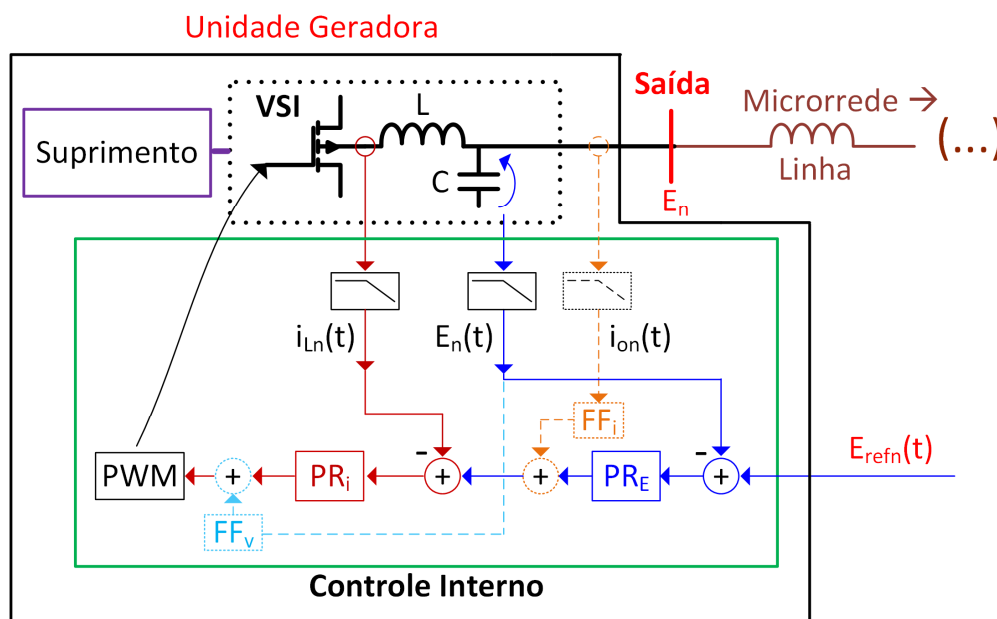
O desempenho do P-Res é excelente para referências senoidais [35]. Além do compensador sintonizado na frequência fundamental, outros sintonizados nas frequências harmônicas mais presentes na MR podem ser inseridos para aumento da rejeição aos distúrbios em frequências múltiplas da fundamental, melhorando a qualidade da tensão. Nos trabalhos dos últimos cinco anos, verifica-se a substituição quase total do compensador PI pelo P-Res.

Para melhora da resposta do sistema, é comum a utilização de soma - direta ou passando por alguma compensação - da tensão de saída do inversor (tensão do capacitor do filtro LC) na

ação final de controle (saída da malha de corrente) e/ou da corrente de saída do inversor na ação de controle da malha de tensão (referência para a malha de corrente), melhorando a rejeição aos distúrbios do sistema [1], [34], [36], [37]. Essa estratégia é denominada por algumas referências de: “*feedforward*”, ou: “desacoplamento de estados” e também: “desacoplamento da tensão de saída”.

A Figura 2.2 mostra um diagrama típico do controle interno implementado em uma unidade geradora formada por inversor com tensão de saída controlada, para melhor compreensão. Observar a malha externa de tensão, com o compensador PR_E e a malha interna de corrente com o compensador PR_i e os *feedforward* opcionais FF_i e FF_v . A referência $E_{refn}(t)$ vem do controle primário, que será explorado na próxima seção.

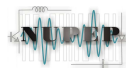
Figura 2.2- Diagrama típico de um Controle Interno



Fonte: o autor (2019).

Um limitador na referência da malha interna de corrente pode ser utilizado para proteção do próprio inversor e sua fonte primária em caso de sobrecarga ou curto-circuito na saída, limitando a corrente que flui da ponte conversora ao filtro de saída. Essa é uma das grandes vantagens da utilização de duas malhas no controle interno.

O trabalho [33] faz um estudo do controle interno, principalmente a malha interna de corrente do indutor, utilizando o P-Res. É discutido o efeito dos parâmetros de projeto, dos atrasos de tempo da implementação digital e da utilização do desacoplamento de estados pela tensão de saída nas respostas dinâmica e em regime permanente do sistema em malha fechada.



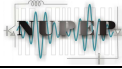
Também são analisadas três variações de implementação do P-Res: P-Res ideal, P-Res não ideal e P-Res por vetor complexo (*Complex Vector P-Res*).

Em [38] é discutido profundamente a influência de diversas técnicas de discretização para a implementação digital do P-Res. Em [39] é proposta uma estratégia de implementação digital para o P-Res visando melhora da resposta, maior adaptação às variações da frequência fundamental e melhor margem de estabilidade, mantendo o esforço computacional baixo.

É frequente que o controle interno seja desprezado no estudo das MRs que incluem as malhas de controle de hierarquia superior (primário, secundário e terciário), ficando ausente em modelagens, análises teóricas e simulações computacionais, devido a sua elevada qualidade de resposta e contar com velocidade de operação bem superior às demais malhas [5], [17], [23]. Importante estar claro que isso não significa literalmente que o controle interno é considerado ausente, e sim que é considerado com desempenho perfeito em regime transitório e permanente, desprezando-se a sua dinâmica. Conforme já discutido no Capítulo 1, se o desempenho do controle interno for consideravelmente não ideal, é frequente que este seja modelado na forma de uma impedância de saída em série com o inversor, que nesse caso continua representado por uma fonte ideal de tensão.

Na presente dissertação será considerado que os inversores das UGs operam em pelo menos 10 kHz de chaveamento através de modulação senoidal por largura de pulso (PWM), contam com pelo menos 20 kHz de taxa de amostragem do controle digital, possuem filtro LC na saída e que contam com compensadores de corrente e tensão do tipo P-Res, implementados em Controlador Digital de Sinais com capacidade de cálculos em ponto flutuante. Sendo assim, o controle interno teria um ótimo desempenho e será desprezado, implicando que os inversores serão considerados como fontes ideais de tensão controladas. Em [17] inversores de desempenho similar foram utilizados para os resultados experimentais e foi mostrado que há pouco prejuízo em se desprezar o controle interno nas simulações. Em [40], um controle interno com pior desempenho foi utilizado e, ainda sim, essa consideração também foi mostrada válida.

Outras estratégias poderão ser adicionadas ao controle interno para melhoria da qualidade da tensão de saída do inversor. Por exemplo, a realimentação de estados ou observadores de estado para a corrente do capacitor de saída, que traz para melhoria da resposta dinâmica frente a variações de carga, juntamente com *feedforward* da referência de tensão, para melhor resposta dinâmica frente a variações na referência [36]. Técnicas de controle ótimo, como o Regulador Linear Quadrático (*Linear Quadratic Regulator* - LQR) também podem ser



aplicadas, como em [25], porém com o preço de uma maior quantidade de estados a serem realimentados ou estimados.

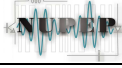
2.3 CONTROLE PRIMÁRIO

O controle primário é responsável por estabilizar o paralelismo das UGs e realizar dinamicamente a distribuição de potência entre elas, conforme suas capacidades técnicas, acompanhando as variações de demanda [41]. É sua responsabilidade o fornecimento da referência para o controle interno de cada unidade. Dada a sua importância crucial para o funcionamento da MR, é altamente desejável que seja utilizada uma estratégia robusta, descentralizada e independente de alguma rede de dados.

A técnica frequentemente utilizada para esse controle é o *droop control method* (DrC) convencional, devido a sua facilidade de implementação, por ser totalmente descentralizado, não exigir comunicação entre as unidades e não impor relações do tipo “mestre e escravo”. Além disso, baseia-se no já bem conhecido comportamento em regime permanente dos geradores síncronos e seus reguladores, o que facilita sua compreensão e o acoplamento da MR à rede elétrica e também uma possível integração de pequenos geradores síncronos na MR [5], [30], [41], [42].

Em uma linha de transmissão indutiva com resistência desprezível, interconectando duas fontes geradoras, o fluxo de potência ativa depende fortemente da diferença angular entre a tensão dos nós e o fluxo de reativo depende fortemente da diferença de amplitude, ambos de forma diretamente proporcional [23], [31]. Desse modo, para obter a estabilização do paralelismo, mitigando as correntes circulantes, e controle do fluxo de potência sem a necessidade de troca de informações, é uma estratégia válida que o controle de cada gerador decaia a sua frequência (para atraso do ângulo de fase da sua tensão) conforme a potência ativa em sua saída é aumentada e decaia a amplitude da sua tensão conforme a potência reativa em sua saída seja aumentada [31].

Assim, uma realimentação negativa estável é conseguida no sistema, com a distribuição de potência sendo controlada pelo grau do decaimento realizado por cada unidade em relação às demais. Baseado nesse princípio, é como o *droop control* (DrC) convencional funciona, sendo implementado através das equações (2.1) e (2.2). Observar que possui duas partes, que são duas equações de retas, sendo que frequentemente o termo *droop* é utilizado para se referir a apenas uma das metades, na forma “*droop* de frequência” para a primeira e “*droop* de tensão”



para a segunda [19]. Adicionalmente, estas podem ser denominadas por “*droop* ω xP” e “*droop* VxQ” (ou ExQ), respectivamente.

$$\omega_n = \omega_0 - k_{p_n}(P_n - P_{ref_n}) \quad (2.1)$$

$$E_{dr_n} = E_0 - k_{v_n}(Q_n - Q_{ref_n}) \quad (2.2)$$

Para cada n -ésima UG, ω_n é a sua frequência angular, E_{dr_n} é a amplitude da tensão de saída, ω_0 e E_0 são a frequência e a amplitude de equilíbrio, k_{p_n} e k_{v_n} são os coeficientes de inclinação dos *droop* de frequência e tensão, respectivamente. P_n e Q_n são as potências ativa e reativa de saída e P_{ref_n} e Q_{ref_n} são as potências ativa e reativa de referência, que podem ser atualizadas pelo CS. As nomenclaturas e símbolos utilizados para as variáveis em (2.1) e (2.2) variam frequentemente entre os trabalhos, mas suas atribuições são mantidas.

No caso de sistemas sem CS ou com CS que atua através de outras variáveis, P_{ref_n} e Q_{ref_n} são constantes e geralmente mantidos igual a zero para que ω_0 e E_0 sejam a frequência e tensão desejadas para a MR à vazio [31]. Geralmente ω_0 e E_0 são escolhidos iguais para todas as UGs. Neste trabalho, P_{ref_n} e Q_{ref_n} possuem valor inicial nulo e serão comandados pelo CS.

Entretanto, o DrC convencional pode ser visto como um controle heurístico [3] que pode apresentar imprecisões na distribuição equitativa da potência reativa, mesmo com linhas predominantemente indutivas [18], [29], [34]. Adicionalmente, ele tem a característica inerente de desviar a frequência e a amplitude da tensão de saída das UGs conforme o respectivo carregamento de potência ativa e reativa.

As potências P_n e Q_n são medidas pelo próprio controle da UG, podendo ser feita de diversas maneiras, como discutido em [43]. A técnica utilizada na maioria dos trabalhos é a obtenção da potência ativa através da potência instantânea (multiplicação da tensão e corrente de saída instantâneas) filtrada por um filtro passa-baixas de primeira ordem (2.3), com frequência em torno de um décimo da frequência nominal do sistema. A potência reativa também é obtida por filtragem (2.4) da “potência reativa instantânea”, que pode ser obtida virtualmente pela multiplicação da corrente instantânea de saída com uma tensão em quadratura com a tensão de saída, geralmente obtida no próprio controlador digital do inversor. Por esse motivo, o DrC possui banda passante de alguns Hertz, sendo considerado um controle lento.

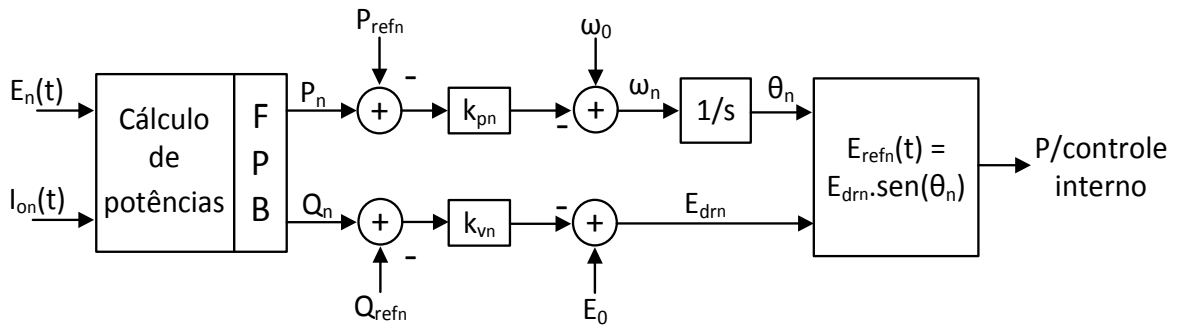
$$P_n = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} p_n \quad (2.3)$$

$$Q_n = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} q_n \quad (2.4)$$

Conforme mostrado nos trabalhos [40] e [44], a frequência de corte dos filtros de potência afetam fortemente a dinâmica do controle primário. Sua elevação aumenta a velocidade do controle, porém aumentará a oscilação de fundo na medição de potência e pode causar instabilidades no sistema. Uma redução no valor, tornará o controle mais lento e menos amortecido. Além disso, em [44] é verificado que a utilização de um filtro de 2ª ordem na medição das potências (no lugar de um de 1ª ordem), apesar de permitir uma largura de banda maior, reduz fortemente o amortecimento do sistema devido ao desvio de fase.

Na Figura 2.3 é mostrado o diagrama de blocos da implementação típica do controle primário em uma UG.

Figura 2.3 - Diagrama da implementação do controle primário



Fonte: o autor (2018).

O método do DrC convencional também pode ser utilizado para a conexão inversor e rede elétrica, não se restringindo apenas ao caso ilhado, permitindo controle da potência trocada com a rede [23]. A equação (2.1) possui um integrador implícito, pois a frequência é integrada entre o controle primário e o controle interno, para obtenção da fase instantânea da referência de tensão. Desse modo, o erro de regime permanente nulo é observado para referência em degrau de potência ativa (P_{refn}), considerando a rede um barramento infinito. No caso da potência reativa, o controle opera com característica apenas "proporcional", não eliminando erros de regime permanente, além disso, a tensão de saída do inversor (E_{drn}) não é igual à tensão da rede elétrica, devido à impedância de acoplamento. Desse modo, existe um erro e o valor da potência reativa trocada não é Q_{refn} [34].



Apesar do nome, no modo ilhado de uma MR, P_{ref_n} e Q_{ref_n} não devem ser pensados como uma referência de potência a ser seguida precisamente pelas UGs. Por isso em muitos sistemas eles são considerados nulos. Quando é dito “distribuição precisa de potência” não deve ser entendido como $P_n = P_{ref_n}$ e $Q_n = Q_{ref_n}$, mas sim que a proporcionalidade correta na distribuição de potências foi atingida. A igualdade entre a potência ativa (reativa) entregue pela n -ésima UG e o valor de P_{ref_n} (Q_{ref_n}) somente será válida quando a frequência da MR estiver igual a ω_0 (a tensão de saída da UG estiver igual a E_0).

Para evitar a falsa interpretação alertada acima, alguns trabalhos denominam P_{ref_n} e Q_{ref_n} de potência ativa e reativa de equilíbrio, ao invés de referência. Porém, isso não resolve totalmente o problema, pois não necessariamente o equilíbrio da MR se dará em tais valores.

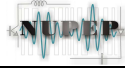
Em [40] foi proposta uma técnica relativamente simples para modelagem linear em pequenos sinais do paralelismo ilhado de inversores utilizando controle primário do tipo DrC convencional, visando orientar o projeto do sistema. Também foi mostrada a modelagem para a configuração do inversor conectado à rede. O trabalho contribuiu para a popularização do DrC frente a técnicas matematicamente mais complexas, por fornecer ferramentas lineares para auxílio do projeto e análise dinâmica do sistema.

O trabalho [40] mostra, através da análise do lugar das raízes obtido pelo modelo, que os valores das inclinações k_{p_n} e k_{v_n} possuem efeito na dinâmica do sistema no sentido de que maiores valores levam a menores amortecimentos, podendo levar à instabilidade, e aceleram a resposta do controle primário.

Mais detalhes sobre como se formou, durante as décadas de 80 e 90, a concepção do controle de inversores via DrC e outras técnicas de paralelismo consideradas naquele momento, inclusive as que utilizam comunicação, podem ser vistos no primeiro capítulo de [23].

Diferentemente do que acontece no sistema de regulação de velocidade das máquinas síncronas, o inversor pode saltar de fase quase instantaneamente devido à ausência de inércias mecânicas. Aproveitando essa possibilidade, no trabalho de [45] é proposto um termo adicional θ_2 para a fase da tensão de saída do inversor, que é somado à fase obtida pela integral da saída ω de (2.1). O referido termo adicional em cada n -ésima UG é obtido pela expressão (2.5) e contribui para redução do desvio de frequência em regime permanente e aumento do amortecimento do sistema sem piora da resposta para potência reativa e tensão [45].

$$\theta_{2_n} = -k_{d_n}(P_n - P_{ref_n}) \quad (2.5)$$



Um modelo polinomial com equação homogênea é proposto em [45] para um inversor conectado à rede elétrica utilizando o DrC com o termo adicional de deslocamento de fase (2.5).

Um modelo baseado em Espaço de Estados linearizado em torno de um ponto de equilíbrio é apresentado em [34] e [44], para uma unidade conectada à rede elétrica utilizando o DrC com o termo adicional de deslocamento de fase (2.5). Esse modelo permite a determinação, de forma mais simples, das condições iniciais do sistema. Em [34] também são discutidos os aspectos e procedimentos para a implementação digital dos controles interno e primário, com validação por via experimental e simulação computacional.

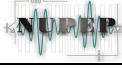
No trabalho [37], o desenvolvimento de [34] é estendido para a configuração de dois inversores em paralelo. É apresentada a modelagem baseada em Espaço de Estados, linearizada em torno de um ponto de equilíbrio, para o paralelismo de apenas dois inversores, porém a técnica é válida para “N unidades”. O controle primário é pelo DrC com o termo adicional de deslocamento de fase, já descrito. Os resultados foram validados por simulações e experimentos.

2.3.1 Impedância Virtual

Conforme já comentado, o DrC convencional se baseia nas relações entre diferenças angulares nas tensões *versus* fluxo de potência ativa e diferenças de amplitude nas tensões *versus* fluxo de potência reativa, presentes em linhas fortemente indutivas. Caso a razão X/R não seja elevada, o acoplamento entre as potências ativa e reativa é considerável, prejudicando o funcionamento da MR. Adicionalmente, para cada sistema há um valor mínimo de impedância para garantir a estabilidade, mesmo que seja predominantemente indutiva [27], [40].

Logo, a depender das características elétricas do cabeamento que compõem as linhas da MR, a inserção de indutores físicos pode ser necessária. Uma solução que pode ser utilizada, visando redução de custos e maior flexibilidade, é o emprego de impedâncias virtuais, que é um artifício no controle primário para emulação de uma impedância na saída dos inversores. A impedância virtual pode ser utilizada para diversos fins, tais como a melhoria da estabilidade, partida suave da UG, distribuição de correntes harmônicas e melhoria da distribuição de potência [5], [16], [24], [27], [29], [46].

Existem inúmeras formas de implementação da impedância virtual, que de um modo geral consiste em forçar uma variação na tensão de saída do inversor por um fator proporcional à derivada da corrente de saída - emulando um comportamento indutivo – e uma variação



proporcional à corrente de saída – emulando um comportamento resistivo. Essa filosofia é de difícil implementação prática, devido à amplificação de interferências em altas frequências pela derivada.

Em uma implementação trifásica do sistema, o controle pode ser implementado em referencial estacionário ortogonal, conforme discutido no tópico 2.2 Controle Interno, e uma aproximação satisfatória para impedância virtual pode ser realizada segundo a equação (2.6), eliminando necessidade de cálculo de derivadas [27], [47].

$$\Delta e_v = \begin{bmatrix} V_{v\alpha} \\ V_{v\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_v & L_v\omega \\ -L_v\omega & R_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{o\alpha} \\ I_{o\beta} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Δe_v é a queda de tensão na impedância virtual (decomposta em $V_{v\alpha}$ e $V_{v\beta}$), R_v é o valor da resistência virtual, ω é a frequência da tensão da UG em rad/s - extraída de (2.1), L_v é o valor da indutância virtual e $I_{o\alpha}$ e $I_{o\beta}$ são as correntes de saída da UG decompostas nos eixos α e β .

Outra forma de implementação comum é através de filtro passa-altas no lugar da derivada, reduzindo a dificuldade de implementação e também contribuindo para a distribuição de correntes harmônicas, pois o efeito da impedância virtual atuará em uma faixa de frequências e não somente na frequência fundamental [48]. Em caso de problemas com ruídos de alta frequência, um filtro passa-baixas também pode ser incluído, limitando a banda da impedância virtual.

A impedância virtual também pode ser utilizada para que a impedância de saída dos inversores e/ou das linhas de transmissão se tornem resistivas, conforme trabalhado em [49], sem a inclusão de elementos dissipativos no sistema. Com impedâncias resistivas, o DrC deve ser alterado, pois a potência reativa passa a depender mais do ângulo de fase e a potência ativa a depender mais das tensões. Esse sistema apresenta melhor distribuição de correntes harmônicas e maior amortecimento [49].

Desse modo, se a impedância virtual for utilizada, o último bloco da Figura 2.3 é alterado, pois a referência para a tensão de saída de uma n -ésima UG, E_{refn} , passará a ser dada por (2.7), onde $\theta_n(t)$ é a integral (em relação ao tempo) da saída de (2.1), E_{drn} vem de (2.2) e $I_{0n}(t)$ é a corrente de saída da UG.

$$E_{refn}(t) = E_{drn} \cdot \text{sen}[\theta_n(t)] - (R_{vn} + j\omega_n L_{vn}) \cdot I_{0n}(t) \quad (2.7)$$



Um controle interno com alto ganho e alta rejeição aos distúrbios causados pela corrente de saída do inversor, gera uma impedância de saída que pode ser considerada nula (desconsiderando a impedância virtual) no sentido de que a razão entre a tensão de saída e a corrente de saída, mantendo tudo mais constante, é praticamente zero [24]. Porém, para fins similares ao da impedância virtual, o controle interno pode ser trabalhado para que a impedância de saída seja de valor considerável, podendo ter característica indutiva, resistiva ou capacitiva [26].

2.3.2 Distribuição de Potência

No caso de UGs com capacidade de potências distintas, é desejável que a distribuição instantânea das potências, tanto nominal quanto dinâmica, seja de forma equitativa. Ou seja, que a relação entre as potências (ativa e reativa) fornecidas pelas unidades obedeça a relação de suas capacidades nominais.

Para isso, no controle primário, a escolha dos coeficientes de inclinação do DrC convencional devem seguir o balanceamento descrito em (2.8) e (2.9) [21]. Onde, para a n -ésima unidade, k_{p_n} é a inclinação do *droop* $\omega x P$, k_{v_n} é a inclinação do *droop* $V x Q$, P_{no_n} é a potência ativa nominal e Q_{no_n} é a potência reativa nominal.

$$k_{p_1} \cdot P_{no_1} = k_{p_2} \cdot P_{no_2} = \dots = k_{p_n} \cdot P_{no_n} = C_1 \quad (2.8)$$

$$k_{v_1} \cdot Q_{no_1} = k_{v_2} \cdot Q_{no_2} = \dots = k_{v_n} \cdot Q_{no_n} = C_2 \quad (2.9)$$

Caso seja desejado que a distribuição se dê pela potência aparente nominal, basta fazer conforme (2.10) e (2.11) [31].

$$k_{p_1} \cdot S_{no_1} = k_{p_2} \cdot S_{no_2} = \dots = k_{p_n} \cdot S_{no_n} = C_1 \quad (2.10)$$

$$k_{v_1} \cdot S_{no_1} = k_{v_2} \cdot S_{no_2} = \dots = k_{v_n} \cdot S_{no_n} = C_2 \quad (2.11)$$

As constantes C_1 e C_2 são parâmetros de projeto, para ajuste das magnitudes de k_{p_n} e k_{v_n} , que afetam significativamente a dinâmica, conforme mostrado em [40], e os desvios de frequência e tensão, conforme mostrado a seguir.



De (2.1), pode-se deduzir:

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P_n} = -k_{p_n}. \quad (2.12)$$

Ou seja, o valor de k_{p_n} afeta diretamente o desvio de frequência da MR em relação à variação de potência ativa de cada gerador. Analogamente:

$$\frac{\Delta E}{\Delta Q_n} = -k_{v_n}. \quad (2.13)$$

Naturalmente, o referido balanceamento também é válido para a condição de UGs de mesma capacidade de potência, retornando matematicamente que o valor de k_{p_n} deve ser o mesmo para todas as UGs e o valor de k_{v_n} idem. Importante ressaltar que os valores de k_{p_n} não precisam ser iguais aos de k_{v_n} , nem quando as UGs são de mesma capacidade nem quando são de capacidade diferentes, pois C_1 pode ser diferente de C_2 .

Conforme já comentado, o controle primário via DrC convencional tem problemas com a distribuição de potência reativa [50]. Algumas referências apontam que isso só ocorre para o caso da MR com impedâncias de linha diferentes, mas isso somente é totalmente verdadeiro se as UGs forem consideradas de mesma capacidade. Caso as UGs sejam de capacidades distintas, mesmo com o balanceamento dos coeficientes e com impedâncias das linhas iguais, a potência reativa não será distribuída perfeitamente, devido ao fato de que as potências ativa e reativa que fluirão pelas linhas serão diferentes, forçando níveis diferentes de tensões entre os nós, ainda que as impedâncias sejam iguais. Ou seja, na realidade são as diferenças de tensões ao longo da MR que afetam a distribuição de potência reativa [28], [51]. Em outras palavras, ocorre pelo fato de que a tensão não é uma variável global do sistema.

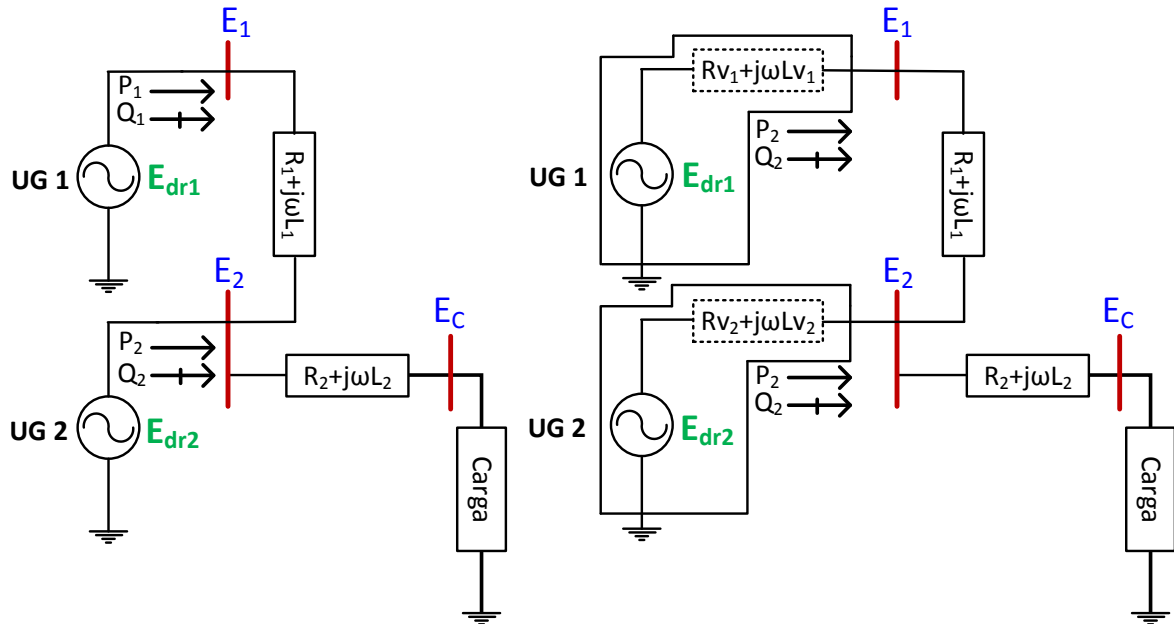
Pressupondo uma MR com topologia em estrela e barramento único de carga, há apenas dois casos em que a distribuição de reativos será precisa com o DrC convencional. O primeiro, ocorre se as UGs forem de mesma capacidade, os coeficientes k_{p_n} e k_{v_n} forem iguais para todas as unidades e as impedâncias de linha forem iguais. O segundo, ocorre para UGs de capacidades diferentes, coeficientes do controle primário devidamente balanceados e impedância de linhas diferentes, porém com valores escolhidos de tal forma que as quedas de tensão em todas as linhas sejam exatamente iguais para os fluxos de potência ativa e reativa esperados. Naturalmente é um problema iterativo e com mais de uma solução.

No caso de MRs de topologia mais complexa, como a de malha (*meshed*), o equilíbrio das tensões e impedâncias de linha não garante distribuição adequada de potência reativa, inclusive por que na saída de uma única UG poderão partir diversas linhas, tornando a rede eletricamente assimétrica. Nesse caso, a distribuição precisa muitas vezes só pode ser obtida de forma dinâmica por um controle que envolva comunicação e impedâncias virtuais [28].

Por exemplo, seja um sistema com três barramentos, sendo dois de geração - de mesma capacidade - e o terceiro de carga, contendo uma linha de transmissão entre a UG 1 e a UG 2 e outra linha ligando o barramento de carga à UG 2, ilustrado à esquerda na Figura 2.4. Mesmo que as duas linhas tenham mesma impedância e as UGs tenham impedâncias de saída nulas ou idênticas, as potências reativas de ambas as UGs somente serão iguais se a tensão de saída da UG 2 (E_2) for regulada para o valor dado em (2.14), sendo E_1 a tensão de saída da UG 1 e E_c a tensão no barramento de carga [28].

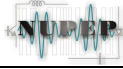
$$E_2 = \frac{2E_1 + E_c}{3} \quad (2.14)$$

Figura 2.4 - Microrrede assimétrica e impedâncias virtuais



Fonte: o autor (2019), baseado em [28].

Nesse caso, há um conflito técnico. Pois enquanto a rede elétrica requer diferenças entre E_1 e E_2 para a distribuição precisa da potência reativa, o DrC convencional exige que $E_{dr2} = E_{dr1}$ para distribuição precisa de potência reativa conforme os valores de k_{vn} . Desse modo, esse problema só tem solução com uso de impedâncias virtuais, para que E_2 possa ser diferente



de E_{dr2} e E_1 diferente de E_{dr1} (a diferença será a tensão nas impedâncias virtuais). Além disso, para que a distribuição se mantenha conforme o carregamento, o valor de tais impedâncias virtuais deve ser atualizado automaticamente por um sistema de controle para que (2.14) e $E_{dr2} = E_{dr1}$ sejam sempre atendidas, como ilustrado à direita na Figura 2.4.

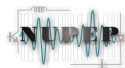
Já a potência ativa, é perfeitamente distribuída, independentemente dos valores das impedâncias, topologia da MR e diferenças de tensões, desde que seja feito o balanceamento correto dos coeficientes k_{p_n} e se escolha parâmetros do controle e do sistema que garantam a estabilidade [19], [50], [52].

O DrC convencional também possui problemas para distribuição de correntes harmônicas entre as unidades (distribuição da potência de distorção) e também de correntes de sequência negativas e zero, em caso de desequilíbrio na MR, já que trabalha com valores fundamentais e de sequência positiva [11], [52].

Ressalta-se novamente que o conceito de impedância de linha, no caso dessa análise, engloba não somente as impedâncias de interconexão físicas (linhas), mas também a impedância virtual e impedância de saída da UG, se presentes. Baseado nessa filosofia, há publicações que propõem controles para ajuste automático das impedâncias virtuais ou impedâncias de saída para que a distribuição de potência reativa se torne precisa, forçando o sistema a recair em algum dos dois casos citados anteriormente, por exemplo: [24], [51], [52], [53].

O livro [54] faz uma análise matemática detalhada da distribuição de potência ativa e reativa pelo DrC, no capítulo 18. A análise é realizada com base no DrC adequado para impedâncias predominantemente resistivas, que é a variante com curvas de *droop* $V \times P$ (decaimento da tensão proporcionalmente à potência ativa) e *boost* $\omega \times Q$ (elevação da frequência proporcionalmente à potência reativa). Nesse tipo de controle, o problema se inverte, havendo desvio na distribuição de potência ativa ao invés da reativa [18]. Todavia, é possível adaptar facilmente os desenvolvimentos descritos para o DrC convencional.

Ainda sobre a distribuição de potência reativa pelo DrC convencional, é verificado que maiores valores para os $k_{v,s}$ das unidades levam à melhor distribuição de potência reativa em detrimento de maiores desvios nas tensões [55], [56]. O mesmo acontece para o DrC modificado, para utilização com impedâncias predominantemente resistivas, citado anteriormente, porém com a relação passando a ser entre uma melhor distribuição de potência ativa e pior regulação de frequência com o aumento dos $k_{p,s}$ [54], [56].



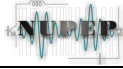
No trabalho [24] é proposta uma estratégia para ajuste automático das impedâncias virtuais para correção da distribuição de potência reativa. O método é distribuído ao longo das UGs e requer um controle centralizado para envio das potências reativas de referência, podendo resultar em insuficiente confiabilidade, segundo [16]. É mostrado o efeito da perda de comunicação entre uma unidade e o controle central, indicando que não há grande redução de desempenho se a carga não se alterar muito após tal ocorrência. Não é explorada a situação de parada total do controlador central. Faz uma verificação simples (experimental) da influência do atraso da rede de comunicação, mostrando que não afeta o regime permanente e há pouco efeito no regime transitório para a condição de duas UGs, tendo para primeira, um atraso de 0,1s e 0,05s para a outra, até o controlador central.

Em [46] é estudado um paralelismo de UPS onde a impedância de linha e impedância virtual são resistivas, logo o controle utilizado é o DrC com curvas de *droop* $V \times P$ e *boost* $\omega \times Q$ já mencionado. Um controle para sintonia das impedâncias virtuais resistivas, operando para correntes na frequência fundamental, é proposto para correção dos desvios de distribuição de potência ativa e um controle baseado na potência de distorção sintoniza impedâncias virtuais que atuam em correntes harmônicas para a distribuição da potência de distorção. A componente fundamental e as harmônicas são extraídas da corrente através de filtros SOGI (*Second Order General Integrator*).

A distribuição das correntes harmônicas (ou potência de distorção) através da impedância virtual possui a desvantagem de implicar em distorção na tensão de saída das UGs, havendo um compromisso entre as duas questões [5], [29].

A publicação [57] propõe um controle primário modificado, denominado *droop* deslizante, sem necessidade comunicação e distribuído, para regular as tensões e frequências da MR dentro de uma faixa aceitável durante operação ilhada e distribuição equitativa de potências ativa e reativa. Entretanto, a distribuição adequada de potência reativa somente é garantida entre geradores conectados diretamente ou com impedância de acoplamento/saída desprezível. São mostrados bons resultados de simulação e experimentais. Porém, não foi discutido o efeito da presença de impedâncias de linhas consideráveis e distintas na distribuição de reativo e no controle de tensão, nem a influência de eventuais impedâncias virtuais ou impedâncias de saída.

Ainda em [57], o controle primário proposto pode eliminar, em alguns casos, a necessidade do CS ou terciário. É também afirmado que aquele é compatível com a utilização de CS (se necessário) ficando em aberto a comprovação de tal afirmação, confirmando se é



válida para qualquer estratégia de CS e o detalhamento das possíveis formas de interconexão dos dois sistemas.

A referência [12] deduz os seguintes aspectos importantes com relação ao controle primário: A utilização de impedância virtual puramente indutiva é matematicamente equivalente ao DrC modificado de curvas $\theta \times P$, que gera decaimento do ângulo da tensão *versus* potência ativa, chamado de *droop* de ângulo, e $V \times Q$ (curva clássica de decaimento da tensão com aumento da potência reativa); O *droop* de ângulo (e consequentemente a impedância virtual indutiva) é matematicamente equivalente ao *droop* de frequência ($\omega \times P$) modificado com filtro de *washout* ou *droop* de frequência derivativo. Desse modo, as técnicas de projeto e análise da impedância virtual e do controle primário são ampliadas ao se constatar as semelhanças matemáticas entre as estratégias.

O efeito dos aspectos constatados em [12], é que o controle primário com impedância virtual puramente indutiva e com utilização do DrC convencional, como é comumente realizado, equivale a um DrC híbrido, do tipo proporcional-derivativo com curva $\omega \times P$, para a distribuição de potência ativa e DrC tipo convencional com curva $V \times Q$ para a distribuição de potência reativa, porém com coeficiente de inclinação (k_{v_n}) aumentado pela utilização da impedância virtual. Essa equivalência facilita a análise matemática e implementação do sistema, e é representada por (2.15) e (2.16), utilizando a notação do presente trabalho.

$$\omega_n = \omega_0 - k_{p_n} P_n - k_{pv_n} \frac{dP_n}{dt} \quad (2.15)$$

$$E_{dr_n} = E_0 - (k_{v_n} + k_{vv_n}) Q_n \quad (2.16)$$

Em que:

$$k_{pv_n} = \frac{\omega L_v}{E_0^2} \quad (2.17)$$

e

$$k_{vv_n} = \frac{\omega L_v}{E_0}. \quad (2.18)$$

A equação (2.15) pode ser implementada na forma integrada para conversão da frequência em fase e eliminar a derivada, que amplifica interferências e ruídos [12].

Os controles via *droop* que se baseiam em ângulo ao invés da frequência possuem a vantagem de desviarem pouco a frequência da MR em regime permanente - que é uma variável



com restrições pesadas para desvios - e portam uma excelente compatibilidade com linhas de razão X/R pequenas [25]. A desvantagem é que precisam de um sinal para sincronismo de fase entre as unidades, para que as frequências sejam perfeitamente iguais, utilizando sistemas de posicionamento global (GPS), internet ou outras formas de comunicação, já que existe uma precisão finita no sistema de *clock* das unidades [12], [25], [55]. Faltam estudos abordando o comportamento da MR e possíveis medidas de restauração em caso de falhas em tal sistema de comunicação, perdendo o sincronismo [55].

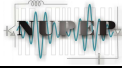
Em [25], é proposta uma matriz de transformação, baseada nas impedâncias das linhas, para modificação dos coeficientes de inclinação e das potências medida e de referência para controle primário implementado através do DrC baseado em ângulo (curvas ω_{xP} e \dot{V}_{xQ}), para melhoria da distribuição das potências ativa e reativa e melhor desacoplamento entre elas em sistemas com linhas de razão X/R pequenas.

Um outro DrC modificado, que emprega curvas ω_{xP} e \dot{V}_{xQ} , é estudado em alguns trabalhos. Essa estratégia apresenta melhor distribuição de potência reativa em relação ao DrC convencional, de forma independente das impedâncias de saída ou de linha, já que trabalha variando a derivada da tensão, e não sua amplitude [58]. Porém, devido a determinadas características relacionadas a forte não linearidade do sistema, essa estratégia falha na distribuição de potência reativa em caso de grandes variações de carga pois o sistema em malha fechada tem pontos de equilíbrio estável não isolado [59]. Segundo [55], esse tipo de DrC possui estabilidade muito difícil de ser garantida pela grande dependência de condições iniciais, tendo pouca aplicabilidade prática.

Ainda, a topologia de MR abordada em [58] é em estrela com barramento único de carga (sem cargas locais nas UGs). De fato, segundo [16], o controle de tensão por curvas \dot{V}_{xQ} não tem bom desempenho na distribuição de potência reativa se as unidades conterem cargas locais.

O trabalho [59] utiliza um algoritmo de média distribuída (*Distributed-Averaging Proportional-Integral* - DAPI) para melhoria do DrC modificado, de curvas ω_{xP} e \dot{V}_{xQ} , empregando teoria de consenso (filosofia discutida mais à frente) para comunicação de potência ativa e reativa entre as unidades para manutenção da distribuição de potência ativa e reativa mesmo sob grandes variações de carga e independentemente das impedâncias.

O DAPI foi proposto originalmente em [19], que o utilizou somente para a curva ω_{xP} do DrC, para realização de um controle secundário de restauração da frequência, mantendo a distribuição precisa de potência ativa. Já em [59] a técnica DAPI foi estendida para a curva \dot{V}_{xQ} , visando correção dos erros na distribuição de potência reativa sob grandes distúrbios, que



era uma desvantagem original da curva $\dot{V}_x Q$. Além disso, há também melhoria no comportamento dinâmico, aumentando o amortecimento.

Ainda em [59], é afirmado que o sistema requer pouca banda na comunicação, mas não há estudo matemático do efeito do atraso de tempo da comunicação no sistema, e nos resultados não há menção sobre a largura de banda ou atrasos de tempo utilizados na simulação computacional, sugerindo que uma rede de dados ideal foi considerada. Adicionalmente, é empregado no sistema um mecanismo para restauração da frequência e tensões da MR, baseados na proposta de [58]. A frequência é sempre restaurada precisamente para o valor nominal. Já o sistema de restauração das tensões, na realidade, serve para zerar a derivada imposta pela curva $\dot{V}_x Q$, estabilizando as tensões a um valor constante. O sistema não requer que a linha de comunicação seja totalmente conectada (todas unidades trocando informações com todas as outras), podendo ser esparsa, onde cada unidade comunica com apenas uma vizinha.

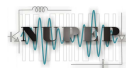
O controle primário via DrC com filtros *washout* foi proposto em [42]. Na realidade é o DrC convencional em que os coeficientes de inclinação k_{p_n} e k_{v_n} são substituídos por filtro passa-alta, que rejeitam sinais contínuos, fazendo com que o desvio em regime permanente na frequência e tensão sejam nulos. Ou seja, o DrC se comportará, em regime permanente, como um regulador de frequência e tensão isócrono. Segundo [12], essa técnica apresenta problemas de estabilidade e robustez e não há melhoras na distribuição de potência, apesar das grandes vantagens na regulação de tensão e frequência. É uma proposta recente, ainda com poucos trabalhos explorando suas vantagens, limitações e modelagem matemática.

Considerando linhas com impedância complexa, no sentido de que a linha não tenha uma predominância nem fortemente indutiva nem fortemente resistiva, em [60] é proposto um novo DrC, descrito pelas equações (2.19) e (2.20). Com tal modificação, o resultado dinâmico é melhorado, o desacoplamento entre potência ativa e reativa é fortemente elevado e a distribuição de potência reativa é melhorada, havendo menores valores de corrente de circulação entre os inversores, conforme mostrado no trabalho.

$$\omega_n = \omega_0 - k_{p_n}(P_n - Q_n) \quad (2.19)$$

$$E_{dr_n} = E_0 - k_{v_n}(P_n + Q_n) \quad (2.20)$$

Em [29] e [55], é feita uma revisão extensa sobre o controle primário, abordando mais de 14 técnicas diferentes. As principais vantagens e desvantagens são comentadas, focando na



distribuição de potência. É reafirmado o entendimento de que ainda não há um “controle ideal” e todas estratégias possuem pontos negativos que muitas vezes não podem ser desprezados, possuindo uma aplicabilidade de certa forma limitada. O trabalho [55] também chama a atenção para os bons resultados das técnicas híbridas, que juntam filosofias de controle que não necessitam de comunicação, como o DrC convencional, com aquelas que utilizam comunicação de baixa banda - como as estratégias de impedância virtual adaptativa e CS, por exemplo.

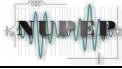
2.4 CONTROLE SECUNDÁRIO

O CS tem como tarefa principal o restauro da qualidade de energia nos nós da MR no tocante à frequência e amplitude das tensões, corrigindo os desvios causados pelo controle primário [2], [42]. Em alguns estudos, o CS pode atuar também na melhoria da distribuição de potência [3], [50]. Devido ao limitado, porém considerável, desacoplamento entre as duas variáveis, algoritmos diferentes são utilizados para a restauração das tensões e para as frequências, e o CS pode ser então dividido em: CS de Tensão (CST) e CS de Frequência (CSF).

Em [2] e [5] é proposto que o CS também atue no sincronismo entre a MR e a rede elétrica para conexão e desconexão “suave” entre elas. Como o CS tem capacidade de regular frequência e tensões, nos instantes anteriores à reconexão da MR com a rede elétrica, algum controle de hierarquia superior, como o terciário ou outro controle central a parte, poderá atuar nas referências de frequência e tensão do CS e usá-lo para realizar o sincronismo de forma indireta. Porém, na maioria dos trabalhos a respeito do CS publicados nos anos posteriores, essa funcionalidade não foi explorada.

Quando a MR está conectada à rede elétrica, a frequência dela deve acompanhar naturalmente a da rede elétrica, não podendo haver controle de frequência na MR. E os níveis de tensões normalmente são satisfatórios, ficando o CS necessário apenas durante a operação ilhada. Desse modo, é então compreensível que na maioria dos trabalhos sobre CS seja considerada a ausência total da rede elétrica, não abordado a questão do seu uso para sincronismo visando reconexão.

É perfeitamente possível restaurar a frequência em uma MR isolada para o valor nominal com precisão. Diferentemente, os controles secundários que visam regular as tensões de todos os nós de forma homogênea e/ou precisa (seguindo uma referência global) poderão piorar o problema da distribuição de potência reativa em linhas predominantemente indutivas ou a distribuição de potência ativa, em linhas predominantemente resistivas [22], [28], [29]. Isso se deve ao fato de que é necessário diferença nas amplitudes das tensões entre os dois nós



de uma linha para haver fluxo de potência ativa e reativa - principalmente a segunda, para as linhas com razão X/R elevada - como pode ser visto em (2.21), que representa o valor aproximado da queda de tensão em uma linha RL genérica [12].

$$\Delta V \cong \frac{RP + XQ}{V} \quad (2.21)$$

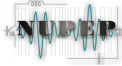
ΔV é a diferença da tensão eficaz na saída da linha em relação à entrada, P e Q são as potências ativa e reativa fluindo pela linha, V é a tensão de fase eficaz da entrada da linha, R é a resistência da linha e X é a reatância indutiva da linha.

Conforme discutido no tópico a respeito do controle primário, com a utilização da impedância virtual - ou de alguma estratégia de impedância de saída pelo controle interno - a tensão na saída da UG deixa de possuir a amplitude e fase unicamente determinadas pelas equações do DrC. Portanto, quando se fala em restauração de tensão, deve-se considerar o efeito de tais impedâncias e até o das impedâncias físicas das linhas de transmissão na restauração de tensão. Por exemplo, pode ser proposto um CST que restaure a tensão de saída das UGs, compensando a queda no DrC convencional e nas impedâncias virtuais. Nesse caso, as quedas de tensão nas linhas de transmissão não são compensadas. Ou então, um CST que compense apenas os desvios causados pelo DrC convencional, não compensando quedas em nenhum tipo de impedância.

Conforme discutido acima e nos tópicos anteriores, o controle de MRs é um assunto muito heterogêneo. O restauro da frequência normalmente é um tema mais contido, pois a frequência da MR em regime permanente é a mesma em todos os nós, e normalmente esta é restaurada com precisão para 50 ou 60 Hertz. Já no caso da tensão, a quantidade de estratégias possíveis é muito grande. Pois a tensão em diversos pontos da MR - ou até internamente nas UGs - assume um valor diferente, e muitas vezes tais discrepâncias são essenciais para a distribuição de potência e amortecimento.

As duas formas mais comuns de se resolver o conflito entre regulação de tensão e a distribuição de potência reativa é: 1. Regular a tensão em apenas um nó específico da microrrede e 2. Regular o valor da média das tensões, mantendo os desvios necessários para distribuição de potência reativa.

Logo, quando se analisa um CST, deve-se verificar principalmente qual o objetivo pretendido, qual a filosofia empregada, quais os nós controlados, qual o efeito das impedâncias físicas ou virtuais em seu funcionamento, se é distribuído ou centralizado, se afeta a distribuição de potência positivamente ou negativamente, se necessita de rede de dados (se sim, verificar a



influência da topologia da rede e atrasos de tempo) e se é influenciado pela topologia elétrica da MR (distribuição e forma de conexão das cargas e linhas).

Em [5], um CS é discutido. O controle visa restaurar com precisão a tensão e frequência de um barramento de carga específico. É um controle totalmente centralizado, reduzindo sua confiabilidade. Foi considerado que o CS comunicará com todas as unidades, não sendo abordado os efeitos do rompimento de alguma linha de dados (ou utilização deliberada de topologia mínima). Além disso, pode apresentar dificuldades de implementação se o barramento de carga for remoto, por necessitar de medições *in loco* do barramento.

2.4.1 Controles Baseados em Consenso

Seguindo a linha de controle distribuído, os controles baseados em teoria de consenso de sistemas multiagentes e controle cooperativo tem se despontado, mostrando bons resultados para MRs [29]. A filosofia de controle por consenso é baseada de forma interdisciplinar na teoria de controle, teoria dos grafos e álgebra linear [9], [61]. Um controle por consenso tem como meta um objetivo final comum a todas as unidades, que trabalharão para atingi-lo utilizando comunicação apenas entre vizinhos, oferecendo assim, grande robustez [28], [59]. O sistema multiagente chega em um consenso quando todas as unidades se acordarem em relação a uma certa variável que depende dos estados de todos os agentes [61].

Como o CS de MRs é um problema multiagente e utiliza comunicação de dados, a teoria dos grafos é muito utilizada dentro dessa temática, onde cada nó (vértice) é um agente - normalmente uma UG - e as arestas indicam as conexões diretas de dados entre um agente e outro [29], [62].

Um grafo é definido como um conjunto $G = (V_G, E_G, A_G)$ em que $V_G = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ são os nós (vértices), $E_G \subset V_G \times V_G$ é o conjunto de arestas e $A_G = [a_{ij}] \in R^{N \times N}$ é a matriz de adjacência. N é a quantidade de vértices. Se o par de nós $(v_i, v_j) \in E_G$, $a_{ij} = 1$, significando que o nó i recebe informações do nó j . Caso contrário, $a_{ij} = 0$. Normalmente, para a aplicação em questão, A_G é esparsa, pois a rede não contém muitas conexões [29] e $a_{ii} = 0$, o que significa que geralmente um nó não troca informações consigo mesmo, não existindo laços (*loops*) no grafo [9]. Caso pesos sejam utilizados nas conexões, a_{ij} pode ser um valor diferente de 1 se $(v_i, v_j) \in E_G$, sendo denominado de grafo ponderado [62].

Se necessariamente $a_{ij} = a_{ji}$ para todo i e j , o grafo é do tipo não direcionado ou não dirigido ou não orientado. Caso contrário, é direcionado - também chamado de dirigido,



orientado ou digrafo¹ [63], [64], [65]. Normalmente os trabalhos em MRs utilizam a representação de grafo dirigido para a rede de dados, por serem mais gerais.

Desse modo, o conjunto dos vizinhos (*neighbors*) de um vértice i é $Ns_i = \{j \in N : (v_i, v_j) \in E_G\}$, que são chamados de adjacentes ao vértice i . É definida a matriz diagonal de grau (*degree matrix*) dos vértices $D_G = \text{diag}(d_i)$ onde $d_i = \sum_{j \in Ns_i} a_{ij}$ que indica a quantidade de conexões (vizinhos) em um determinado nó i [62]. Também é definida a importante matriz laplaciana do grafo G : $L_G = D_G - A_G$. Pela definição, os elementos de L_G (l_{ij}) são dados por (2.22) [61]. A matriz laplaciana de um grafo não é afetada pelos elementos diagonais da matriz de adjacência, que representam os laços [66].

$$l_{ij} = \begin{cases} -1, & j \in Ns_i \\ d_i, & j = i \end{cases} \quad (2.22)$$

Caminhos e passeios são diferentes de arestas. As arestas (*edges*) fazem a ligação “nó a nó” e os passeios (*walk*) são formados por um conjunto de arestas, passando por um conjunto de nós. Se o passeio não possuir nós repetidos, aquele é chamado de caminho (*path*). Entre outras palavras, as arestas fazem uma conexão direta entre dois nós. Com um caminho que passa pelos nós a e b (dentre outros nós), partindo-se do nó a pode-se chegar ao nó b , passando por outros nós, mesmo que não exista uma aresta entre a e b . No caso dos grafos dirigidos, o termo “aresta direcionada” muitas vezes é substituído pelo termo “arco”.

Um grafo não dirigido é chamado de conexo se existir algum caminho dado por qualquer sequência de vértices ou arestas de modo com que se consiga atingir qualquer nó partindo de qualquer outro nó (mesmo que seja necessário passar por várias arestas / nós). Se houver algum nó que não seja atingível a partir de todos os demais, o grafo é desconexo. Quando há uma aresta ligando cada nó até todos os demais nós, o grafo é do tipo completo (também denominado, mais raramente, de completamente conexo ou totalmente conectado). Ou seja, o grafo é completo, se e somente se todo vértice é adjacente de todos outros vértices [67].

Naturalmente, todo grafo completo é conexo, mas nem todo grafo conexo é completo. Um grafo regular (k -regular) é aquele em que todos os seus vértices possuem o mesmo grau (k). Um grafo completo de N vértices normalmente é chamado de K_N . O grau de todos os seus vértices é dado por $N-1$ e o número de arestas é $\frac{N(N-1)}{2}$ [67].

¹ O termo “digrafo”, na teoria dos grafos, é um neologismo derivado de *digraph*, sendo majoritariamente escrito sem acentuação na letra *i* e pronunciado como palavra paroxítona. Provavelmente, para se diferenciar de “dígrafo” (proparoxítono), termo oriundo da teoria de fonologia da língua portuguesa (que possui significado totalmente diferente) e para reforçar a sua relação com a palavra “grafo” durante a pronúncia.



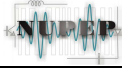
Um digrafo é chamado de fortemente conexo se para todo par (u,v) de vértices distintos haja um caminho de u para v e de v para u . O caminho deverá respeitar a direção das arestas. Logo, o caminho de u para v pode não ser o mesmo que de v para u . Isso significa que cada nó qualquer (u) pode ser alcançado partindo-se de qualquer outro nó (v) e vice versa, por algum caminho [67]. Observar que, da mesma forma que no conceito de grafos não dirigidos conexos, isso não implica na necessidade da existência de arestas ligando todos vértices, muito menos nas duas direções.

Um grafo dirigido é chamado de fracamente conexo quando para cada par (u,v) de vértices distintos haja um caminho de u para v e de v para u quando se desconsidera totalmente a direção das arestas (arcos) do digrafo. Outra interpretação para o termo é: um digrafo é fracamente conexo quando substituídas todas suas arestas dirigidas por não dirigidas, o grafo não dirigido resultante for do tipo conexo. Observar que fracamente conexo não é o oposto de fortemente conexo e mais ainda, todo digrafo fortemente conexo é também fracamente conexo. Já o contrário, pode ou não ser verdadeiro [67].

Do mesmo modo que existem os grafos não dirigidos completos, essa classificação também pode se estender para os dirigidos, significando que há uma aresta ligando cada nó até todos os demais nós, nas duas direções [67]. Ou seja, há uma conexão direta de “via dupla” entre todos os pares de vértices do digrafo. Naturalmente, os digrafos completos também são simultaneamente fortemente e fracamente conexos. Importante observar que um digrafo completo é matematicamente equivalente a um grafo não dirigido completo.

Se houver algum vértice que não seja atingível, em pelo menos uma direção, por todos os demais vértices o digrafo é desconexo. Normalmente não se utiliza o termo “conexo” para um digrafo, utilizando em seu lugar os termos: fortemente conexos ou fracamente conexos. Mas quando é utilizado, significa fracamente conexo. Um digrafo também pode ser regular (também denominado k -regular), que é quando todos os seus vértices possuem entre si a mesma quantidade de arestas “entrando” e a mesma quantidade de arestas “saindo” e, logicamente, o mesmo grau k (quantidade total de arestas) [67].

Sob o ponto de vista da rede de dados de uma MR, se ela for construída de tal forma que cada nó tenha a possibilidade de se comunicar com todos os demais nós, o grafo (ou digrafo) correspondente será do tipo completo. Essa topologia de rede de dados costuma receber os seguintes nomes nos trabalhos publicados: totalmente conectada; completa; fortemente conectada/conexa. Um ponto de atenção sobre a última denominação: ainda que, conforme visto, todo digrafo completo seja fortemente conectado, o oposto não é necessariamente



verdade. Logo, uma determinada rede de dados pode corresponder a um digrafo do tipo fortemente conectado que não seja completo, não correspondendo então, à topologia completa de rede de dados, pois poderá ter diversos nós não adjacentes.

A causa dessa possibilidade de confusão é que, no caso das MRs, normalmente é considerado que os caminhos da rede de dados são as arestas do grafo correspondente. Ou seja, só haverá caminho para troca de dados entre uma i -ésima UG e uma n -ésima UG se houver uma aresta entre os vértices i e n , isto é, se forem adjacentes ($a_{in} \neq 0$). Entretanto, a teoria de grafos, conforme descrito, diferencia os termos caminho e aresta, podendo existir um caminho entre dois vértices mesmo que não sejam adjacentes ($a_{in} = 0$). Por isso, um digrafo fortemente conexo representa uma rede de dados totalmente conectada (completa) somente se for um digrafo completo.

No caso de sistemas com muitas UGs, a topologia completa deve ser evitada, principalmente pelo custo. Nos parágrafos a seguir será mostrada uma forma de reduzir a quantidade de conexões de uma rede mantendo o grafo (ou digrafo) correspondente conexo.

Um ciclo é um grafo necessariamente conexo em que cada vértice tem exatamente dois vizinhos (vértices adjacentes). Em outras palavras é representado por um passeio de pelo menos três vértices onde o primeiro e o último vértice são os mesmos, mas nenhum outro se repete. O ciclo também pode se referir a um subgrafo que apresenta tais características. Um grafo em que cada vértice tenha pelo menos dois vizinhos necessariamente conterá ao menos um ciclo. Um grafo que não contem ciclos é chamado de acíclico. Um grafo acíclico conectado é comumente chamado de árvore. Observar que um ciclo é diferente de um laço. Quando um vértice é adjacente a si mesmo, tem-se um laço [67].

Uma árvore só pode ser um grafo completo se tiver até dois nós, pois caso contrário haveriam ciclos nela. Um subgrafo conexo do tipo gerador, também chamado de abrangente (*spanning*) de um grafo conexo G contém necessariamente todos os vértices de G . Porém, suas arestas são um subconjunto das arestas de G , ou seja, o subgrafo gerador não terá necessariamente todas as arestas de G , mas as que ele tiver, estarão conectadas entre os mesmos vértices que a aresta correspondente em G [67].

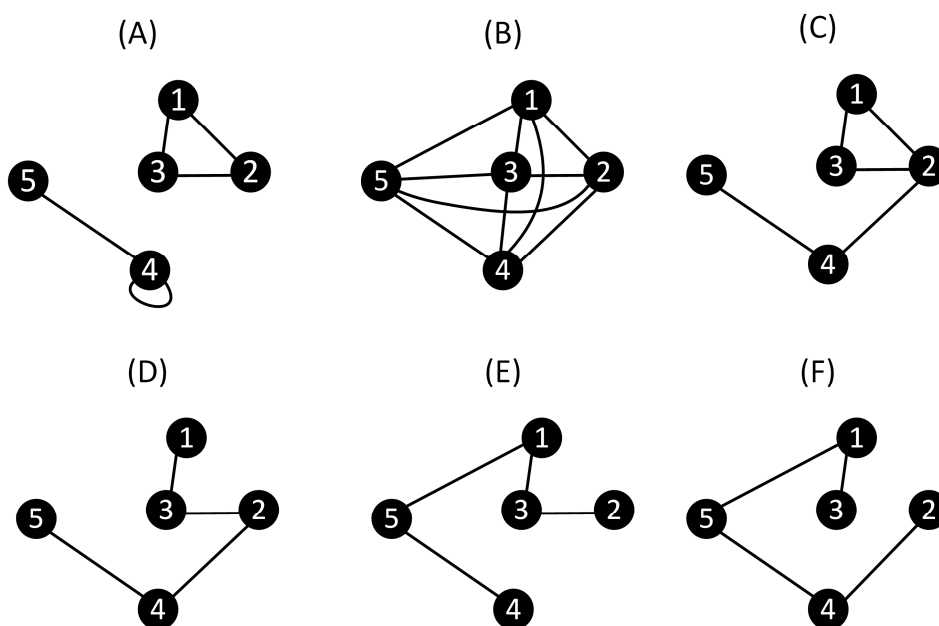
Uma árvore geradora (*spanning tree*), também denominada de árvore abrangente, de um grafo G é um subgrafo que simultaneamente é uma árvore e um subgrafo gerador de G . Desse modo, uma árvore geradora de G contém todos os vértices de G , não possui ciclos, é conexa e suas arestas estão contidas no conjunto E_G das arestas de G . Todo grafo que é conexo possui pelo menos uma árvore geradora e vice-versa [67].

Todas as possíveis árvores geradoras de um grafo conterão o mesmo número de arestas, pois é igual ao número de vértices menos um. O fato importante sobre uma árvore geradora é que ela é um subgrafo com o menor número de arestas possível sem que se perca a conectividade original do grafo, passando por todos os vértices. No caso dos digrafos, além da árvore geradora ser obviamente conexa, ela deve ser do tipo fracamente conexa não podendo ser fortemente conexa, pois conteria ciclos, infringindo a condição de árvore [67].

Muitas vezes um grafo pode ter mais de uma árvore geradora, sendo denominada de árvore geradora mínima, ou árvore de extensão mínima (*minimal spanning tree*) aquela que especificamente possuir um menor custo (normalmente econômico) frente às demais [68].

A Figura 2.5 mostra um exemplo de seis grafos não dirigidos formados por cinco vértices, para ilustrar as definições comentadas. O grafo **A** é do tipo desconexo, pois os nós 4 e 5 não podem ser alcançados pelos nós 1, 2 e 3 e vice-versa. Há um laço no vértice 4 do grafo **A**, indicando que ele é adjacente dele próprio. O grafo **B** é do tipo completo, com todos vértices adjacentes a todos os demais.

Figura 2.5 - Exemplos de grafos



Fonte: o autor (2018).

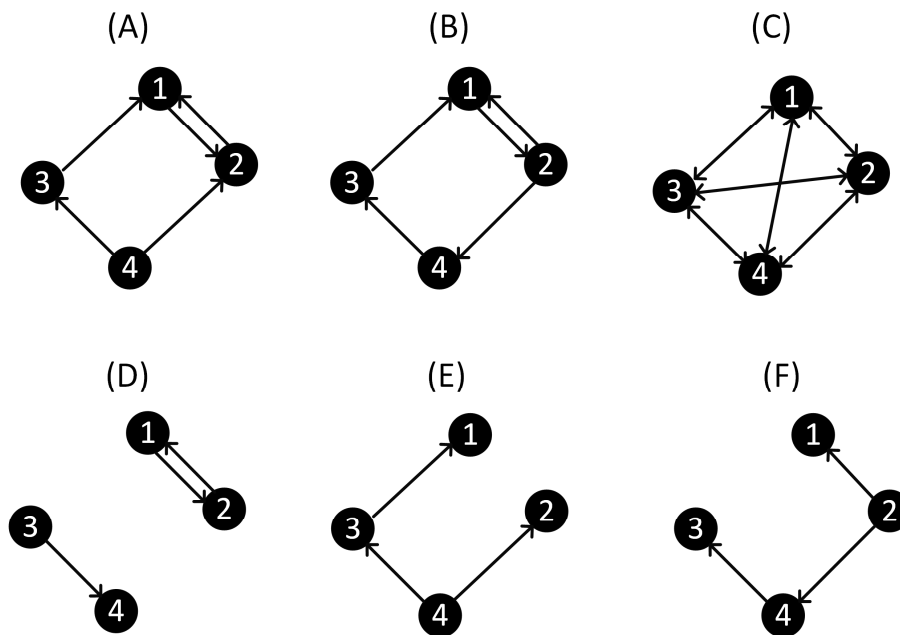
Na Figura 2.5, há um caminho ligando os nós 5 e 3 do grafo **C** (passando por 2 e 4), portanto eles são conectados, ainda que não sejam adjacentes, isto é, mesmo que não haja aresta entre eles. No grafo **C** os nós 4 e 5, por exemplo, são adjacentes, havendo uma aresta ligando ambos. O grafo **C** é conexo, porém não é completo e nem é uma árvore, por conter um ciclo envolvendo os nós 1, 2 e 3. O grafo **D** é uma árvore geradora do grafo **B**, por conectar todos os

nós de B , ser acíclico e todas suas arestas possuírem uma correspondente no grafo B na mesma “posição”.

Ainda sobre a Figura 2.5, os grafos E e F são exemplos de outras árvores geradoras possíveis de B , pelos mesmos motivos. Adicionalmente, D também é árvore geradora de C , que por sua vez pode ser visto como um subgrafo de B , mesmo não sendo sua árvore geradora. Os grafos E e F não são árvores geradoras de C , por não serem subgrafos dele, devido à presença da aresta entre 1 e 5.

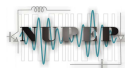
A Figura 2.6 mostra exemplos de grafos dirigidos. O digrafo A é fracamente conexo, pois o vértice 4 somente pode ser atingido partindo-se dos demais nós se a aresta que liga ele com o nó 2 for trocada por uma não dirigida. Ou seja, o caminho para o nó 4 é do tipo fraco. O digrafo B é fortemente conexo, pois respeitando a direção de suas arestas, todos os nós são atingíveis partindo-se dos demais. O digrafo B também é fracamente conexo, pois se suas arestas forem trocadas por não dirigidas, o grafo será conexo.

Figura 2.6 - Exemplos de digrafos



Fonte: o autor (2018).

Ainda na Figura 2.6, o digrafo C é completo (que necessariamente é também fortemente e fracamente conexo). O digrafo D é desconexo, pois os vértices 3 e 4 estão isolados. O digrafo E é uma árvore geradora dirigida do digrafo A , com raiz no vértice 4. O digrafo F é uma árvore dirigida do digrafo B , com raiz em 2. Tanto A quanto B são fracamente conexos.



A grande vantagem de uma topologia baseada em árvore geradora mínima é a de proporcionar um custo mínimo sem que fique algum nó “de fora” do sistema de comunicação, ou seja, que o grafo se mantenha conexo. A principal desvantagem é a menor redundância. Esse tipo de rede normalmente é denominado nas publicações de: rede esparsa, topologia de árvore geradora, rede minimamente conectada ou fracamente conectada (conexa).

Novamente, o mesmo problema comentado acerca da utilização do termo “fortemente conexa/conectada” existe para o termo “fracamente conexa/conectada”, podendo gerar má interpretação. Uma rede de dados representada por um digrafo fracamente conectado não necessariamente implica em topologia baseada em árvore geradora. Inclusive, uma rede de dados totalmente conexa - com todos nós adjacentes a todos outros nós - é representada por um digrafo que é simultaneamente do tipo completo, fortemente conexo e fracamente conexo.

Logo, para evitar problemas com interpretações, a partir deste momento, quando a topologia da rede de dados levar a um grafo/digrafo completo (todos os vértices adjacentes a todos outros vértices), será denominada: de rede de dados completa. Se a topologia for esparsa, seguindo exatamente a forma de alguma árvore geradora do grafo/digrafo correspondente à rede completa, será chamada de: rede minimamente conexa ou rede de topologia mínima. Se houver o isolamento de alguma(s) unidade(s) geradora(s) (no tocante à conexão de dados), a rede resultará em um grafo/digrafo desconexo, sendo denominada de rede desconexa.

Um CS distribuído que reestabelece frequência, tensões e distribuição de reativo é apresentado em [18]. O controle trabalha com três malhas embarcadas em cada UG (uma para frequência, outra para tensão e outra para distribuição de potência reativa) contendo o controlador Proporcional-Integral (PI). As tensões são reguladas pela média. Assim, são mantidos os pequenos desvios de amplitude entre os nós necessários para a distribuição de potência reativa desejada. Os resultados foram mostrados apenas com dois inversores e com impedâncias de conexão idênticas.

Ainda em [18], o CS distribuído proposto em tal trabalho é comparado com o CS centralizado de [5], com relação à robustez frente a atrasos de tempo e perdas de pacotes na comunicação, sendo o primeiro consideravelmente mais tolerante a tais efeitos, apresentando resultados melhores. Por exemplo, o controle centralizado tolerou (em termos de estabilidade) atrasos na rede de dados de até 2 s, enquanto o controle de [18] suportou atrasos de até 4 s. Porém, segundo [22] e [69], a técnica de [18] necessita de comunicação completa. De fato, em [18] não foi demonstrada a possibilidade de operação com redes mínimas.



A relação entre consenso e teoria dos grafos é dada principalmente pela matriz Laplaciana e suas propriedades. Por exemplo: o segundo menor autovalor da Laplaciana de um grafo é chamado de conectividade algébrica e quantifica a velocidade de convergência do algoritmo de consenso [66]; pelo Teorema da Matriz-Árvore de *Kirchoff*, a quantidade de árvores geradoras de um grafo é dada pelo valor de qualquer cofator da sua matriz Laplaciana [67].

O termo “rede de dados esparsa” é genérico, podendo indicar qualquer configuração topológica que implique em uma matriz de adjacência com muitos zeros (grafo com poucas arestas). Porém, na literatura de MRs, na maioria dos casos o termo é utilizado para se referir à uma condição específica de esparsidade: o da utilização de uma topologia para a rede de dados baseada em árvore geradora, pois, no caso do consenso, a esparsidade máxima de uma rede de dados deve ser do tipo árvore geradora, para garantir a manutenção da conectividade, haja vista que com grafos (ou digrafos) desconexos é impossível atingir perfeitamente o consenso [61].

Uma estratégia básica de consenso é o *average-consensus* contínuo. É um sistema formado por N agentes i , integradores, com dinâmica $\dot{x}_i = u_i$, onde u_i é a entrada do agente, x_i o estado do agente e Ns_i o conjunto dos vizinhos do agente i . Se todos os agentes trabalharem conforme (2.23), a dinâmica coletiva pode ser escrita por (2.24), em que \mathbf{X} é o vetor contendo todos os estados x_i [61].

$$u_i = \dot{x}_i(t) = \sum_{j \in Ns_i} a_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) \quad (2.23)$$

$$\dot{\mathbf{X}} = -\mathbf{L}_G \cdot \mathbf{X} \quad (2.24)$$

Pela própria definição de \mathbf{L}_G , a soma de todos elementos de qualquer linha da matriz é zero, o que faz com que \mathbf{L}_G tenha sempre um autovalor nulo. Esse autovalor corresponde ao autovetor unitário $\mathbf{1} = (1, \dots, 1)^T$ pois ele pertence ao espaço nulo de \mathbf{L}_G , já que $(\mathbf{L}_G - 0 \cdot \mathbf{I}) \cdot \mathbf{1} = \mathbf{0}$ onde \mathbf{I} é a matriz identidade [61]. O ponto de equilíbrio de (2.24) pode ser encontrado fazendo $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{0}$, o que implica em $\mathbf{L}_G \cdot \mathbf{X}_{eq} = \mathbf{0}$. Como $\mathbf{L}_G \cdot \mathbf{1} = \mathbf{0}$, $\mathbf{L}_G \cdot (\alpha \cdot \mathbf{1}) = \mathbf{0}$ e um equilíbrio de (2.24) é um estado $\mathbf{X}_{eq} = \alpha \cdot \mathbf{1} = (\alpha, \dots, \alpha)^T$. Logo, o consenso será atingido de forma que os estados convergirão assintoticamente para $x_1 = x_2 = \dots = x_N = \alpha$ que é o espaço vetorial unidimensional de *acordo* representado por $\mathbf{X}_{eq} = \alpha \mathbf{1}$. O valor α é chamado de decisão coletiva do grupo de agentes, dado por (2.25) [61]. Ou seja, a decisão coletiva atingida é a média dos estados iniciais de todos os nós.



$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_i^N X_i(0) \quad (2.25)$$

Se a rede de dados é representada por um grafo não direcionado conectado, é provado que o algoritmo (2.23) converge assintoticamente e unicamente para o valor numérico de (2.25) para todos os estados iniciais onde o vetor de equilíbrio é $\mathbf{X}_{eq} = \alpha \mathbf{1}$ [61]. Como os grafos conectados possuem pelo menos uma árvore geradora, a condição descrita acima também pode ser substituída por: Se o grafo não direcionado, representativo da rede de dados, possuir alguma árvore geradora, é provado que o algoritmo (2.23) converge assintoticamente e unicamente para o valor numérico de (2.25) para todos os estados iniciais onde o vetor de equilíbrio é $\mathbf{X}_{eq} = \alpha \mathbf{1}$.

Já para as redes representadas por grafo dirigido, a prova de convergência é um pouco mais complexa. A dedução completa é mostrada em [66]. Os grafos não dirigidos de N vértices são conexos se, e somente se, o posto da matriz laplaciana dele valer $N-1$. Já para os digrafos pode-se afirmar que: se um digrafo é fortemente conexo o posto de sua laplaciana \mathbf{L}_G é $N-1$. O caminho oposto não é necessariamente verdade. Como o posto de uma matriz é igual à quantidade de colunas menos a nulidade (dimensão do espaço nulo), conclui-se que se o digrafo G é fortemente conexo, a dimensão de seu espaço nulo é 1. Logo, \mathbf{L}_G terá um autovalor de multiplicidade 1 em zero e de forma similar ao deduzido para os grafos não dirigidos, esse autovalor corresponde ao autovetor unitário $\mathbf{1} = (1, \dots, 1)^T$. Então, se o digrafo for fortemente conexo, existe um ponto de equilíbrio $\mathbf{X}_{eq} = \alpha \mathbf{1}$.

O primeiro teorema utilizado é então: Se a rede é formada por integradores com dinâmica $\dot{x}_i = u_i$, ligados por um digrafo do tipo fortemente conexo, o algoritmo (2.23) converge assintoticamente para um consenso representado pelo equilíbrio $\mathbf{X}_{eq} = \alpha \mathbf{1}$ com $\alpha \in \mathbb{R}$ [66]. Isso não determina o valor de α . Resta agora analisar o valor de α para verificar em quais condições o consenso obtido é o *average-consensus*, ou seja, se o ponto único de equilíbrio será a média dos estados iniciais dos agentes.

Uma condição suficiente para a decisão coletiva α corresponder ao *average-consensus* (2.25) é se (2.26) for atendida, com u_i obtido de (2.23) [70].

$$\sum_{i=1}^N u_i = 0 \quad (2.26)$$



Pode ser verificado que para quaisquer grafos não dirigidos conexos, como $a_{ij} = a_{ji} > 0$ para todo i e j tal que $a_{ij} \neq 0$, (2.26) é satisfeita. Porém, isso não é necessariamente válido para todos digrafos conexos [66].

Um nó de um digrafo é dito balanceado se, e apenas se, o seu grau de entrada (*in-degree*) e seu grau de saída (*out-degree*) forem iguais. Para um nó i , o grau de entrada é dado por $\sum_{j=1}^N a_{ji}$ e o grau de saída é dado por $\sum_{j=1}^N a_{ij}$. Um digrafo é balanceado se, e somente se, todos seus nós forem balanceados [67].

É mostrado em [66] que as três seguintes afirmativas são equivalentes para um digrafo \mathbf{G} com Laplaciana \mathbf{L}_G : 1) \mathbf{G} é balanceado; 2) o vetor unitário é o autovetor esquerdo associado com o autovalor nulo de \mathbf{L}_G , ou seja, $\mathbf{1}^T \mathbf{L}_G = 0$; 3) (2.26) é válido com u_i obtido de (2.23) $\forall x \in R^N$. Essa equivalência não requer que o digrafo \mathbf{G} seja conexo, muito menos fortemente conexo.

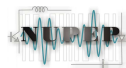
Um teorema deduzido em [66] diz que: se a rede é formada por integradores com dinâmica $\dot{x}_i = u_i$, ligados por um digrafo do tipo fortemente conexo com laplaciana \mathbf{L}_G , o algoritmo (2.23) converge assintoticamente para um consenso do tipo *average-consensus*, atingindo o valor de (2.25) se, e somente se, $\mathbf{1}^T \mathbf{L}_G = 0$.

Juntando os desenvolvimentos, chega-se no teorema final: para uma rede formada por integradores de topologia fixa e representada pelo grafo \mathbf{G} do tipo direcionado, se \mathbf{G} for fortemente conexo é garantida a convergência assintótica de (2.23), atingindo um consenso global. Se, e somente se, além de fortemente conexo, \mathbf{G} for balanceado, o consenso obtido é do tipo *average-consensus* em que todos os estados convergem para um único valor, que é média dos estados iniciais. A seguir será mostrado qual será o valor do consenso atingido por (2.23) caso o digrafo \mathbf{G} seja fortemente conexo, porém não necessariamente balanceado [71].

Considerando uma rede é formada por integradores com dinâmica $\dot{x}_i = u_i$, ligados por um digrafo do tipo fortemente conexo com laplaciana \mathbf{L}_G , se \mathbf{L}_G tiver um autovetor à esquerda não negativo $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)^T$ associado ao autovalor $\lambda = 0$, ou seja, satisfazendo $\boldsymbol{\gamma}^T \mathbf{L}_G = 0$ e se a seguinte condição for satisfeita: $\sum_i^N \gamma_i > 0$, então, depois da convergência do consenso o valor da decisão do grupo é dado por (2.27) [71].

$$\alpha = \frac{\sum_i \gamma_i x_i(0)}{\sum_i \gamma_i} \quad (2.27)$$

Em resumo, seja um sistema (MR) com topologia da rede de dados invariável no tempo, com agentes integradores i ($u_i(t) = \dot{x}_i(t)$) seguindo o algoritmo (2.23). Se todas as linhas de



dados utilizadas forem bidirecionais, o grafo representativo será não dirigido. Nesse caso, a rede de dados pode ser tanto de topologia completa quanto minimamente conexa (baseada em árvore geradora) que o consenso convergirá para o valor invariante de (2.25), bastando que seja conexa (que conforme já mostrado, equivale a dizer que o grafo terá pelo menos uma árvore geradora), ou seja, que não haja alguma UG ou um conjunto delas isoladas das demais no tocante ao sistema de comunicação.

Se todos os ramos da rede de dados não forem necessariamente bidirecionais, o grafo representativo deve ser um digrafo. Nesse caso, uma topologia de rede de dados completa resultará necessariamente em um digrafo conexo, completo, fortemente conexo, minimamente conexo e balanceado, implicando que o consenso também convergirá para o valor de (2.25). Porém, caso seja utilizada rede de dados que não seja completa, a convergência do consenso com digrafo, só foi garantida em [61] e [71], se este for do tipo fortemente conexo, implicando que, respeitando as restrições de direção das linhas de dados, haja algum caminho para se chegar a qualquer nó partindo de qualquer outro nó distinto da rede. A topologia mínima baseada em árvore geradora não garante isso, já que um subgrafo ou digrafo não pode ser fortemente conexo se for do tipo árvore.

Ademais, a convergência para o digrafo fortemente conexo é para o valor de (2.27). Se, e somente se, o digrafo for do tipo balanceado que (2.25) valerá. Isso implica que para cada e toda UG, a quantidade de linhas de dados enviando dados para ela seja igual à quantidade de linhas de dados levando os dados dela [67].

Estudando os trabalhos [61], [71] e [72] no caso do digrafo, conforme já falado, é provada a convergência do consenso para os fortemente conexos e tal convergência será do tipo *average-consensus* se, e somente se, para digrafos balanceados. Porém, a respeito da condição de convergência, não foi afirmado que a condição de serem fortemente conexos era necessária, apenas suficiente. Ou seja, um estudo mais aprofundado sobre o assunto necessita ser feito para verificar se existe alguma possibilidade de um digrafo fracamente conexo atingir a convergência do algoritmo analisado.

Um CS de tensão distribuído baseado em controle cooperativo para sistemas multiagente é proposto em [62]. A topologia da rede de dados pode ser esparsa, sem prejuízos no funcionamento, bastando que seja escolhida alguma que contenha uma árvore geradora do sistema. Os atrasos de comunicação são desconsiderados tanto no tratamento matemático quanto nos resultados. A distribuição de potência reativa não é abordada, e os resultados



mostram apenas o comportamento das tensões, que são reguladas para um mesmo valor, o que prejudicaria fortemente a distribuição de reativos [3], [13].

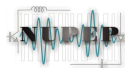
O trabalho [28] propõe: um novo controle primário distribuído, para a amplitude da tensão de saída das UGs, baseado em consenso e no DrC de curva $V \times Q$, visando a correção do erro na distribuição de potência reativa; um CS, também baseado em consenso com dois controladores, um para restauro da frequência e outro para restauro de tensão. A metade do DrC convencional para a frequência (curva $\omega \times P$) é mantida.

O CS de [28] é parcialmente distribuído, por trabalhar em conjunto com um controlador central, que possui dois PIs, para restaurar a frequência e a tensão em um barramento crítico, logo aquele pode não apresentar a confiabilidade necessária em alguns casos e nem atender à necessidade de regulação da tensão em mais de um nó. As duas ações de controle (tensão e frequência) de tal controlador central é enviada pela rede de dados para o controle distribuído em cada UG. O controle primário proposto também utiliza a rede de dados para troca do valor da potência reativa entre as unidades de modo a fazer a distribuição das potências, sem necessitar de controlador central. Atrasos de tempo na rede de dados e influência da eventual utilização de impedância virtual não foram considerados em nenhum momento no trabalho.

A filosofia de priorização das estratégias distribuídas de controle para MRs é reforçada em [22], onde é afirmado que controles centralizados vão contra as filosofias de geração distribuída e autonomia, presentes no conceito de MR.

O trabalho citado acima explora melhor o conceito de DAPI (já comentado no tópico “Distribuição de Potência” do Controle Primário), e apresentado inicialmente em [19] para proposta de um CS de regulação de frequência e tensão totalmente distribuído, que pode operar com redes mínimas. A técnica DAPI é também baseada em teoria de grafos e consenso. Ainda, o trabalho aborda matematicamente a falha na distribuição de potência reativa pelo DrC convencional com curva $V \times Q$ e o conflito entre regulação de tensão e distribuição de potência reativa.

A característica principal do CS de [22] é que possui parâmetros para escolha entre maior regulação de tensão ou melhor distribuição de potência reativa e não exigir a separação temporal em relação ao controle primário. É apresentada uma análise de estabilidade em pequenos sinais para o sistema, com a plotagem da variação dos autovalores, sem exibição da resposta no domínio do tempo para validação com os resultados experimentais. Nos resultados não foram testados parâmetros que causem instabilidade para validação da fidelidade de tal análise na previsão dos limites de estabilidade do sistema. Atrasos de tempo na comunicação e



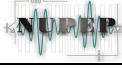
os efeitos de uma eventual utilização de impedâncias virtuais também não foram abordados, nem na análise matemático-teórica, nem nos resultados experimentais.

Em [17] é apresentada uma estratégia totalmente distribuída para CS, visando apenas regulação da frequência. O sistema restaura a frequência ao valor nominal com precisão, aceitando rede de dados mínima sem efeito no resultado em regime permanente. Foi considerado um atraso de até 200 ms e probabilidade de 1% de perda de pacote na rede de dados, sem prejuízo significativo. O trabalho também apresenta e valida, por simulação computacional e resultados experimentais, uma modelagem linearizada em pequenos sinais do sistema, englobando o controle primário, secundário, impedâncias de cargas e de rede e, ainda, a topologia e valor do atraso de tempo da rede de dados.

A referência [3] propõe uma estratégia distribuída baseada em consenso para regulação de tensão e distribuição de reativo, que substitui a curva $V \times Q$ do DrC convencional, ou seja, dentro da filosofia hierárquica, seria um controle que faz papel do primário e do secundário. No desenvolvimento, as resistências das linhas são desprezadas e as indutâncias são consideradas pequenas, fazendo com que as diferenças angulares e de amplitude nas tensões sejam ínfimas. O sistema opera em conjunto com a curva $\omega \times P$ do DrC para frequência, ou seja, apenas o controle primário de tensão é modificado e o restauro de frequência não é abordado.

A teoria envolvida na obtenção e comprovação do funcionamento da estratégia apresentada em [3] é significativamente mais complexa que as outras propostas aqui comentadas. Além disso, não foi feita nenhuma consideração - nem teórica, nem nos resultados experimentais - da influência do atraso de tempo na comunicação e da presença de impedâncias virtuais.

Seguindo a filosofia de algoritmos de consenso e utilização de impedâncias virtuais, é proposto em [16] um controle primário com DrC convencional aliado a um sistema de impedância virtual, baseado no trabalho [51], composto por uma parcela estática e outra adaptativa, controlada por um algoritmo distribuído que tem como objetivo a distribuição precisa de potência reativa entre as unidades. Adicionalmente, um CS para restauração média das tensões também é proposto. A proposta possui uma complexidade considerável, por incluir uma integral e dois PIs, possuindo oito parâmetros de projeto (além dos valores estáticos da impedância virtual): dois coeficientes para cada PI, três pesos para o ajuste da impedância virtual adaptativa e um ganho para a integral do consenso de tensão média. Sua técnica foi baseada em [24], apresentando uma evolução no sentido de não mais necessitar de um controle central.



O controle da distribuição de reativos de [16] funciona da seguinte maneira: o algoritmo de consenso é embarcado em cada UG e calcula uma ação de controle proporcional ao erro entre a potência reativa de saída da unidade em questão e a potência reativa da(s) unidade(s) vizinha(s) que ela comunicar. Pesos relacionados à capacidade nominal de potência são utilizados no cálculo. Tal ação de controle é chamada de erro de distribuição de potência reativa local-vizinho e entra em um compensador PI para ser anulada. A ação de controle do PI comandará a variação dos valores da impedância virtual da UG através de dois pesos ajustáveis, um para a variação da resistência e outro para a variação da indutância.

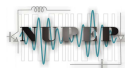
Uma característica do algoritmo proposto em [16] é o de igualar a amplitude de tensão determinada pelo DrC de todas as UGs, considerando que os coeficientes k_{v_n} foram balanceados conforme as capacidades nominais (2.9). As diferenças entre as tensões serão então determinadas apenas pelas quedas nas impedâncias virtuais, que assumirão a distribuição de potência reativa.

O CS de tensão (CST) proposto em [16] visa compensar a variação na tensão causada tanto pelo DrC quanto pela impedância virtual, restaurando a média das tensões de saída de todas UGs para o valor nominal. Esse controle utiliza a técnica de consenso dinâmico [72] com o objetivo de que, ao convergir, todas unidades possuam o valor da referida média das tensões. Desse modo, a variável trocada entre as UGs vizinhas é justamente a estimativa dinâmica da média das tensões, que é calculada em cada UG por (2.28) [16].

$$\bar{E}_n(t) = E_n(t) + C_E \int \sum_{j \in Ns_n} a_{nj} (\bar{E}_j(t) - \bar{E}_n(t)) \quad (2.28)$$

Em que, para cada n -ésima UG, $\bar{E}_n(t)$ é a estimativa da média das tensões, $E_n(t)$ é a tensão de saída, C_E é um ganho que define a convergência para o algoritmo juntamente com a quantidade de termos no somatório, a_{nj} é dado pela matriz de adjacência do grafo de comunicação entre as unidades n e j (valendo 0 ou 1) e $\bar{E}_j(t)$ é a estimativa da média das tensões realizadas pelas unidades vizinhas, também através da mesma expressão.

Na convergência, $\bar{E}_n(t) = \bar{E}_j(t) = \sum_{n=1}^N \frac{E_n}{N}$ em que N é o número de agentes. Ou seja, todos os valores $\bar{E}_n(t)$ convergem para a média das tensões de saída das unidades. Um erro de tensão é calculado em cada UG, fazendo-se a diferença entre $\bar{E}_n(t)$ e a referência, passando em seguida por um PI para ser anulado. A ação de controle do PI é então somada na equação de tensão do DrC de tensão (2.2) de cada UG [16].



No caso de falha de alguma unidade, basta o controle da(s) UG(s) que se comunica(m) com ela detectarem a falta de comunicação e desativar o elemento correspondente na matriz de adjacência que automaticamente o algoritmo irá calcular a média das tensões considerando apenas as unidades restantes [16].

Ainda em [16] a influência dos atrasos na rede de dados foi estudada e, para o sistema analisado, um atraso acima de 100 ms começa a causar oscilações consideráveis. O controle proposto aceita bem topologia mínima de comunicação. É mostrada a análise de convergência baseada em técnicas de sistemas não-lineares (função de *Lyapunov*) para o controle por impedância virtual proposto, porém sem considerar o sistema em sua totalidade (linhas, cargas, controle primário, etc.) e a escolha dos diversos parâmetros também não foi abordada, sendo sugerido que técnicas de controle ótimo e não linear sejam utilizadas. Já o controle de tensão, foi mostrada a convergência por teorias de sistemas lineares e consenso.

Em [16], não foi abordado o estudo de estabilidade para as duas estratégias em conjunto, nem o efeito de algum acoplamento entre elas. Além disso, nos resultados, que foram de simulações computacionais, nos casos em que foram exibidas as tensões de saída reguladas pelo CS, não são mostradas as potências reativas. E também, em nenhum dos resultados que exibem a potência reativa, a tensão de saída foi mostrada. Esse detalhe deixa em falta a validação da proposta de resolução simultânea do problema da distribuição de potência reativa e da regulação da média das tensões.

O trabalho [52] é uma extensão do trabalho [16] visando melhorar a distribuição de potência quando as cargas forem também desbalanceadas e não lineares. A nível de controle primário, é proposto um método baseado em DrC, com duas curvas, que decaem a tensão de saída da UG proporcionalmente à potência distorcida e potência de desequilíbrio. Um protocolo distribuído baseado em consenso ajusta: os valores das impedâncias virtuais na frequência fundamental, para correção da distribuição de potência reativa; os valores das impedâncias virtuais nas frequências harmônicas para correção da distribuição de potência distorcida; e os valores das impedâncias de sequência negativa para correção da distribuição de potência desbalanceada.

O algoritmo de consenso de [52] baseia-se em grafos não dirigidos, logo a sua convergência e valor final é facilmente obtida, bastando que a rede seja conexa. O CS de regulação da média das tensões apresentado em [16] é também utilizando em [52], permanecendo os mesmos comentários. O sistema é mostra ser bem tolerante a falhas no



sistema de comunicação, mas não muito tolerante a atrasos de tempo. Atrasos maiores que 31,4 ms causaram instabilidade.

Da mesma forma que no trabalho [16], quando os resultados incluindo o CST são mostrados em [52], os resultados da distribuição de potência não são exibidos, deixando em falta a validação da proposta de resolução simultânea do problema da distribuição de potência reativa e da regulação da média das tensões. O sistema completo possui muitos parâmetros de projeto, possuindo 20 ganhos para serem ajustados no controle de cada UG, além dos valores das parcelas estáticas das impedâncias virtuais, que são cinco.

2.4.2 Controle de Tensão Homogêneo

Será aqui denominado de homogêneo aquele tipo de CST que regula de forma precisa todas as tensões de saída das UGs para uma mesma referência. Conforme já discutido, esse controle tem aplicabilidade muito limitada. Pois, a depender da MR, pode levar a desvios grandes de distribuição de potência reativa (sistema predominantemente indutivo) ou ativa (sistema predominantemente resistivo). O CST homogêneo pode ser útil para MRs em que a tensão necessita ser regulada com precisão, as UGs forem de capacidades iguais (ou muito próximas) e a topologia elétrica da rede for simétrica, por exemplo: topologia em estrela, com barramento único de carga e com linhas de impedâncias idênticas ligando todas UGs ao barramento de carga.

Um controle desse tipo será apresentado a seguir com a única finalidade de ser utilizado como critério de comparação quando forem apresentados os resultados do controle proposto nos capítulos seguintes. Ele servirá para quantificar quais seriam as consequências para a MR considerada nos resultados se fosse utilizado um CS desse tipo.

O controle é representado por (2.29). Sem comunicação, este regula precisamente a amplitude da tensão de saída (E_n) de todas as unidades para uma mesma referência E_{refh} , inclusive compensando automaticamente a queda na impedância virtual, caso utilizada. Ele se baseia no compensador PI, atuando no valor de Q_{refn} da unidade n para zerar o desvio de tensão. O k_{in} é o ganho integral e o k_{prp_n} é o ganho proporcional. Ele é totalmente distribuído e deve ser embarcado em todas as unidades.

$$Q_{refn} = k_{in} \int (E_{refh} - E_n) dt + k_{prp_n} (E_{refh} - E_n) \quad (2.29)$$



Naturalmente, é um péssimo exemplo de CS, não somente pela desvantagem de ser homogêneo, mas também por não utilizar comunicação, nem algum modelo do sistema e nem alguma variável global, não considerando o paralelismo das unidades. Sua operação é totalmente descoordenada e pouco consensual. Isso poderá causar instabilidades, comportamento dinâmico pobre e possibilidade de sobrecarga temporária ou permanente de alguma unidade. O controle de [62] também é homogêneo e possui desempenho superior. Todavia, (2.29) é simples e se presta suficientemente bem para o papel aqui necessário, bastando ajustar os ganhos para uma atuação lenta, já que apenas seus resultados de regime permanente serão utilizados.

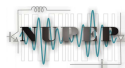
2.5 CONTROLE TERCIÁRIO

O controle terciário normalmente é aplicado apenas no modo conectado à rede – ou conectado a outra(s) MR(s) - e controla o fluxo de potência entre as áreas, focando em aspectos técnico-econômicos e, adicionalmente, poderá realizar ações de correção da qualidade da energia no ponto de acoplamento comum e estabilização da rede [5], [29]. O controle terciário está fora do escopo deste trabalho, sendo considerado inexistente na MR analisada.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A primeira parte do capítulo foi uma introdução geral do controle de MRs, apresentando suas atribuições, dificuldades e formas atuais de abordagem do problema. A estrutura hierárquica foi apresentada e as principais características de cada hierarquia foram comentadas. A segunda parte apresentou o controle interno, comentando seus critérios de desempenho e técnicas atualmente consolidadas. Pôde ser observado que a abordagem por duas malhas, sendo a interna de corrente e a externa de tensão com utilização do Proporcional-Ressonante como compensador é a técnica mais consolidada atualmente, mas ainda existem nichos a serem explorados na temática, principalmente a respeito de projeto, implementação digital e técnicas adicionais para melhora da rejeição aos distúrbios.

Na terceira parte do capítulo foram descritas as atribuições do controle primário dentro do modelo hierárquico de controle de uma MR, fazendo um apanhado das principais técnicas sem comunicação propostas atualmente, observando suas vantagens e limitações. Foram também discutidos os problemas com a distribuição de potência, presente na maioria das abordagens e algumas soluções propostas para tal problema. Ressalta-se que a técnica DrC convencional possui a importante vantagem de ausência da necessidade de troca de informações



entre as unidades, sobre o preço de uma distribuição aproximada da potência ativa ou reativa (a depender da variante utilizada) e desvios nas tensões e frequência.

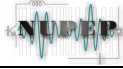
Ainda que, conforme mostrado, existam outras propostas de controle primário com melhores resultados, no desenvolvimento do presente trabalho o controle primário utilizado é o DrC convencional (com curvas de decaimento $\omega \times P$ e $V \times Q$) com linhas e impedâncias virtuais predominantemente indutivas. A principal justificativa é a simplicidade e o domínio do método, pois o trabalho ainda se encontra em uma etapa inicial, onde o foco é o estudo do CS. Compreendido, simulado, experimentado e modelado o CS que será apresentado neste trabalho, a sua utilização com outros controles primários diferentes e mais complexos poderá ser estudada em trabalhos futuros.

Na quarta parte, o CS é detalhado e diversas técnicas são apresentadas e seus principais pontos fortes e fracos são mostrados. Fica claro que a teoria em torno do CS é altamente interdisciplinar, tendo uma tendência atual forte da utilização dos conceitos de: grafos dirigidos e não dirigidos, álgebra linear, controle multiagente consensual, controle linear e controle não linear. Foram também apresentados os principais pontos da teoria dos grafos, no que diz respeito à aplicação em controle de MRs e apresentados os princípios da filosofia de controle por consenso.

O controle terciário foi apenas brevemente discutido na última parte. Ele está mais afastado do escopo do trabalho do que os controles interno e primário.

Conforme visto, o controle do tipo hierárquico foi bem aceito pela comunidade científica, havendo inúmeros trabalhos que o seguem, mas existem algumas referências que abordam o sistema de maneira totalmente diferente ou com pequenas adaptações. Por exemplo: alguns trabalhos propuseram controles que, se fossem analisados pela “ótica” do controle hierárquico, fazem a tarefa do primário e do secundário simultaneamente; outros, propuseram controles primários que sob algumas condições não requerem CS; e ainda, há propostas de CS que também realizam melhorias na distribuição de potência.

Como as MRs constituem um tema muito heterogêneo, é natural que existam diversas técnicas de controle diferentes, cada qual com suas vantagens e desvantagens. Deve-se ter cuidado ao compará-las, pois o nicho de aplicabilidade de uma pode ser diferente da outra. Uma técnica ruim para determinada MR pode ser adequada para outra. Todavia, observa-se uma tendência forte de utilização de técnicas as mais distribuídas possível e com menor necessidade de comunicação de dados, por possuírem aplicabilidade mais abrangente em relação àquelas dotadas de algum controle centralizado ou que exijam mais da comunicação



3. O CONTROLE SECUNDÁRIO PROPOSTO

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o CS proposto, que é baseado em consenso e visa regulação de frequência e regulação de tensão pela média para restauro da qualidade da energia dos barramentos da MR em regime permanente. O controle de frequência utilizado não é exatamente novo, pois a técnica foi apresentada em [17]. Porém, foi muito pouco explorado desde então. Já a técnica da regulação de tensão, dentre as mais de 100 referências que foram lidas sobre o assunto durante a pesquisa até o momento da escrita deste texto, não foi vista em nenhum outro trabalho, muito menos a utilização concomitante de ambas (com exceção das publicações deste trabalho).

Ademais, o foco em [17] foi a modelagem matemática do sistema considerando rede de dados com atraso, não foram explorados todos os aspectos do desempenho do controle secundário de frequência (CSF) que serão aqui discutidos e o comportamento dinâmico das potências não foram mostradas.

O capítulo é relativamente sucinto. O comportamento do sistema será melhor verificado nos capítulos dos resultados. O sistema completo da MR com controle primário e secundário não é muito simples de ser analisado matematicamente e é pouco intuitivo nos contatos iniciais, por se tratar de um sistema multiagente, multivariável e não linear. Por isso se optou pela utilização de simulações para melhor compreensão do funcionamento em detrimento de análise matemática aprofundada, que poderá ser melhor abordada em trabalhos futuros.

Inicialmente será suposto que todas as UGs da MR serão de mesma capacidade de potência, sendo desejado que despachem a mesma potência ativa e reativa. No item 3.6 essa premissa será abandonada e o CS proposto será mostrado para a condição geral.

Para facilitação da leitura do capítulo, as equações do controle primário via DrC convencional - (2.1) e (2.2) - serão aqui reescritas:

$$\omega_n = \omega_0 - k_{p_n}(P_n - P_{ref_n}) \quad (3.1)$$

$$E_{dr_n} = E_0 - k_{v_n}(Q_n - Q_{ref_n}) \quad (3.2)$$

Para cada n-ésima UG, ω_n é a sua frequência angular, E_{dr_n} é a amplitude da tensão de saída, ω_0 e E_0 são a frequência e a amplitude de equilíbrio, k_{p_n} e k_{v_n} são os coeficientes de inclinação dos droop de frequência e tensão, respectivamente. P_n e Q_n são as potências ativa e



reativa de saída e P_{ref_n} e Q_{ref_n} são as potências ativa e reativa de referência que possuem valor inicial nulo e serão atualizadas pelo CS, conforme será mostrado ao longo do capítulo. O trabalho supõe que E_0 será constante o terá o mesmo valor para todas as UGs. O mesmo vale para ω_0 .

3.2 RESTAURADOR DA FREQUÊNCIA

O controle atua no valor de P_{ref_n} do controle primário da sua unidade, visando atingir o consenso de que as potências ativas de todas as unidades sejam igualadas às suas potências de referência e a frequência seja restaurada para ω_0 através de (3.1). Isso é obtido a partir da lei de controle aplicada em cada UG, adaptada de [17] e apresentada em (3.3).

$$P_{ref_n} = -k_{pr_n} \int \sum_{\substack{j \in Ns_n \\ j \neq n}} (P_{ref_n} - P_j) dt \quad (3.3)$$

Este requer que cada unidade n receba o valor da potência ativa (P_j) de pelo menos uma outra unidade j e que envie o valor de sua potência ativa (P_n) para pelos menos alguma outra. Baseado na teoria de grafos, Ns_n é o vetor dos vértices que são adjacentes à unidade n , ou seja, é o conjunto das unidades dotadas com capacidade de envio de dados para a unidade n . Entre outras palavras, os valores assumidos por j no somatório (quais e quantos) dependerão da topologia da rede de dados. A restrição $j \neq n$ indica que não há necessidade da unidade considerar sua própria potência ativa, entre outras palavras não haverá laços no grafo correspondente.

O controle restaura com exatidão a frequência da MR para o valor nominal sem prejuízo na distribuição de potência ativa ou reativa, conforme será visto nos resultados. É totalmente distribuído, possui apenas um parâmetro de ajuste (k_{pr}) e sua operação foi verificada com atrasos de até 200 ms na comunicação, probabilidade de 1% de perda de pacote e rede de dados com taxa de amostragem de 50 Hz em [17], mostrando excelente margem de estabilidade.

Diferentemente do CS para tensão, o controle secundário para frequência possui dois fatores que simplificam sua operação e análise, o primeiro é que a frequência em regime permanente é uma variável global. O segundo é uma consequência do primeiro e da utilização do DrC convencional, que é o fato de que as potências ativas são distribuídas com precisão.



Em regime permanente, o argumento da integral em (3.3) deve zerar, para que P_{ref_n} se mantenha finito. Logo:

$$\sum_{\substack{j \in Ns_n \\ j \neq n}} (P_{ref_n} - P_j) = 0. \quad (3.4)$$

Considerando um sistema com três UGs idênticas e comunicação completa para o controle secundário, de modo que para: $n = 1 \rightarrow j = 2$ e 3 ; $n = 2 \rightarrow j = 1$ e 3 e $n = 3 \rightarrow j = 1$ e 2 . De (3.4), fica:

$$P_{ref_1} = (P_2 + P_3)/2, \quad P_{ref_2} = (P_1 + P_3)/2 \text{ e } P_{ref_3} = (P_1 + P_2)/2. \quad (3.5)$$

Considerando $k_{p1} = k_{p2} = k_{p3} = k_p$ e substituindo (3.5) em (3.1), para as três UGs, chega-se em (3.6).

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega_0 - k_p \left(\frac{2P_1 - P_2 - P_3}{2} \right) \\ \omega_2 &= \omega_0 - k_p \left(\frac{2P_2 - P_1 - P_3}{2} \right) \\ \omega_3 &= \omega_0 - k_p \left(\frac{2P_3 - P_2 - P_1}{2} \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Como em regime permanente as frequências devem ser iguais, chega-se em (3.7).

$$\left(\frac{2P_1 - P_2 - P_3}{2} \right) = \left(\frac{2P_2 - P_1 - P_3}{2} \right) = \left(\frac{2P_3 - P_2 - P_1}{2} \right) \quad (3.7)$$

Dos primeiros dois elementos de (3.7), conclui-se que $P_1 = P_2$ e do segundo e terceiro elemento: $P_2 = P_3$. Logo, a primeira conclusão é de que a correta distribuição de potência ativa foi mantida. Retornando esse resultado para (3.6), o termo nos parênteses é zerado, implicando que $\omega_n = \omega_0$. Ou seja, a frequência foi devidamente restaurada. A suposição $k_{p1} = k_{p2} = k_{p3} = k_p$ foi feita apenas para fins de simplificação matemática. Ela é muito razoável, pois é considerado que as UG são de mesma capacidade e normalmente os coeficientes são iguais nesse caso. Porém, conforme será visto nos capítulos subsequentes, os valores de k_{pn} não terão mais efeito em regime permanente no sistema com o controle secundário proposto e essa consideração, na prática, é suficiente mas não necessária.



Outra análise interessante de ser feita é a suposição de que a comunicação entre algum par de unidades seja removida, tornando a rede de dados mínima, com topologia de árvore geradora. Por exemplo, será considerado que a UG 1 não trocará dados com a UG 3. As linhas existentes continuam bidirecionais. Nesse caso, para $n = 1 \rightarrow j = 2$; $n = 2 \rightarrow j = 1$ e 3 e $n = 3 \rightarrow j = 2$. Inserindo essa situação em (3.4), chega-se em (3.8).

$$P_{ref_1} = P_2, \quad P_{ref_2} = (P_1 + P_3)/2 \quad \text{e} \quad P_{ref_3} = P_2 \quad (3.8)$$

Com os dados de (3.8) em (3.1), se obtêm (3.9).

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega_0 - k_p(P_1 - P_2) \\ \omega_2 &= \omega_0 - k_p\left(\frac{2P_2 - P_1 - P_3}{2}\right) \\ \omega_3 &= \omega_0 - k_p(P_3 - P_2) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Igualando as frequências, chega-se em (3.10).

$$(P_1 - P_2) = \left(\frac{2P_2 - P_1 - P_3}{2}\right) = (P_3 - P_2) \quad (3.10)$$

Do primeiro e último elementos de (3.10), conclui-se que $P_1 = P_3$ e do segundo e terceiro elemento, $P_2 = P_3$. Logo, a correta distribuição de potência ativa também foi mantida. Retornando esse resultado para (3.9), os termos nos parênteses são zerados, implicando novamente que $\omega_n = \omega_0$.

3.3 RESTAURADOR DE TENSÃO PROPOSTO

O CST foi baseado em (3.3) e é apresentado em (3.11). De modo análogo, esse requer que cada unidade n receba o valor da potência reativa (Q_j) de pelo menos uma outra unidade j e que envie o valor de sua potência reativa (Q_n) para pelos menos uma outra. O controle calcula o valor de Q_{ref_n} para o controle primário da sua unidade. O único parâmetro de projeto é k_{qr_n} , que controla a velocidade de convergência.

$$Q_{ref_n} = -k_{qr_n} \int \sum_{\substack{j \in Ns_n \\ j \neq n}} (Q_{ref_n} - Q_j) dt \quad (3.11)$$



O controle atua no valor de Q_{ref_n} do controle primário da sua unidade ao invés da tensão, deslocando a curva do *droop* $V \times Q$, visando restauro das tensões de saída das UGs, trazendo a média delas para a referência E_0 sem remover o desvio padrão causado por (3.2), que é necessário para a distribuição de potência reativa. De forma similar ao CSF, \mathbf{Ns}_n é o vetor das unidades que são adjacentes à unidade n , ou seja, seriam as unidades dotadas com capacidade de envio de dados para a unidade n . A restrição $j \neq n$ também é feita, indicando que não há necessidade da unidade considerar sua própria potência reativa.

Será confirmado nos resultados experimentais que (3.11) não prejudica a distribuição de potência reativa, e mais ainda, por restaurar o valor da tensão, permite que valores maiores de k_v sejam utilizados, o que melhora a distribuição de potência reativa e elimina a relação de compromisso entre a regulação de tensão e distribuição de potência reativa existente no DrC convencional.

A análise matemática em regime permanente para o restaurador de tensão é mais complexa que a do restaurador de frequência, pois não há nenhuma variável global. O tratamento completo teria que modelar todo o sistema em regime permanente, incluindo o modelo elétrico da MR e obter as soluções por método iterativo, similar ao que é feito na análise de fluxo de carga para sistemas elétricos. Porém, algumas observações mais simples podem ser feitas prontamente.

Supondo novamente uma MR com três UGs de mesma capacidade (para $n = 1 \rightarrow j = 2$ e 3; $n = 2 \rightarrow j = 1$ e 3 e $n = 3 \rightarrow j = 1$ e 2) e tomando as equações (3.2) para cada unidade e fazendo a média aritmética das tensões, chega-se na expressão (3.12).

$$E_{med} = E_0 + \frac{1}{3} [k_{v1} (Q_{ref_1} - Q_1) + k_{v2} (Q_{ref_2} - Q_2) + k_{v3} (Q_{ref_3} - Q_3)] \quad (3.12)$$

Desse modo, para que a média fique exatamente igual a E_0 , é necessário zerar todo o termo entre colchetes de (3.12). De modo similar ao feito para CSF, para três UGs e uma rede de dados completa, em regime permanente tem-se o resultado de (3.13).

$$Q_{ref_1} = (Q_2 + Q_3)/2, \quad Q_{ref_2} = (Q_1 + Q_3)/2 \text{ e } Q_{ref_3} = (Q_1 + Q_2)/2 \quad (3.13)$$

Substituindo (3.13) em (3.12) chega-se em (3.14).



$$E_{med} = E_0 + \frac{1}{6} [k_{v1}(Q_2 + Q_3 - 2Q_1) + k_{v2}(Q_1 + Q_3 - 2Q_2) + k_{v3}(Q_1 + Q_2 - 2Q_3)] \quad (3.14)$$

De (3.14) pode-se verificar facilmente duas condições que são suficientes (e não precisam ocorrer de forma simultânea) para que a tensão média fique exatamente igual à referência: 1ª) Se os coeficientes k_{vn} forem escolhidos todos iguais; 2ª) Se as potências reativas das unidades, por algum motivo, forem iguais.

Novamente, se a comunicação entre algum par de unidades for removida, tornando a rede de dados mínima - por exemplo, se a UG 1 não trocar dados com a UG 3 - e continuando bidirecionais as linhas existentes (para $n = 1 \rightarrow j = 2$; $n = 2 \rightarrow j = 1$ e 3 e $n = 3 \rightarrow j = 2$), de (3.11), chega-se em (3.15).

$$Q_{ref1} = Q_2, \quad Q_{ref2} = (Q_1 + Q_3)/2 \text{ e } Q_{ref3} = Q_2 \quad (3.15)$$

Substituindo (3.15) em (3.12), chega-se em (3.16).

$$E_{med} = E_0 + \frac{1}{3} \left[k_{v1}(Q_2 - Q_1) + \frac{k_{v2}}{2}(Q_1 + Q_3 - 2Q_2) + k_{v3}(Q_2 - Q_3) \right] \quad (3.16)$$

Testando a condição de $k_{v1} = k_{v2} = k_{v3} = k_v$, (3.17) é obtida.

$$E_{med} = E_0 + \frac{k_v}{6} (2Q_2 - Q_1 - Q_3) \quad (3.17)$$

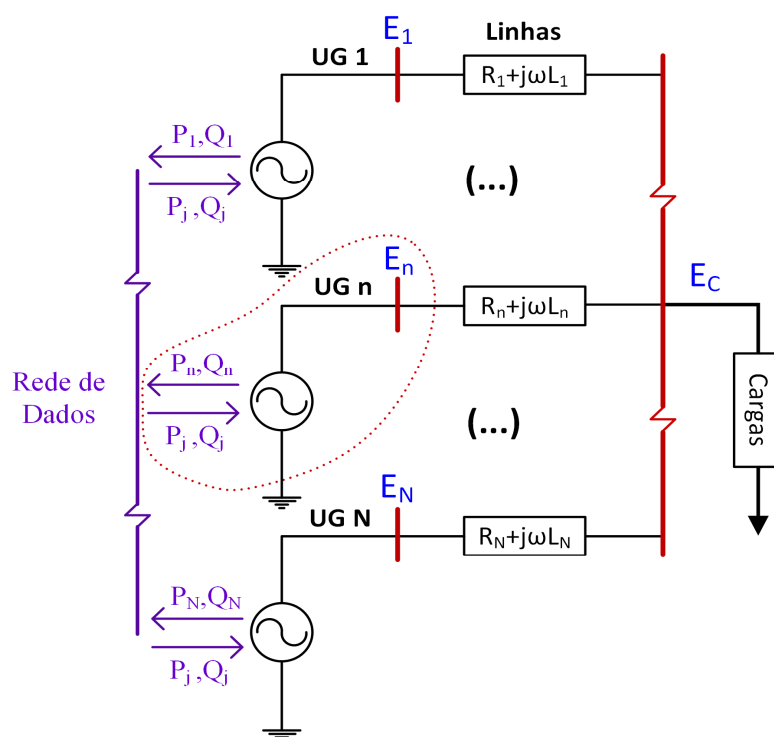
Logo, com a rede de dados mínima, a condição de $k_{v1} = k_{vn} = \dots = k_v$ não é suficiente para que $E_{med} = E_0$. Quanto maior o valor de k_v e mais diferentes forem as potências reativas, mais a tensão irá desviar da média. Isso implica que a topologia da rede dados afeta o valor em regime permanente, diferentemente do que acontece com o CSF. Todavia, será visto nas simulações computacionais que esse desvio é pequeno, principalmente por ser função de $\frac{k_v}{6}$, já que, tipicamente, $k_v < 0,005$ devido à (2.13).

A condição $Q_1 = Q_n = \dots = Q$ continua sendo suficiente para $E_{med} = E_0$, podendo ser verificada por (3.18).

$$E_{med} = E_0 + \frac{1}{3} \left[k_{v1}(Q - Q) + \frac{k_{v2}}{2}(Q + Q - 2Q) + k_{v3}(Q - Q) \right] \quad (3.18)$$

Na Figura 3.1 é mostrado um esquema genérico para a MR estudada neste trabalho. Ela seria formada por N unidades trifásicas com suas respectivas linhas de transmissão. As cargas são consideradas lineares (ou chaveadas com baixa distorção harmônica na corrente, podendo considerar comportamento linear) eletricamente centralizadas em um único barramento. Cada unidade enviará sua potência ativa e reativa para a rede de dados e receberá as potências ativa e reativa de outra(s) unidade(s) onde “quais e quantas” dependerão da topologia da rede de dados.

Figura 3.1 - Esquema da MR



Fonte: o autor (2018).

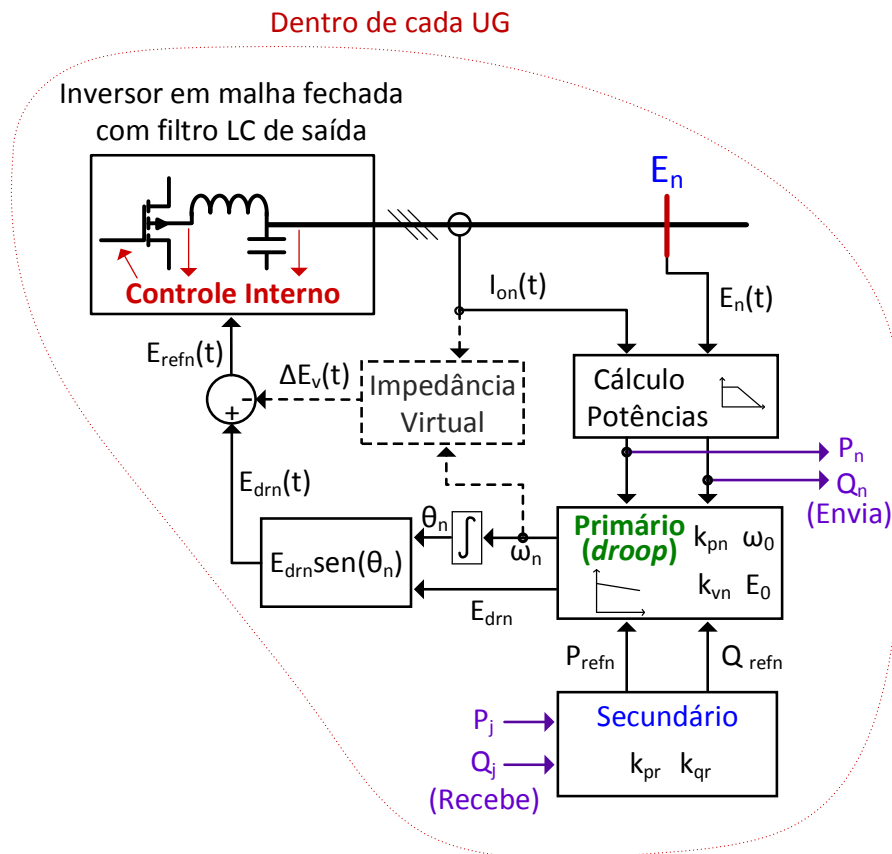
Na Figura 3.2 é mostrado o diagrama simplificado do que está embarcado dentro de cada UG. Observar os controles interno, primário e secundário e suas variáveis e conexão. O bloco de impedância virtual está tracejado por ser utilizado apenas quando necessário. É importante ressaltar que, em caso de falha crítica na rede de dados ou no CS, a MR poderá continuar operando, com valores de Q_{ref_n} e P_{ref_n} fixos, o que apenas fará com que ela trabalhe com frequência e tensões fora dos valores ideais.

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REDE DE DADOS

Como as variáveis comunicadas pelo CS são as potências ativa e reativa, uma baixa largura de banda é necessária, por serem variáveis lentas (dinâmica limitada em alguns Hertz) devido aos filtros (2.3) e (2.4). Conforme será melhor explorado nos resultados, o sistema mostrou tolerar bem atrasos de 100 ms e taxa de amostragem de 10 Hz para a rede de dados.

A rede de dados necessita apenas ser do tipo conexa, não necessitando ser completa. Conforme será explorado, uma topologia mínima piora um pouco a dinâmica do controle, mas, em regime permanente, não afeta os resultados CSF e afeta ligeiramente os resultados do CST.

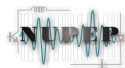
Figura 3.2 - Esquema Interno de Cada UG



Fonte: o autor (2018).

Neste trabalho será considerado que as conexões existentes na rede de dados serão sempre bidirecionais, permitindo que a rede seja retratada como um grafo não dirigido. Não seria incorreto tratá-la como digrafo, mas seria uma sofisticação desnecessária, pois nesse caso teria as mesmas propriedades de um grafo não dirigido.

Uma possibilidade que está sendo estudada no momento, relativa ao sistema de comunicação para futura implementação da MR com o CS deste trabalho é o CAN (*Controller*



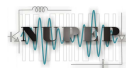
Area Network). O CAN tem sua utilização muito bem consolidada na indústria e nos automóveis modernos, para comunicação entre os diversos sensores, controladores e atuadores locais, devido a sua excelente robustez e flexibilidade. Diversas normas e documentos de especificações foram produzidos sobre o CAN desde a sua apresentação inicial pela Bosch em 1986, em uma conferência da *Society of Automotive Engineers* (SAE) em Detroit, Michigan.

Uma das normas mais utilizadas sobre a camada física é a ISO 11898-2 [73], com primeira versão em 1993. Sua concepção considera aplicação em automóveis terrestres, todavia costuma ser utilizada (totalmente ou em grande parte) em demais sistemas. Ela recomenda que o meio físico seja um barramento único formado por cabo de duas vias, de par trançado e que tenha impedância característica diferencial de $120\ \Omega$, preferencialmente. O barramento deve ser terminado em ambas extremidades com resistores de resistência igual a sua impedância característica para redução de reflexões de ondas. Pode ou não ser blindado, a depender das condições do ambiente. Vias adicionais para interligação de terra e alimentação remota dos dispositivos podem ser utilizadas.

Os nós são conectados ao barramento através de derivações não terminadas, que devem ter comprimento menor que 30 cm. Para comunicação em 1 Mbps, o valor nominal de comprimento máximo do barramento é de 40 metros. Para velocidades de 250 kbps, o barramento pode, tipicamente, chegar a cerca de 200 metros. A norma [73] também recomenda que a quantidade de nós seja limitada a 30. Naturalmente esses valores variam conforme qualidade dos cabos e conexões utilizadas, interferências eletromagnéticas do ambiente, utilização de repetidores, taxa de erros aceitável para a aplicação, utilização de fibra óptica, etc.

As principais características do sistema são:

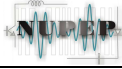
- Comunicação multimestre: todos os nós têm a possibilidade de iniciar a comunicação caso o barramento esteja em repouso;
- Resolução de conflitos (acesso simultâneo do barramento) não destrutiva: baseada em arbitragem via identificador da mensagem, e não por características do nó de origem/destino;
- Otimizada para transmissão frequente (especificada até 1Mbps) de dados pequenos (até 8 bytes) em ambiente severo e sem dependência de algum nó para gestão da rede;
- Comunicação *broadcast*: todos os nós recebem “simultaneamente” a mensagem transmitida e possuem filtro de entrada baseado no conteúdo (identificador), e não por endereçamento;



- Contanto que haja um dicionário de dados para a rede, a inclusão ou retirada de nós não interfere na comunicação entre os existentes e um nó não precisa conhecer características dos demais;
- Possibilidade de requisição de transmissão de alguma mensagem específica, a qualquer momento (*Remote Data Request*);
- Detecção e sinalização automática de erros pela camada de Enlace de Dados;
- Retransmissão automática de mensagens corrompidas ou que perderam arbitragem pela camada de Enlace de Dados;
- Distinção entre erros eventuais ou falhas permanentes, com desligamento automático para prevenção de pane total na rede por algum nó defeituoso;
- Sinalização automática de erros com alcance global: todos os nós recebem a informação que houve algum erro;
- Consistência de dados entre todos os nós: a transmissão da mensagem só é considerada bem-sucedida se todos os nós a recebeu sem erros, mesmo que o conteúdo dela não seja de interesse de todos.

Uma desvantagem da rede CAN para MRs é a limitação de distância, sendo adequadas para sistemas em que as UGs estão no mesmo edifício ou na vizinhança próxima. Caso a distância seja maior que 100 metros, uma alternativa é a utilização de *gateways* para interface com outros protocolos de maior alcance. Por exemplo, as UGs que estão em determinado prédio poderão comunicar, utilizando o sistema CAN, entre si e com um *gateway* que fará a interface com algum protocolo sem fio ou por fibra óptica, por exemplo, que integrará o sistema com algum prédio mais distante, que por sua vez também terá um *gateway* que comunica com as suas UGs locais utilizando o sistema CAN.

O fato do sistema ser do tipo *broadcast* tem diversas vantagens, como, por exemplo, maior flexibilidade, modularidade, robustez e confiabilidade acerca da integridade da informação. Porém, isso também limita a quantidade de dispositivos e mensagens devido à taxa alta de ocupação do barramento, pois mesmo que se escolha uma topologia de rede mínima, todas as UGs terão que ser conectadas a um único barramento, e nele fluirão mensagens enviadas por todos os nós, mesmo que cada UG seja programada para tratar mensagens apenas de alguma outra específica, para redução do peso computacional de seu CS. Por exemplo, pode-se construir um dicionário de dados em que o identificador de cada mensagem não somente identifique se ela é potência ativa ou reativa, mas também de qual unidade ela diz respeito e os



filtros de entrada de cada unidade podem ser configurados para aceitar identificadores específicos.

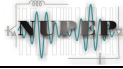
Uma vantagem importante do CAN é que muitos controladores e processadores digitais de sinais de arquitetura 32-bit adequados para aplicação em controle digital de conversores estáticos, como por exemplo as famílias TMS320F2833x, TMS320F2823x, TMS320F2807x e TMS320F2837x da *Texas Instruments* e diversos microcontroladores da família *Cortex M4* da *Microchip*, possuem internamente um ou mais controladores CAN, diferentemente de outros protocolos que são mais raros em tais integrados.

Os controladores CAN só não são mais presentes nos circuitos integrados do que os controladores I²C, SPI, SCI, USB, UART e USART. Todavia, esses não são tão adequados para MRs, devido à pouca robustez frente a ambientes eletromagneticamente agressivos e/ou baixo limite de distância (como o I²C), sendo mais adequados para comunicação entre módulos internos de um mesmo equipamento ou sala. Via de regra, os controladores CAN incorporam toda a Camada de Enlace de Dados e a subcamada de Sinalização da Camada Física. Realizando as suas atribuições de forma automática e independente do processador. Desse modo, reduz se consideravelmente o gasto computacional do sistema de comunicação e o trabalho do programador, que deve cuidar apenas da Camada de Aplicação e outras que forem necessárias.

Como foi discutido no tópico anterior, o CST proposto não apresenta imunidade total com relação à topologia da rede de dados, apresentando resultados precisos apenas para topologia completa, caso as potências reativas entregues por todas as unidades não sejam idênticas. Como a rede CAN trabalha com barramento único (que obrigatoriamente percorre todos os nós), comunicação global e sistema multimestre, ela é muito adequada para formação de redes completas sem acréscimo de custo, diferentemente de outros protocolos que trabalham com comunicação “ponto a ponto”, como a USB e RS-232, por exemplo.

Utilizando a teoria dos grafos, o CS representado por (3.3) e (3.11) aplicado a um sistema com três UGs e rede de dados completa poderão ser reescritos como (3.19) e (3.20), em que $[D_{g_P}]$ é a matriz de grau dos vértices para o sistema de comunicação da potência ativa, $[D_{g_Q}]$ é a matriz de grau dos vértices para o sistema de comunicação da potência reativa, $[A_{g_P}]$ e $[A_{g_Q}]$ são as matrizes de adjacência dos vértices para o sistema de comunicação da potência ativa e reativa, respectivamente.

Para melhor generalização, os sistemas de comunicação de potência ativa e reativa são tratados de forma independente, como dois grafos distintos, contendo apenas os mesmos



vértices. Naturalmente, na maioria das aplicações práticas os dois grafos serão idênticos, considerando que os mesmos canais de comunicação serão utilizados para as duas variáveis.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} P_{ref1} \\ P_{ref2} \\ P_{ref3} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{pr1} & 0 & 0 \\ 0 & k_{pr2} & 0 \\ 0 & 0 & k_{pr3} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} D_{g_P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref1} \\ P_{ref2} \\ P_{ref3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{g_P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \right) \quad (3.19)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Q_{ref1} \\ Q_{ref2} \\ Q_{ref3} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{qr1} & 0 & 0 \\ 0 & k_{qr2} & 0 \\ 0 & 0 & k_{qr3} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} D_{g_Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{ref1} \\ Q_{ref2} \\ Q_{ref3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{g_Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \right) \quad (3.20)$$

Cada vértice é entendido como uma UG do sistema, e os vértices adjacentes são aqueles em que há troca de dados entre si. As definições das matrizes de grau e adjacência foram mostradas no capítulo anterior, no tópico dos controles secundários baseados em consenso. Para o sistema de (3.19) e (3.20), elas são mostradas em (3.21) e (3.22).

$$\begin{bmatrix} D_{g_Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{g_P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\begin{bmatrix} A_{g_Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{g_P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Já no caso de uma rede mínima, por exemplo, interrompendo a comunicação entre as UGs 1 e 3, as matrizes ficam:

$$\begin{bmatrix} D_{g_Q} \end{bmatrix}_M = \begin{bmatrix} D_{g_P} \end{bmatrix}_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} A_{g_Q} \end{bmatrix}_M = \begin{bmatrix} A_{g_P} \end{bmatrix}_M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.24)$$

Para um sistema genérico de N unidades, o CS pode ser reescrito para (3.25) e (3.26). Maiores aspectos sobre a rede de dados serão comentados nos capítulos de resultados.

$$\dot{[P_{ref}]_{Nx1}} = -[k_{pr}]_{NxN} \begin{bmatrix} D_{g_P} \end{bmatrix}_{NxN} [P_{ref}]_{Nx1} + [k_{pr}]_{NxN} \begin{bmatrix} A_{g_P} \end{bmatrix}_{NxN} [P]_{Nx1} \quad (3.25)$$

$$\dot{[Q_{ref}]_{Nx1}} = -[k_{qr}]_{NxN} \begin{bmatrix} D_{g_Q} \end{bmatrix}_{NxN} [Q_{ref}]_{Nx1} + [k_{qr}]_{NxN} \begin{bmatrix} A_{g_Q} \end{bmatrix}_{NxN} [Q]_{Nx1} \quad (3.26)$$



Em que:

$$[k_{pr}]_{NxN} = \text{diag}(k_{pr_1}, \dots, k_{pr_n}, \dots, k_{pr_N}), \quad (3.27)$$

$$[k_{qr}]_{NxN} = \text{diag}(k_{qr_1}, \dots, k_{qr_n}, \dots, k_{qr_N}), \quad (3.28)$$

$$[P_{ref}]_{Nx1} = [P_{ref_1}, \dots, P_{ref_n}, \dots, P_{ref_N}]^T, \quad (3.29)$$

$$[Q_{ref}]_{Nx1} = [Q_{ref_1}, \dots, Q_{ref_n}, \dots, Q_{ref_N}]^T, \quad (3.30)$$

$$[P]_{Nx1} = [P_1, \dots, P_n, \dots, P_N]^T, \quad (3.31)$$

$$[Q]_{Nx1} = [Q_1, \dots, Q_n, \dots, Q_N]^T. \quad (3.32)$$

3.5 UTILIZAÇÃO COM IMPEDÂNCIAS VIRTUAIS

A estratégia de CST apresentada visa regular a média das tensões compensando a queda de tensão causada pelo DrC. Se forem utilizadas impedâncias virtuais de grandes valores no sistema, a queda de tensão nelas poderá ser um problema e não será compensada diretamente pelo CS. Uma alternativa para evitar esse problema é elevar o valor da referência E_0 . Porém, há um limite para tal, para que a tensão sob baixo carregamento não ultrapasse os limites aceitáveis.

Caso o motivo da utilização da impedância virtual seja principalmente para aumentar o amortecimento e desacoplamento dinâmico entre P e Q, e não para correção da distribuição de reativos, a estratégia apresentada a seguir poderá ser utilizada para eliminar em parte ou em totalidade a queda de tensão em regime permanente na impedância virtual.

A amplitude da queda de tensão em uma impedância virtual do tipo RL pode ser aproximada por (3.33) [12]. Em que P e Q são as potências ativa e reativa de saída da UG e E_0 é a tensão nominal da MR à vazio, ou a tensão “antes” da impedância virtual. Desse modo, é proposto que, para compensação da queda de tensão em determinada UG n , o valor constante E_0 em (3.2) seja substituído pelo valor dinâmico E_{cn} , dado por (3.34).

$$\Delta e_v = \frac{R_v P + \omega L_v Q}{E_0} \quad (3.33)$$



$$E_{c_n} = E_0 + p_v \left(\frac{R_{v_n} P_n + \omega_n L_{v_n} Q_n}{E_0} \right) \quad (3.34)$$

O valor R_{v_n} é a resistência da impedância virtual da unidade, ω_n é retirado de (3.2), L_{v_n} é a indutância da impedância virtual da unidade, P_n e Q_n são as suas potências ativa e reativa de saída. A expressão acima interfere muito pouco no desempenho dinâmico da impedância virtual, por depender dos valores de P_n e Q_n , que são variáveis lentas. Caso seja necessário, um filtro passa-baixas poderá ser acrescentado na segunda parcela de (3.34) para uma influência menor ainda.

Escolhendo um peso $p_v < 1$, a compensação da queda poderá ser parcial, para um compromisso entre distribuição de potência reativa e qualidade da tensão, caso a impedância virtual seja utilizada para correção dos erros na distribuição de potência reativa. Por exemplo, [74] indica que a tensão em regime permanente adequada para sistemas de distribuição em 380/220 V é de 202 a 231 V.

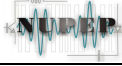
Desse modo, se o sistema fizer utilização de impedâncias virtuais para melhoria da distribuição de potência reativa, E_0 pode ser ajustado para 231 V, o CST irá compensar a queda no DrC, fazendo com que a média das tensões dos barramento de geração seja 231 V sob carga, desconsiderando a queda nas impedâncias virtuais. Então, p_v pode ser ajustado visando redução da queda nas impedâncias virtuais apenas o necessário para que a tensão no barramento de carga seja mantida acima de 205 V na situação de carregamento máximo.

O CST em conjunto com (3.34) fica similar ao controle proposto no trabalho [22], onde um compromisso entre distribuição de reativos e restauração da tensão pode ser escolhido.

3.6 UTILIZAÇÃO COM UGS DE CAPACIDADES DIFERENTES

No caso de MRs com UGs de diferentes capacidades nominais de potência, é naturalmente desejável que a distribuição de potência seja feita de forma proporcional (equitativa) ao invés de igualitária. Nos sistemas sem controle secundário isso é feito através do balanceamento dos coeficientes k_{v_n} e k_{p_n} do controle primário, conforme discutido no capítulo anterior.

Com o controle secundário de frequência, nota-se facilmente um problema: De (3.1), observa-se que, se $\omega_n = \omega_0$ (o que é o que o controle secundário fará), o termo $k_{p_n}(P_n - P_{ref_n})$ é zerado. Isso elimina o efeito de k_{p_n} em regime permanente e outra solução para a distribuição



equitativa deverá ser utilizada. Já para o controle secundário de tensão, esse problema é mais difícil de verificar intuitivamente. Mas, conforme será visto nos resultados, o efeito de k_{vn} em regime permanente é alterado pelo controle secundário de tensão, sendo insuficiente para distribuição da potência reativa, mas não é totalmente eliminado como o do k_{pn} . Após alguns desenvolvimentos matemáticos e simulações, chegou-se às novas equações para o CS, (3.35) e (3.36).

$$P_{ref_n} = -k_{pr} \int \sum_{\substack{j \in NS_n \\ j \neq n}} \left[P_{ref_n} - \left(\frac{P_{no_n}}{P_{no_j}} \right) P_j \right] dt \quad (3.35)$$

$$Q_{ref_n} = -k_{qr} \int \sum_{\substack{j \in NS_n \\ j \neq n}} \left[Q_{ref_n} - \left(\frac{Q_{no_n}}{Q_{no_j}} \right) Q_j \right] dt \quad (3.36)$$

A interpretação da modificação realizada é: em cada UG n , ao receber a potência ativa (reativa) de determinada unidade vizinha j , aplicará um peso de valor correspondente à razão entre sua potência ativa (reativa) nominal e a potência ativa (reativa) nominal da unidade j .

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O capítulo apresentou a proposta de controle secundário para regulação exata da frequência e restauração da tensão dentro dos níveis adequados através da média. Pôde-se verificar, com base no que foi mostrado, os seguintes pontos fortes do controle proposto: alta simplicidade de projeto, por possuir apenas dois parâmetros de sintonia no total, e que apenas afeta a velocidade de convergência; não eleva muito a ordem dinâmica do sistema, por ser composto de apenas dois integradores, ou seja, duas equações do tipo “k/s” para cada unidade; é totalmente distribuído; não requer sensoriaentos ou dispositivos adicionais; requer comunicação de baixa banda por trabalhar apenas com duas variáveis lentas (P e Q); é livre de modelos (não requer parâmetros do sistema) e indica possuir razoável independência da topologia da rede de dados.

Adicionalmente, o capítulo mostrou algumas considerações teóricas sobre a rede de dados. Conclui-se que provavelmente o sistema CAN cumprirá bem o seu papel para essa aplicação com bom custo benefício. Naturalmente, é apenas uma possibilidade e a rede adequada para cada caso dependerá também de questões específicas da aplicação real do sistema, tais como custo esperado, ambiente, tamanho físico da microrrede e confiabilidade



esperada. Sua interface com outros protocolos e meios físicos também poderá ser utilizada, através de *gateways*, caso a microrrede tenha uma porção de UGs próximas umas das outras (até algumas dezenas de metros) e outra(s) separadas por distâncias acima de centenas de metros.

Um método para compensação - total ou parcial - da queda de tensão em regime permanente nas impedâncias virtuais, sem prejuízo de suas contribuições dinâmicas também foi proposto. Ainda que simples, a estratégia não foi vista dentro do conjunto de referências estudadas para esta dissertação. Finalmente, foi mostrada a adaptação necessária no controle secundário para sistemas com UGs de potências nominais distintas.

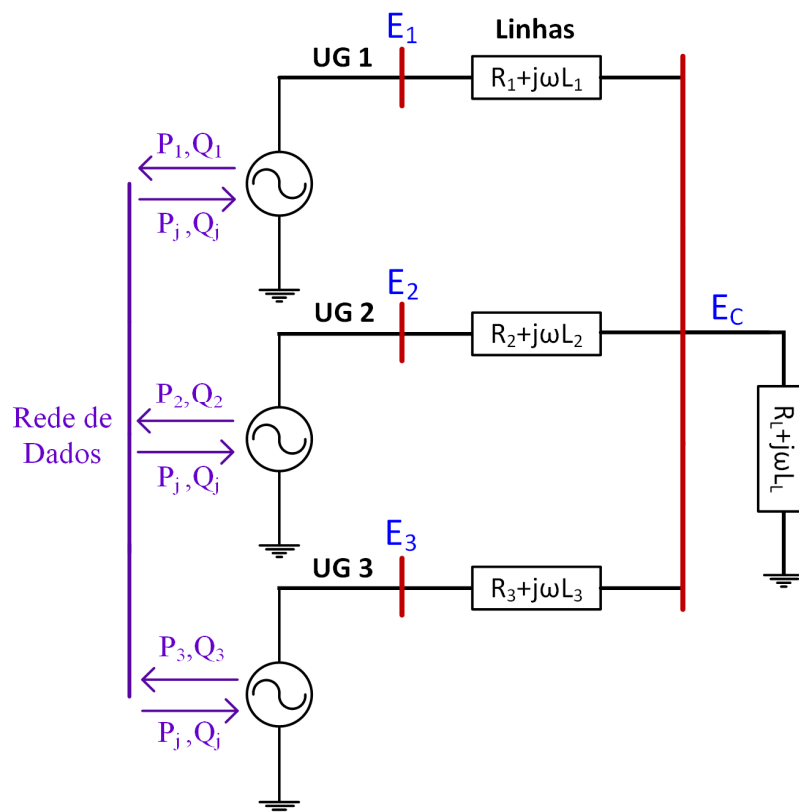
4. RESULTADOS PARA UGS DE CAPACIDADES NOMINAIS IGUAIS

4.1 INTRODUÇÃO

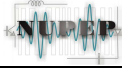
Neste capítulo serão mostrados os resultados de simulação, visando verificação do controle secundário proposto quanto à obtenção dos objetivos e melhor compreensão do comportamento do sistema como um todo.

A MR será considerada composta por três UGs trifásicas de 7 kVA. A topologia elétrica e de controle é a mesma mostrada na Figura 3.1 e na Figura 3.2, respectivamente, com a particularidade de que $N = 3$ e $n = 1, 2$ e 3 . O controle interno das unidades é considerado com desempenho ideal frente à dinâmica dos demais controles, sendo assim, para redução do peso computacional, os inversores serão considerados fontes ideais de tensão controlada, conforme já discutido. As potências foram escolhidas iguais para simplificação desta análise inicial e possibilitar algumas deduções válidas para tal condição. Para melhor compreensão, o esquema elétrico da MR simulada, neste e no próximo capítulo, é mostrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Esquema da MR simulada



Fonte: o autor (2018).



4. Resultados para UGs de Capacidades Nominais Iguais

O controle primário utilizado é exatamente o das equações (2.1) e (2.2), e o controle secundário é o das equações (3.3) e (3.11), todos distribuídos nos três geradores. Como as UGs são de mesma capacidade, os coeficientes de inclinação dos *droop* das três unidades serão iguais. Na Tabela 4.1 são mostrados os parâmetros gerais do sistema simulado. Os valores das impedâncias das linhas de transmissão serão mostrados posteriormente.

A potência nominal total da carga é de 12,8 kW - 14,4 kVar - 19,3 kVA. Foi escolhido intencionalmente uma potência reativa muito elevada, para impor variações severas nas potências reativas e variações numéricas mais expressivas nas tensões, para melhor precisão na análise numérica dos resultados, testar efeitos de não linearidades (variações de grande sinal) e mostrar que em todos os casos o CST conseguiu manter as tensões dentro da faixa adequada.

Tabela 4.1 - Parâmetros gerais do sistema simulado

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão de equilíbrio de referência (fase)	E_0	225	V
Classe de tensão nominal (fase/linha)	V_{no}	220/380	V
Frequência de equilíbrio de referência	ω_0	$2\pi 60$	rad/s
Freq. de corte do filtro das potências	ω_f	$2\pi 6$	rad/s
Resistência equivalente da carga (por fase)	R_L	5	Ω
Indutância equivalente da carga (por fase)	L_L	15	mH
Coeficientes do <i>droop</i> de tensão	$k_{v_{123}}$	0,003	V/Var
Coeficientes do <i>droop</i> de frequência	$k_{p_{123}}$	0,002	rad/(Ws)
Ganho do CSF	$k_{pr_{123}}$	12	W/s
Ganho do CST	$k_{qr_{123}}$	100	Var/s
Atraso de tempo da comunicação	t_d	100	ms

Fonte: o autor (2018).

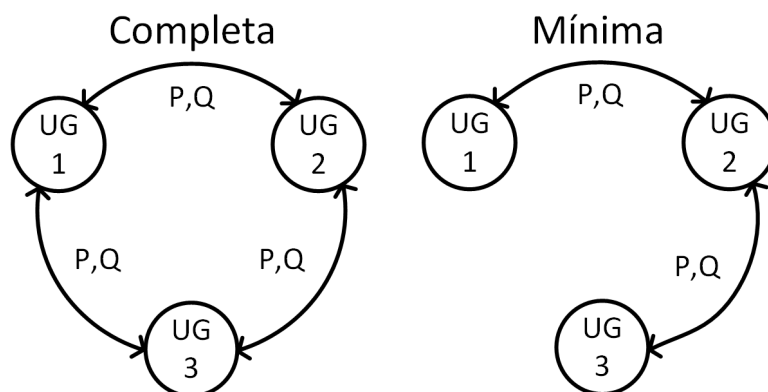
Na Figura 4.2 são mostradas as duas topologias consideradas para a rede de dados, relacionadas com o subcaso b (completa) e c (mínima). A linha é considerada necessariamente bidirecional e o mesmo canal de comunicação é utilizado tanto para a potência ativa quanto reativa. No caso da topologia mínima, arbitrariamente foi escolhida a ausência de comunicação entre as UGs 1 e 3. Não há passagem de dados “através” das UGs, ou seja, no caso da rede mínima, não é possível que a UG 1 comunique com a UG 3 através da UG 2.



Utilizando a nomenclatura adotada no Capítulo 3, no caso da rede completa: para $n = 1$ (UG 1), j valerá 2 e 3; para $n = 2$ (UG 2), j valerá 1 e 3; para $n = 3$ (UG 3), j valerá 1 e 2. No caso da rede mínima: para $n = 1$ (UG 1), j valerá 2; para $n = 2$ (UG 2), j valerá 1 e 3; para $n = 3$ (UG 3), j valerá 2.

A topologia da rede diz respeito ao fluxo de informação e não necessariamente à ligação física da rede de dados. Por exemplo, no caso da utilização da rede CAN, o barramento de dados pode interconectar fisicamente as três unidades e a conexão pode ser mínima fazendo-se com que a UG 1 não aceite mensagens enviadas pela UG 3 e vice-versa, de acordo com configuração do sistema de filtragem de conteúdo. Nesse caso, em se tratando da rede de dados em si, isso não traria economias. Mas o processamento interno nas UGs é aliviado, já que a quantidade de termos que serão computados no somatório de (3.3) e (3.11) depende de quantas unidades os dados são recebidos.

Figura 4.2 - Topologias consideradas para a rede de dados



Fonte: o autor (2018).

Ressalta-se que neste capítulo e nos próximos a variação topológica possível da rede de dados é considerada limitada às duas configurações discutidas acima. Ou seja, quando for lido algum comentário a respeito da configuração da rede de dados, deve ser entendido que somente devem ser consideradas possíveis a utilização de topologia completa ou mínima.

Naturalmente, uma rede poderá ter mais de uma topologia mínima, a depender do nó escolhido como raiz da árvore geradora, e não há exigência por parte do CS de que seja alguma UG em específico, podendo ser escolhida através de critérios econômicos ou de facilidade de implementação prática. A escolha da interrupção da comunicação entre as unidades 1 e 3 para os resultados foi arbitrária.

Em todas as simulações, incluindo as análises de regime permanente, um atraso de 100 ms foi inserido em cada linha da rede de dados para demonstrar, principalmente, que o CS tolera



atrasos razoáveis e também para atrasar a sua resposta, intencionalmente, visando uma melhor distinção visual de quais aspectos dinâmicos são devidos à atuação do CS e quais não são.

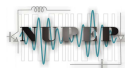
Em todos os resultados do capítulo, o carregamento de potência reativa utilizado é intencionalmente elevado, e as variações de carregamento são em degrau: de 0 a 100% e vice-versa. Portanto, a “exigência” do sistema de controle é muito alta em todos os resultados. Isso teve dois propósitos. Primeiramente, como a MR em conjunto com seu controle é um sistema não linear, é de grande valia as simulações computacionais que empregam perturbações de grandes sinais, tendo em vista que o estudo do comportamento do sistema através de modelos matemáticos normalmente é feito apenas para pequenos sinais, restando para as simulações e experimentos o estudo do efeito de perturbações mais severas.

Em segundo, o sistema possui acoplamentos com altos ganhos entre alguns estados, por exemplo: grandes variações de potência ativa são relacionadas com pequenas variações de fase e grandes variações na potência reativa causam pequenas variações de amplitude da tensão. Trabalhar com pequenas variações de potência reativa dificultam a visualização das variações nas tensões, requer passos de simulação muito pequenos e utilização de muitas casas decimais na apresentação dos resultados para evitar falsas interpretações.

Notar que a tensão nominal do sistema é 380/220 V, porém a tensão de fase de referência escolhida é 225 V, que será o valor da tensão nos barramentos de geração com a MR a vazio e será o valor de referência em que o controle secundário buscará regular a média das tensões. Essa elevação de 5 V sobre o valor nominal tem a função de compensar a queda de tensão entre a saída das UGs e o barramento de carga, devido às linhas de transmissão.

Na falta de normas brasileiras específicas para o caso de sistemas de distribuição por microrrede isolada, [74] foi escolhido neste trabalho como referência para os parâmetros de qualidade da energia em regime permanente, ditando que a faixa de tensão de fase adequada para sistemas de distribuição em 380/220 V é de 202 a 231 V. Tal faixa de valores será importante para as análises que virão.

Como o PRODIST [74] foi elaborado para o sistema elétrico de distribuição convencional, parte do grande sistema elétrico interligado nacional, suas restrições são severas, especialmente de frequência, para manter a controlabilidade do sistema e evitar danos mecânicos aos geradores conectados. Acredita-se que no caso das microrredes em operação, restrições menores serão utilizadas, por conta da baixíssima inércia elétrica delas, ausência de grandes geradores síncronos acoplados a turbinas, menor presença de grandes cargas motrizes



conectadas diretamente ao sistema e inserção pesada de cargas eletrônicas, que a cada dia aceitam maiores variações de frequência e de tensão.

Deve-se ter em mente que o CS é mais lento que o primário e é afetado por atrasos da rede de dados, desse modo, é natural que durante variações pesadas de carga (como as utilizadas para os resultados deste trabalho) haja, transitoriamente, variações consideráveis de frequência e tensão, muitas vezes acima dos limites de [74] **antes** da resposta do CS. Essas variações são causadas pelo controle primário e pelas impedâncias das linhas (podendo ser minimizadas pelo projeto destes, mas não eliminadas).

É importante compreender que E_0 é denominada como variável de referência apenas por corresponder ao valor em que o CST procurará aproximar a média das tensões, logo sua magnitude deve ser tratada como sendo o valor “ideal” para as tensões. Todavia, E_0 não deve ser entendida como uma referência sob a ótica da teoria clássica de controle, isto é, como um valor de entrada do sistema que é comparado com a variável realimentada para gerar um sinal de erro que determinará a ação de controle após passar por um compensador ou ganho.

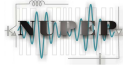
No caso, como o sistema é autônomo e homogêneo, E_0 não é uma entrada. É apenas um parâmetro interno da planta, na forma de constante embutida no controle primário das UGs, e não há nenhum tipo de cálculo de erro de tensão no CST. Inclusive, E_0 não está presente nas equações que regem o CS. Os mesmos comentários valem para ω_0 , que é o valor que o CSF procurará regular a frequência, desempenhando um papel de variável de referência. Mas ω_0 não é uma entrada do sistema, não há cálculo de erro de frequência e ω_0 nem está presente nas equações de implementação do CS.

4.2 CASOS DE ESTUDO

Para melhor organização, o estudo do comportamento do sistema foi dividido em casos e subcasos. Os casos são relativos à **configuração elétrica** do sistema e são os seguintes:²

1. Sem uso de impedância virtual e **impedâncias de linhas “grandes”** e distintas;
2. Sem uso de impedância virtual e **impedâncias de linha “pequenas”** e distintas;
3. Impedâncias de linha do **caso 2** e uso de **impedância virtual**, visando aumentar e equalizar as impedâncias totais;

² As marcações com cores serão utilizadas ao longo do capítulo com a intenção de facilitar a leitura da discussão, pois os resultados trabalham com muitas combinações de casos e subcasos. Com o mesmo propósito, a formatação das tabelas não seguiu à risca a NBR 14724.



4. Impedâncias de linha do **caso 2**, impedâncias virtuais do **caso 3** e com a **compensação** total da queda de tensão nas impedâncias virtuais (3.34);
5. Sem uso de impedância virtual e **impedâncias de linhas “médias”** e similares.

Os valores das impedâncias das linhas e impedâncias virtuais relativas aos casos de estudo estão na Tabela 4.2. Foram utilizadas apenas indutâncias virtuais, pois as resistências do sistema devem permanecer pequenas e as resistências das linhas são de valores suficientes. As últimas três colunas da Tabela 4.2 informam os valores das indutâncias totais para as três UGs em cada caso, sendo simplesmente a soma da indutância física com a virtual.

Para cada caso, são aplicados quatro subcasos envolvendo qual a **estratégia de CST adotada**:

- a. **Sem CST** (apenas controle primário);
- b. **CST proposto com rede de dados completa**;
- c. **CST proposto com rede de dados mínima**;
- d. **CST homogêneo** (2.29).

Tabela 4.2 - Impedâncias das linhas, impedâncias virtuais e impedâncias totais para cada caso

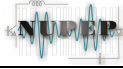
Caso	R_1 [Ω]	L_1 [mH]	L_{v1} [mH]	R_2 [Ω]	L_2 [mH]	L_{v2} [mH]	R_3 [Ω]	L_3 [mH]	L_{v3} [mH]	$L_{1tot.}$ [mH]	$L_{2tot.}$ [mH]	$L_{3tot.}$ [mH]
1	0,08	8,0	-	0,11	6,0	-	0,10	10,0	-	8,0 ^f	6,0 ^f	10,0 ^f
2	0,1	3,0	-	0,08	1,5	-	0,07	1,5	-	3,0 ^f	1,5 ^f	1,5 ^f
3	0,1	3,0	4,0	0,08	1,5	5,5	0,07	1,5	5,5	7,0 ^{fv}	7,0 ^{fv}	7,0 ^{fv}
4	0,1	3,0	4,0	0,08	1,5	5,5	0,07	1,5	5,5	7,0 ^c	7,0 ^c	7,0 ^c
5	0,08	7,0	-	0,07	7,0	-	0,06	7,0	-	7,0 ^f	7,0 ^f	7,0 ^f

Fonte: o autor (2018).

f: indutâncias físicas; fv: indutâncias físicas + virtuais; c: indutâncias físicas + virtuais, com compensação.

O controle secundário de frequência permanece ativado em todos os casos e subcasos, e seu parâmetro $k_{pr_{123}}$ será, por ora, mantido fixo. No subcaso a, como o controle secundário está desativado, os valores de Q_{ref} e P_{ref} são mantidos zerados para todas as unidades, como é habitual, fazendo com que E_0 e ω_0 sejam a tensão e frequência a vazio, respectivamente.

Os casos 3 e 4 compartilham dos mesmos valores de impedâncias, com a única diferença que no caso 4 é utilizada a compensação da queda de tensão nas impedâncias virtuais. Notar que as impedâncias do caso 2 são significativamente menores que as do caso 1 e que, nos casos 3 e 4, as impedâncias virtuais são de valores tais que a indutância total seja igualada em 7 mH para as três linhas e que as resistências permaneceram distintas pois não teria aplicabilidade prática a suposição que as impedâncias das linhas são igualadas com exatidão.



No caso 5, é suposto que as indutâncias das linhas de transmissão foram igualadas, não através das impedâncias virtuais, mas fisicamente. Novamente, as resistências permaneceram distintas, pois como são valores muito pequenos e possuem variação com a temperatura, é impossível igualá-las com perfeição na prática. Além disso, normalmente as indutâncias são inseridas no circuito por indutores, já que a indutância dos cabos é muito menor que a resistência, via de regra. É factível a inserção de indutores de iguais indutâncias nas saídas das UGs, mas não é muito praticável medir as resistências dos cabos e inserir resistores de precisão no circuito visando igualar as discrepâncias entre elas.

4.3 RESULTADOS EM REGIME PERMANENTE

A MR iniciou a vazio e, após o equilíbrio em tal condição (que se deu em torno de 0,1 s), carga plena foi colocada em forma de degrau. Os resultados foram originalmente colhidos no domínio do tempo, extraído-se das curvas obtidas como resposta o valor em regime permanente das respectivas variáveis, que ocorreu sempre em um tempo menor que 1,3 s após o distúrbio.

A Tabela 4.3 mostra os resultados numéricos com o sistema em regime permanente. Na tabela, $P_i/3$ é um terço da soma das potências ativas das três UGs (ou a média da potência ativa total gerada) e é numericamente igual à potência ativa entregue por cada unidade, já que são idênticas e o DrC convencional, conforme já extensamente discutido, distribui perfeitamente a potência ativa. $Q_i/3$, de forma análoga, indica qual a potência reativa que cada UG deveria fornecer, não sendo realmente o valor fornecido, devido ao erro na distribuição de potência reativa.

DPR.Q e DPR.E são o desvio padrão relativo (em percentual) da potência reativa e das tensões dos barramentos de saída das três unidades (E_1 , E_2 e E_3), respectivamente. O DPR é definido como a razão entre o desvio padrão das medidas e a média, sendo útil para comparação do desvio padrão de resultados de grandezas diferentes, já que, para os diferentes casos e subcasos, as variáveis assumem magnitudes distintas. As equações (4.1) e (4.2) mostram os cálculos para DPR.Q e DPR.E, respectivamente, onde $\text{DesvPad}()$ é o desvio padrão de seus argumentos e $\text{Méd}()$ é a média aritmética de seus argumentos.

$$\text{DPR.E [\%]} = \frac{\text{DesvPad}(E_1, E_2, E_3)}{\text{Méd}(E_1, E_2, E_3)} * 100 \quad (4.1)$$



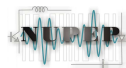
$$\text{DPR.Q [\%]} = \frac{\text{DesvPad}(Q_1, Q_2, Q_3)}{\text{Méd}(Q_1, Q_2, Q_3)} * 100 \quad (4.2)$$

Como as unidades são idênticas, o DPR.Q foi utilizado para quantificar a precisão obtida na distribuição das potências reativas entre as UGs, já que a média das potências reativas geradas é exatamente o valor que cada UG deve gerar. O DPR.E é utilizado para quantificar o grau de variação entre os três valores das tensões de saída, para investigar se o CS não gerou discrepâncias significativas entre as tensões. $\Delta \bar{E}$ é a diferença (em volts) entre a média das tensões (E_1 , E_2 e E_3) e a referência (E_0). O objetivo matemático do CST é reduzir $\Delta \bar{E}$, o máximo possível, para regular o nível de tensão nos barramentos dentro da faixa adequada. E_c é a amplitude da tensão no barramento de carga. Retornar à Figura 4.1 para maior compreensão, caso necessário.

Tabela 4.3 - Resultados para regime permanente com UGs de mesma potência

Caso	P _{t/3} [W]	DPR.Q [%]	Q _{t/3} [Var]	Q ₁ [Var]	Q ₂ [Var]	Q ₃ [Var]	DPR.E [%]	E ₁ [V]	E ₂ [V]	E ₃ [V]	$\Delta \bar{E}$ [V]	E _c [V]
1 a	3.426,4	13,7	4.518,8	4.439,1	5.315,4	3.801,8	0,50	217,31	215,78	218,41	-7,83	196,87
1 b	3.675,3	11,8	4.847,8	4.785,7	5.576,9	4.180,7	0,66	225,16	223,11	226,73	0,00	203,89
1 c	3.692,2	11,0	4.870,8	4.899,2	5.511,2	4.202,1	0,73	226,06	223,34	227,27	0,56	204,36
1 d	3.685,9	19,6	4.859,7	4.683,0	6.104,2	3.791,9	0,00	225,00	225,00	225,00	0,00	204,17
2 a	3.944,0	12,9	4.625,0	3.779,7	5.036,0	5.059,4	0,48	218,45	216,28	216,24	-8,01	211,33
2 b	4.238,5	9,90	4.971,7	4.276,3	5.310,2	5.328,5	0,57	226,81	224,12	224,07	0,00	219,07
2 c	4.248,3	11,9	4.982,4	4.164,3	5.245,5	5.537,5	0,52	226,87	224,32	224,49	0,23	219,33
2 d	4.252,5	28,8	4.983,4	2.954,4	5.959,7	6.036,2	0,00	225,00	225,00	225,00	0,00	219,43
3 a	3.509,0	0,80	4.121,6	4.169,6	4.093,2	4.102,1	0,81	207,47	206,64	203,59	-19,10	199,32
3 b	3.742,8	0,70	4.396,1	4.440,1	4.370,0	4.378,2	0,88	214,26	210,32	210,27	-13,38	205,86
3 c	3.742,1	0,80	4.395,3	4.442,5	4.372,2	4.371,3	0,88	214,25	210,31	210,25	-13,39	205,85
3 d	4.252,5	28,8	4.983,4	2.954,4	5.959,7	6.036,2	0,00	225,00	225,00	225,00	0,00	219,43
4 a	3.925,5	11,7	4.603,8	3.843,4	4.973,2	4.994,9	0,52	218,08	215,73	215,69	-8,50	210,83
4 b	4.238,5	9,50	4.971,5	4.302,8	5.297,1	5.314,7	0,58	226,84	224,10	224,06	0,00	219,07
4 c	4.246,5	11,5	4.980,6	4.187,7	5.230,6	5.523,5	0,53	226,87	224,26	224,44	0,19	219,28
4 d	4.252,5	28,8	4.983,4	2.954,4	5.959,7	6.036,2	0,00	225,00	225,00	225,00	0,00	219,43
5 a	3570,0	0,20	4555,6	4545,8	4556,4	4564,5	0,01	217,13	217,11	217,10	-7,89	199,00
5 b	3743,0	0,10	4869,6	4861,0	4871,0	4876,3	0,01	225,02	225,00	224,98	0,00	205,97
5 c	3744,7	0,20	4869,6	4859,4	4870,3	4879,1	0,01	225,02	225,00	224,98	0,00	205,97

Fonte: o autor (2018).



Conforme comentado na introdução, o CSF está ativado e regulou com exatidão a frequência em 60 Hz em todas as situações. Adicionalmente, o desempenho dele para UGs de mesmas capacidades nominais já foi mostrado em [17], no tocante ao valor final da frequência. Logo, os resultados para a frequência foram omitidos para compactação da tabela.

Analisando a Tabela 4.3, verifica-se que, para todos os cinco casos: com o CST proposto (subcasos b e c) o DPR.Q ficou menor, ou no máximo igual, às demais situações, sinalizando que o CST não prejudicou a distribuição de reativos, tendo inclusive melhorado para a maioria dos casos; o DPR.E é ligeiramente aumentado nos casos 1, 2, 3 e 4 e manteve-se inalterado no caso 5. Todavia, DPR.E foi mantido dentro de um valor muito aceitável ($< 0,88\%$), indicando que o referido controle não causou piora significativa nas discrepâncias entre as magnitudes das tensões.

Como as UGs são consideradas idênticas e os parâmetros do controle primário de todas as UGs são iguais, é dedutível que o erro na distribuição de potência reativa pelo DrC para os casos 1, 2, 3 e 4, é devido às diferenças nas impedâncias das linhas. Para o caso 5, a distribuição de potência reativa pode ser considerada perfeita. A pequena discrepância remanescente é devido ao fato de que foram igualadas apenas as parcelas relativas às indutâncias.

O DPR.Q ficou muito elevado em todos subcasos d, mostrando que o CST do tipo homogêneo (2.29) prejudica fortemente a distribuição de potência reativa nesse sistema, ainda que tenha regulado precisamente as tensões de todas as UGs para todos os casos. Observar que as configurações 2d, 3d e 4d geram os mesmos resultados, pois o efeito (em regime permanente) das impedâncias virtuais é inexistente quando o CS é desse tipo, já que ela não consegue afetar as tensões. A partir deste momento o caso d ficará de fora das análises.

A tensão na carga fica abaixo do valor adequado nos casos 1a, 3a e 5a, indicando que a utilização de alguma estratégia para regulação é bastante necessária nessas três situações. O CST proposto foi capaz de manter um nível adequado de tensão nos barramentos de geração e carga para todas as situações, atingindo seu objetivo.

O DPR.Q nos casos 3a, 3b e 3c é muito baixo em relação aos demais, isso mostra a eficácia do uso da indutância virtual na melhoria da distribuição de reativos, ao igualar as indutâncias das linhas. Mesmo com as quedas adicionais nas impedâncias virtuais - comparar as tensões do caso 2 (a,b e c) com as do caso 3 (a, b e c) -, o CST proposto ainda conseguiu restaurar a tensão na carga a um valor adequado.

Já no caso 4, apesar do efeito dinâmico das impedâncias virtuais ser mantido (será visto posteriormente), o DPQ.R volta a ficar elevado devido à estratégia de compensação da queda



de tensão nas impedâncias virtuais em regime permanente. Desse modo, em regime permanente, os resultados do caso 4 são (e deveriam ser) muito similares ao caso 2. A diferença será vista na melhora causada pelas impedâncias virtuais no regime transitório.

Observando os valores de $\Delta \bar{E}$ para os subcasos b e c dos casos 1, 2 e 4, verifica-se que o CST proposto regulou a média das tensões de forma precisa apenas para a situação de rede de dados completa. Para o caso 3, a regulação não foi precisa em nenhuma situação, devido à queda de tensão adicionada pelas impedâncias virtuais, que não foi compensada pelo CST. Todavia, nesse caso se observa uma alteração desprezível entre os resultados com rede de dados completa e rede de dados mínima, indicando que a topologia teve pouco efeito no desempenho do CS.

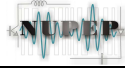
Já para o caso 5, a média foi regulada perfeitamente independentemente de a rede de dados ser completa ou mínima. A desprezível influência da topologia no caso 3 e a ausência total para o caso 5, é devido ao fato de que as potências reativas das UGs são praticamente idênticas nesses dois casos. Conforme visto no capítulo anterior, a dependência do CST com relação à topologia da rede de dados é intimamente relacionada com as diferenças entre as potências reativas. Salienta-se que o pior desvio obtido no valor final da média com rede de dados mínima foi de 0,56 V, que é pequeno.

4.4 RESULTADOS DINÂMICOS

A seguir, os resultados de simulação no domínio do tempo serão mostrados e discutidos. As situações consideradas foram apenas: 1b/c, 2a/b/c e 4b, pois as demais não apresentaram contribuição adicional significativa, no tocante à compreensão e validação do funcionamento do sistema, sendo descartadas para compactação do documento.

Mais ao final, também são apresentados dois casos adicionais: “2c – modificado” e “2c – rede de dados com amostragem de 10 Hz”. O “2c – modificado” consistiu na alteração dos ganhos do CS para resolver oscilações que apareceram em situações de rede mínima. O “2c – rede de dados com amostragem de 10 Hz” visa mostrar o comportamento do sistema em uma situação mais realística simulando uma rede de dados discreta com taxa de amostragem de 10 Hz. Nos demais resultados, apesar do atraso de 100 ms sempre estar presente, a rede de dados foi simulada no domínio contínuo.

O esquemático da MR e os parâmetros de controle, salvo quando dito o contrário, são precisamente idênticos aos utilizados para a análise em regime permanente. A MR é iniciada



4. Resultados para UGs de Capacidades Nominais Iguais

totalmente a vazio e em $t = 0,1s$ a carga plena é conectada, sendo removida totalmente em $t = 0,72s$, salvo quando explicitado o contrário.

Ressalta-se que o sistema é autônomo e homogêneo, ou seja, todos os controles estão ligados desde o início da simulação e não há nenhum chaveamento ou variação de alguma variável de referência ou de entrada, somente o chaveamento da carga, que é parte do sistema dinâmico, causando uma perturbação em relação ao seu equilíbrio.

Para facilitação da leitura, a descrição dos casos e subcasos utilizados será repetida:

- Casos (os valores foram repetidos abaixo, na Tabela 4.4):
 1. Sem uso de impedância virtual e **impedâncias de linhas “grandes”** e distintas;
 2. Sem uso de impedância virtual e **impedâncias de linha “pequenas”** e distintas;
 4. Impedâncias de linha do **caso 2**, impedâncias virtuais do **caso 3** e com a **compensação** total da queda de tensão nas impedâncias virtuais (3.34);

Tabela 4.4 - Impedâncias das linhas, impedâncias virtuais e impedâncias totais para cada caso

Caso	R_1 [Ω]	L_1 [mH]	L_{v1} [mH]	R_2 [Ω]	L_2 [mH]	L_{v2} [mH]	R_3 [Ω]	L_3 [mH]	L_{v3} [mH]	$L_{1tot.}$ [mH]	$L_{2tot.}$ [mH]	$L_{3tot.}$ [mH]
1	0,08	8,0	-	0,11	6,0	-	0,10	10,0	-	8,0 ^f	6,0 ^f	10,0 ^f
2	0,1	3,0	-	0,08	1,5	-	0,07	1,5	-	3,0 ^f	1,5 ^f	1,5 ^f
3	0,1	3,0	4,0	0,08	1,5	5,5	0,07	1,5	5,5	7,0 ^{fv}	7,0 ^{fv}	7,0 ^{fv}
4	0,1	3,0	4,0	0,08	1,5	5,5	0,07	1,5	5,5	7,0 ^c	7,0 ^c	7,0 ^c
5	0,08	7,0	-	0,07	7,0	-	0,06	7,0	-	7,0 ^f	7,0 ^f	7,0 ^f

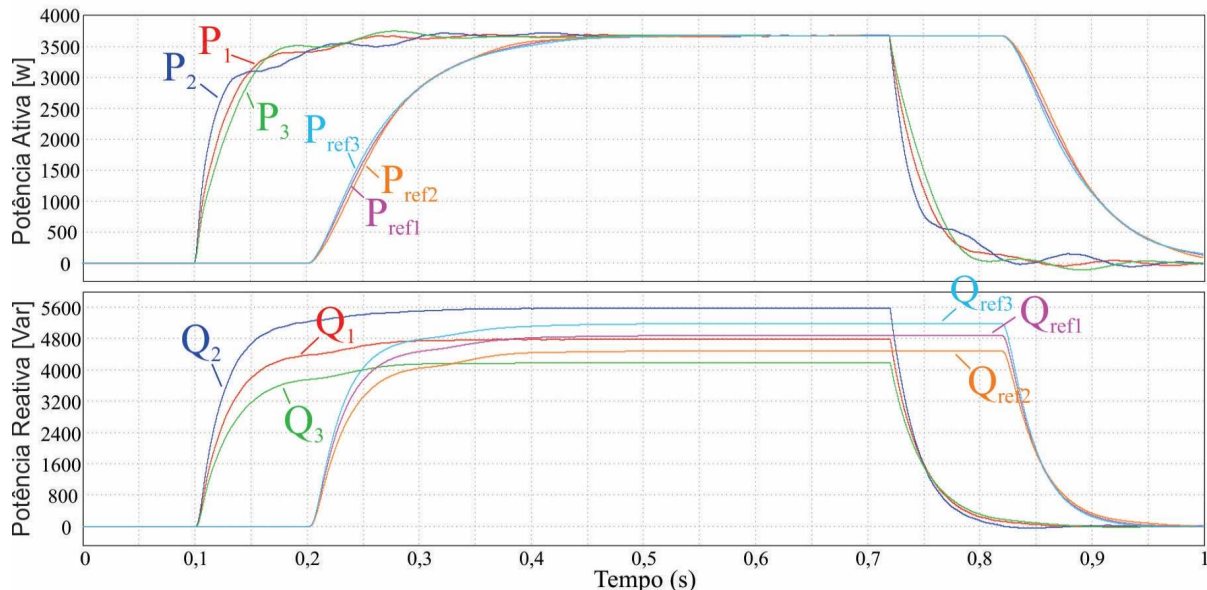
Fonte: o autor (2018).

f: indutâncias físicas; fv: indutâncias físicas + virtuais; c: indutâncias físicas + virtuais, com compensação.

- Subcasos:
 - a. Sem CST (apenas controle primário);
 - b. CST proposto com rede de dados completa;
 - c. CST proposto com rede de dados mínima;

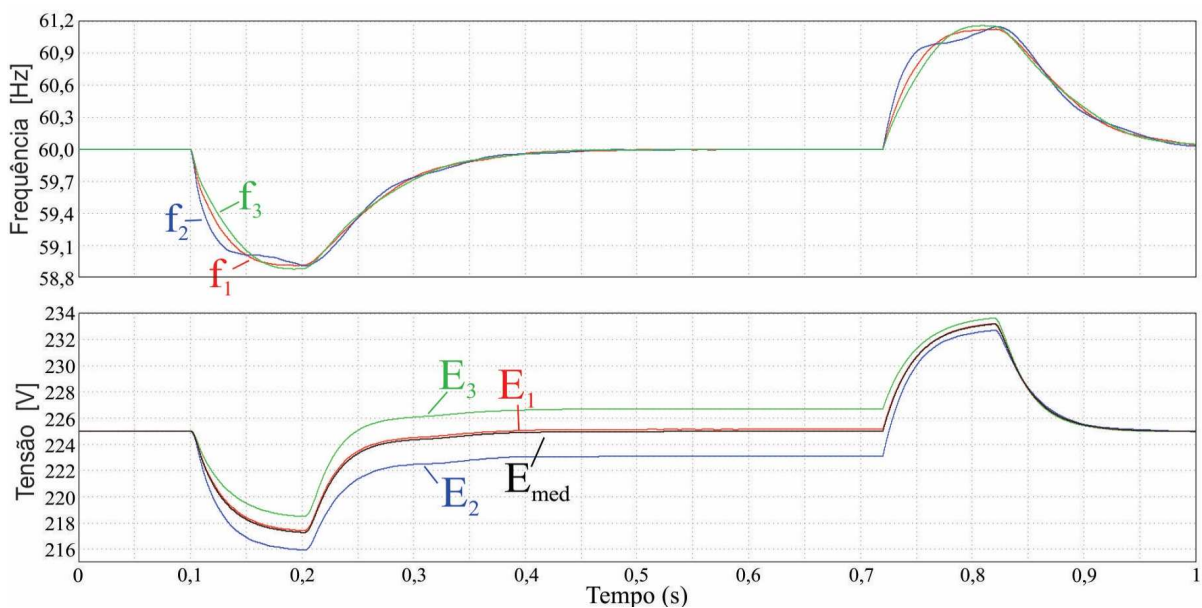
Na Figura 4.3 são mostrados os resultados para potências de saída (P_n e Q_n) e potências de referência (P_{ref_n} e Q_{ref_n}) das UGs para o caso 1b, com as ativas na janela superior e reativas na janela inferior. Ainda para essa situação, a Figura 4.4 mostra os resultados de frequência (convertidos para Hz) na janela superior e na janela inferior, as amplitudes das três tensões de saída (E_n) das UGs e a média de tais tensões $\left(\frac{\sum E_n}{3}\right)$.

Figura 4.3 - Potências ativa e reativa de saída e potências ativa e reativa de referência para o caso 1b



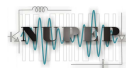
Fonte: o autor (2018).

Figura 4.4 - Frequências e tensões para o caso 1b



Fonte: o autor (2018).

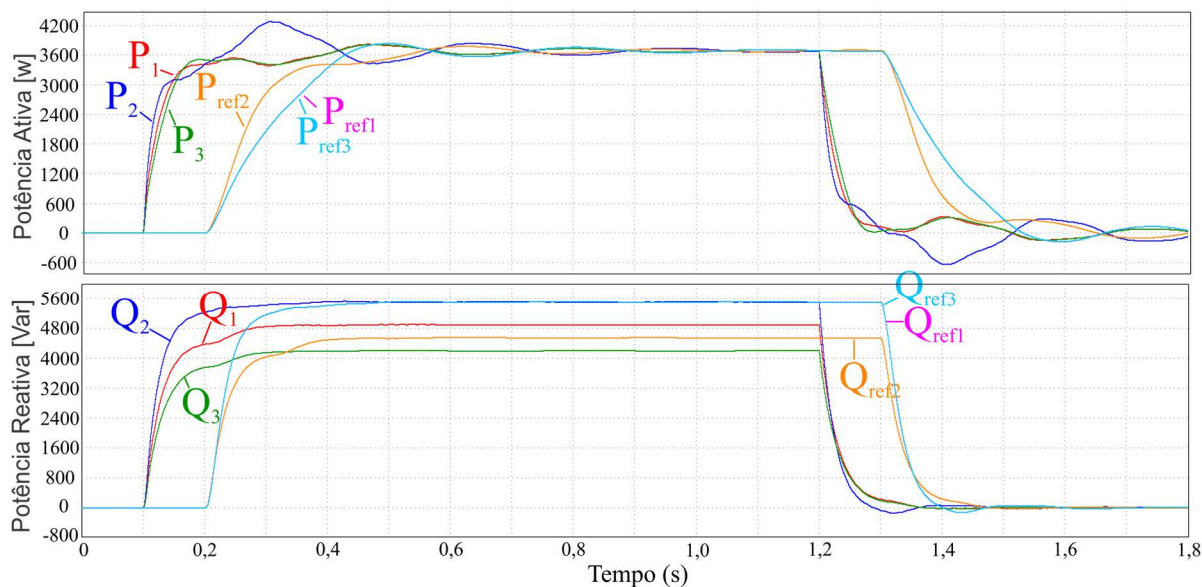
Através das curvas P_{refn} e Q_{refn} da Figura 4.3, pode-se observar a velocidade de atuação do CS. Este demorou 100 ms para começar a responder devido ao atraso de tempo considerado na rede de dados (exatos 100ms). Passado o atraso da comunicação, o CSF e o CST gastam cerca de 200 ms para atingir o regime permanente. O comportamento das potências ativas de saída é subamortecido, com ultrapassagens pequenas. As potências ativas e reativas de referências, que são a variável de saída do CS, ficaram bastante amortecidas, o que mostra que o algoritmo do CS possuiu dinâmica amortecida.



Na Figura 4.4 é mostrado que a frequência e a média das tensões convergiram precisamente para a referência, o que está de acordo com os resultados em regime permanente para o caso 1b, já apresentados. O tempo de restauração completa da frequência e tensões, a partir dos 100 ms de atraso da rede de dados, foi de cerca de 200 ms. As tensões tiveram comportamento bastante amortecido durante a atuação do CST para suas restaurações. O afundamento nas tensões no ato da entrada de carga e a ultrapassagem no ato da saída de carga é devido à resposta do controle primário e ao atraso da rede de dados, que impossibilita reação rápida do CS. A restauração da frequência também apresentou oscilações desprezíveis.

Na Figura 4.5, a respeito do caso 1c, que é utilizado para verificação do efeito da topologia mínima da rede de dados, são mostrados os resultados para potências de saída e potências de referência das UGs, com as ativas na janela superior e reativas na janela inferior. Comparando a Figura 4.5 com a Figura 4.3, percebe-se que a rede de dados mínima reduziu o amortecimento e aumentou o tempo de assentamento das potências ativa e reativa, especialmente a primeira. Devido à essa maior demora no assentamento do sistema, o tempo de simulação foi aumentado de 1,0s para 1,8s e o tempo de retirada da carga teve de ser aumentado para 1,2s.

Figura 4.5 - Potências ativa e reativa de saída e potências ativa e reativa de referência para o caso 1c

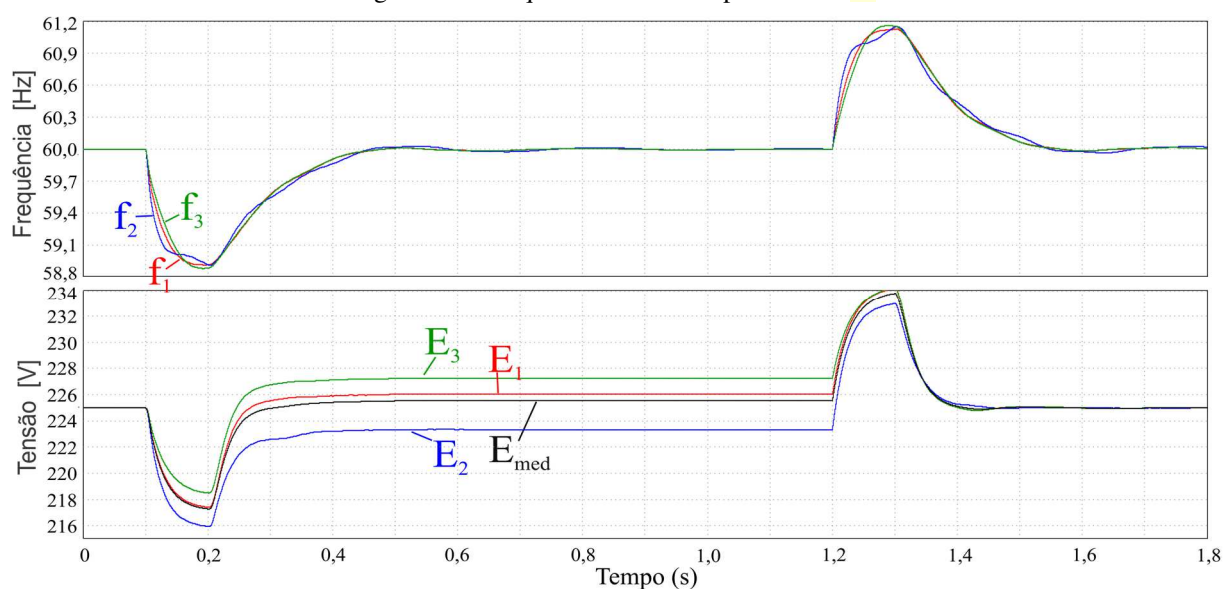


Fonte: o autor (2018).



A Figura 4.6 mostra os resultados das frequências e tensões para o caso 1c, também com o aumento no tempo de simulação e no tempo de retirada da carga descritos. É interessante que, em relação ao caso 1b, se observou uma redução considerável no amortecimento das potências, enquanto as frequências, tensões e potência reativa sofreram alteração praticamente desprezível. O tempo de restauração completa, passado o atraso da rede de dados, continua por volta de 200ms para as frequências e tensões. A alteração significativa foi apenas no valor final da média das tensões que foi de 225,56 V ao invés do 225 V, o que está de acordo com o discutido nos resultados de regime permanente.

Figura 4.6 - Frequências e tensões para o caso 1c



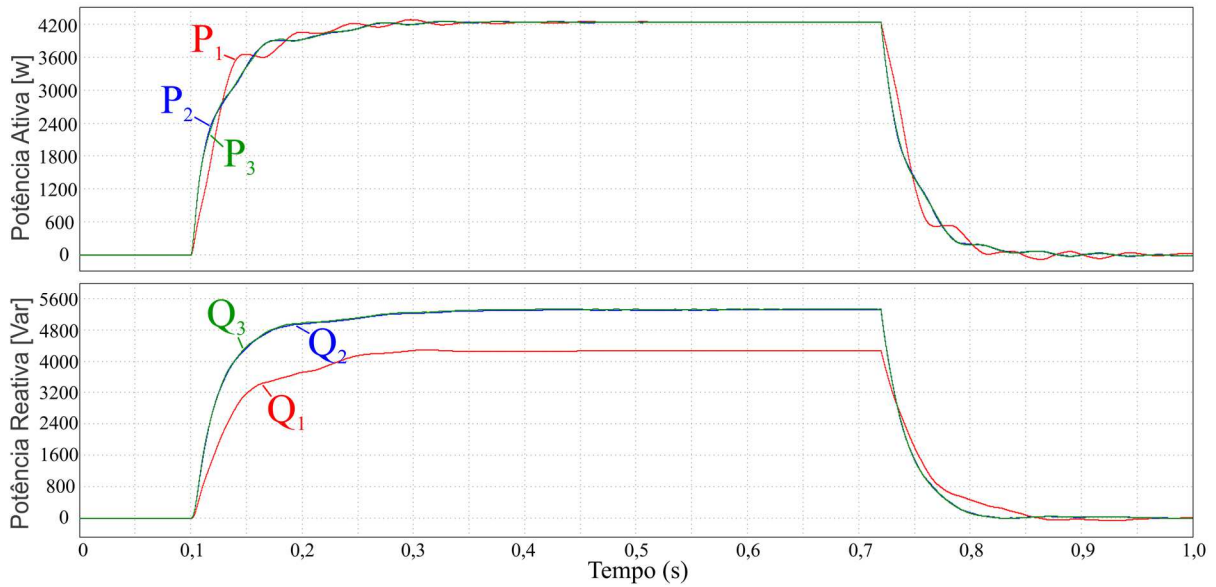
Fonte: o autor (2018).

A respeito do caso 2b, que simula o efeito da redução das impedâncias de linha com utilização do CS proposto implementado através de rede de dados completa, a Figura 4.7 exhibe os resultados para as potências ativa (na parte superior) e reativa (na parte inferior) de saída e a Figura 4.8 mostra os resultados para as frequências (na parte superior) e tensões de saída (na parte inferior) das UGs. A UG 1 é a de menor impedância de linha, implicando em menor amortecimento, o que pode ser notado pelas suas curvas de potência ativa e frequência. As tensões continuaram com resposta pouco oscilatória. A potência reativa da UG 1 teve comportamento menos amortecido que as demais, mas ainda se manteve com oscilações pequenas.



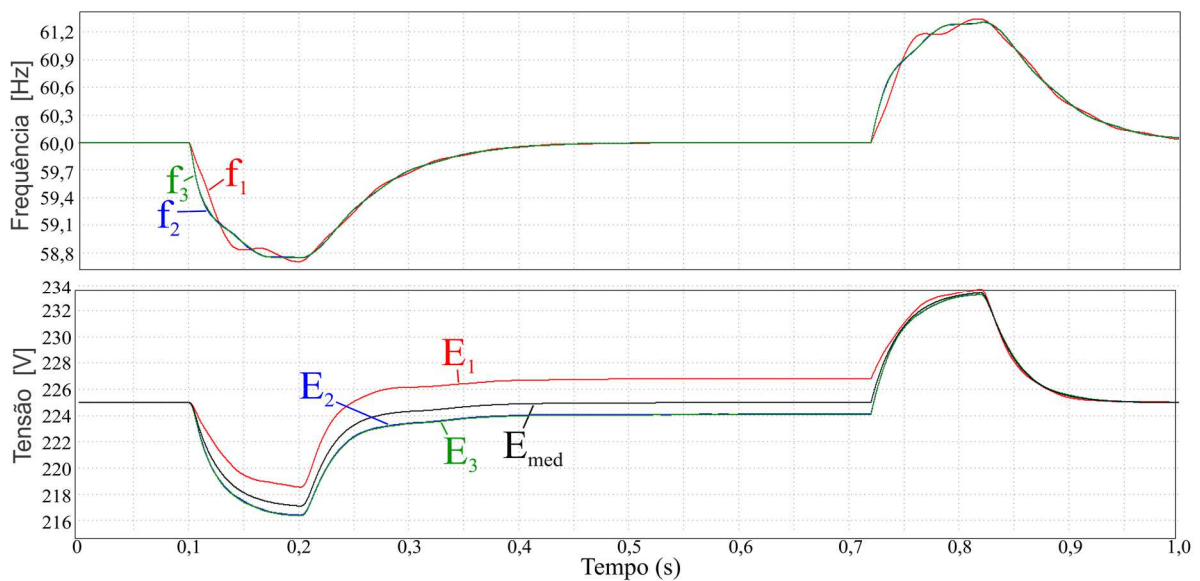
4. Resultados para UGs de Capacidades Nominais Iguais

Figura 4.7 - Potências ativa e reativa de saída para o caso 2b



Fonte: o autor (2018).

Figura 4.8 - Frequências e tensões para o caso 2b



Fonte: o autor (2018).

Pela Figura 4.8, nota-se que a tensão continuou com uma dinâmica bem amortecida, com resultado muito parecido com aqueles do caso 1b. Isso mostra uma boa robustez do controle com relação aos valores das impedâncias de linha. Naturalmente, continua tendo que ser respeitado um valor mínimo para garantir a estabilidade do sistema, mas essa não é uma questão criada pelo CS.

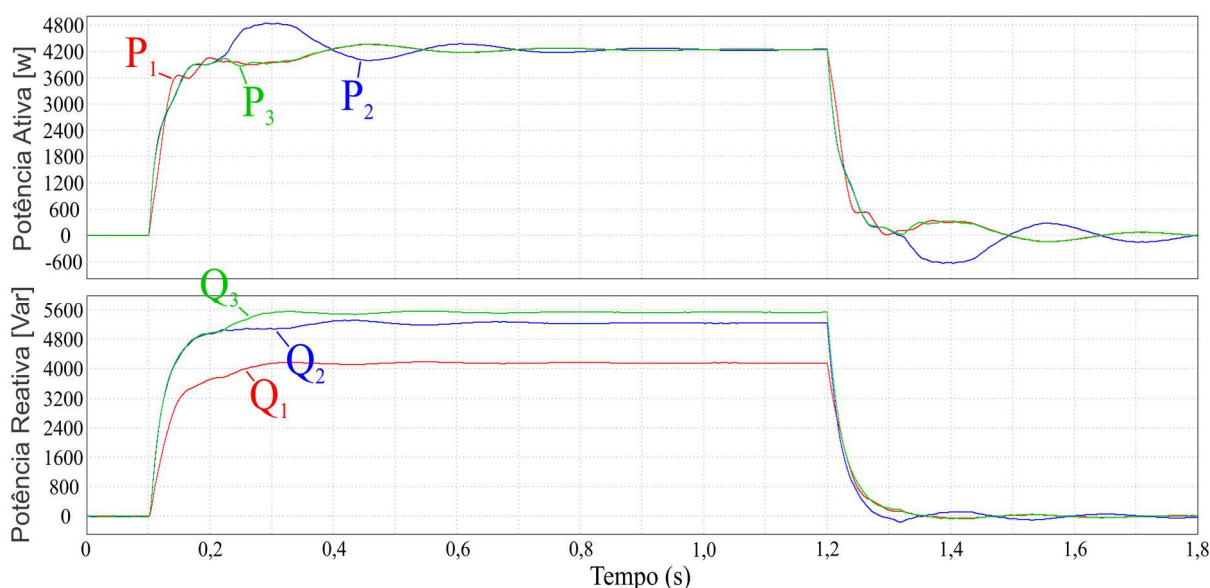
Novamente, as sobretensões e subtensões consideráveis aconteceram antes do início reação do CS, ou seja, não foram causadas pelo CS, que continuou restaurando de forma bem



amortecida as tensões e frequência durante toda sua atuação, que é a partir dos 200 ms para a entrada de carga e dos 820 ms para a saída da carga. Quase a totalidade das oscilações dinâmicas percebidas foram antes da atuação do CS, sendo então causadas pela dinâmica elétrica da MR e do controle primário. Por exemplo, na Figura 4.8, as oscilações na frequência praticamente zeraram a partir do início da atuação do CSF, aos 200 ms (100 ms após o degrau de carga). De acordo com o esperado, a média das tensões ficou exatamente em 225V, conforme Figura 4.8.

Mantendo os mesmos parâmetros do caso 2 e mudando a topologia da rede de dados para a mínima (caso 2c), a Figura 4.9 traz os resultados de potência ativa e reativa de saída das UGs e a Figura 4.10 mostra o comportamento das frequências e tensões. Como no caso 1c, o tempo total de simulação e o de retirada de carga foram aumentados para 1,8s e 1,2s, respectivamente, devido à nova dinâmica do sistema.

Figura 4.9 - Potências ativa e reativa de saída para o caso 2c



Fonte: o autor, 2018.

Comparando a Figura 4.9 (2c) e a Figura 4.10 (2c) com as figuras do caso 2b, é possível verificar a alteração dinâmica causada pelo CS, já que a alteração na rede de dados o afeta exclusivamente. Como ocorreu no caso 1c (em relação ao 1b), houve notável redução no amortecimento das potências ativas enquanto que para as potências reativas tal redução foi muito pequena. As oscilações antes da resposta do controle secundário são praticamente inalteradas. O caso 2c possui, teoricamente, a pior dinâmica de todos, pois carrega duas condições que reduzem o amortecimento: impedâncias pequenas (caso 2), o que afeta o controle primário, e a rede de dados mínima (subcaso b), que afeta o CS.

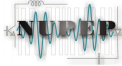
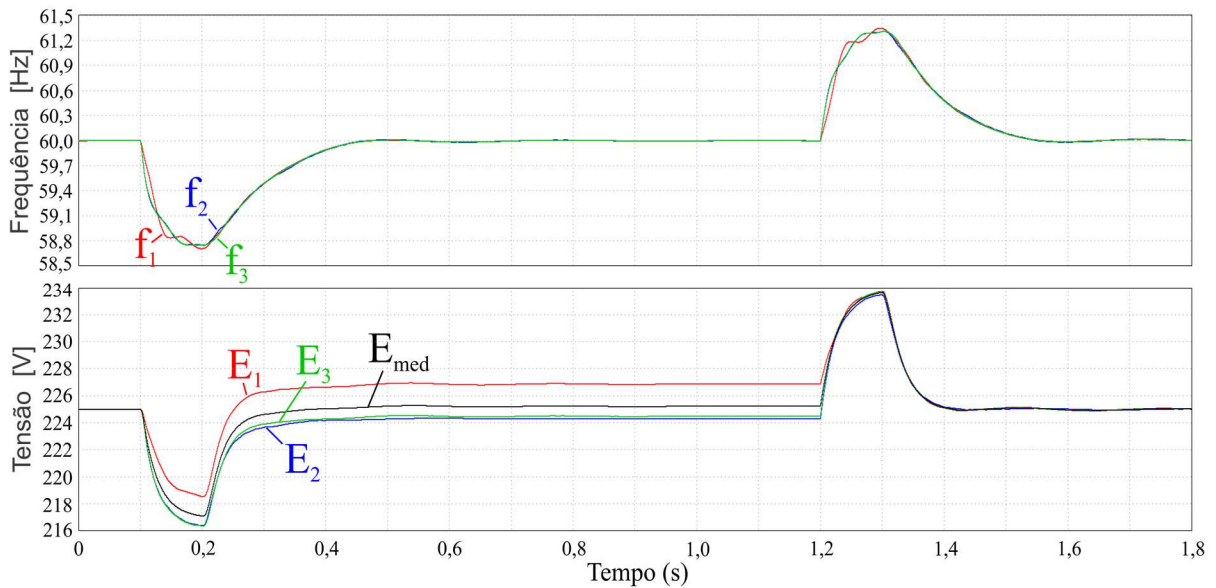


Figura 4.10 - Frequências e tensões para o caso 2c



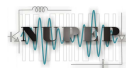
Fonte: o autor, 2018.

Comparando a Figura 4.10 (2c) com a Figura 4.6 (1c), nota-se uma diferença praticamente nula no comportamento dinâmico das frequências e tensões, mesmo que as impedâncias de linha tenham sido consideravelmente reduzidas (caso 2).

Comparando a Figura 4.10 (2c) com a Figura 4.8 (2b), pode-se verificar o efeito da topologia mínima (subcaso c) da rede de dados na dinâmica das tensões e frequências, que também foi praticamente inexistente, diferentemente do que foi visto para as potências, sendo notável uma ligeira redução na velocidade de restauração da frequência ao se comparar, por exemplo, os valores no instante de $t = 0,4s$. Conforme já discutido na análise em regime permanente, há um pequeno desvio positivo de 230 mV no valor final da tensão média em relação ao valor de referência (225 V) com utilização da rede mínima.

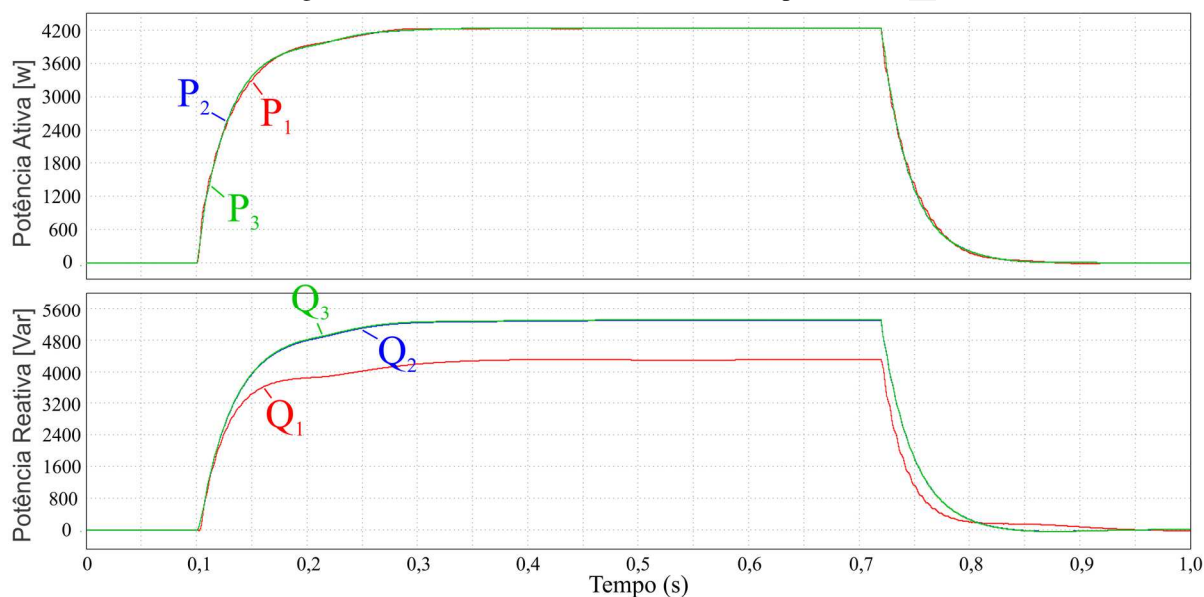
Os próximos resultados visam mostrar o efeito da inserção de impedâncias virtuais e do algoritmo para compensação da queda de tensão em regime permanente nelas (caso 4) em conjunto com o CS proposto utilizando as duas topologias de rede de dados (subcasos b e c). O objetivo é mostrar que a contribuição dinâmica da impedância virtual permanece, mesmo com a compensação em regime permanente e que a dinâmica da impedância virtual e da compensação não conflita com a do CS.

A Figura 4.11 exibe os resultados das potências ativa e reativa para o caso 4b (Impedâncias de linha do caso 2, impedâncias virtuais do caso 3 e com a compensação total da queda de tensão nas impedâncias virtuais – CST proposto com rede de dados completa). Comparando a referida figura com a Figura 4.7 (2b), verifica-se que os valores de regime



permanente são os mesmos que no caso 2b, pois a queda de tensão em regime nas impedâncias virtuais foi cancelada. Porém, o 4b apresenta uma redução considerável das oscilações nas potências ativas, devido ao amortecimento gerado pelas impedâncias virtuais. Adicionalmente, as três UGs passaram a apresentar dinâmica muito similares, mesmo que a impedância física da linha de transmissão da UG 1 seja de metade do valor das demais.

Figura 4.11 - Potências ativa e reativa de saída para o caso 4b



Fonte: o autor (2018).

Para os casos 1 e 2, as amplitudes das tensões de saída das UGs foram obtidas diretamente da saída da equação (3.2) de cada UG. Já no caso 4, a dificuldade de apresentação das amplitudes é maior, pois tensão de saída deixa de ser ditada somente por (3.2) pela inclusão da queda de tensão instantânea na impedância virtual. Desse modo, as tensões instantâneas dos terminais de saída das UGs devem ser mostradas, e por serem senoidais, a visualização da variação de suas amplitudes é um pouco mais difícil.

A Figura 4.12 mostra, ainda para a situação 4b, o resultado das frequências (na parte superior), as tensões de fase instantâneas de saída das UGs (na parte central) e a média dos valores eficazes das tensões de saída, calculados por filtros passa baixa de primeira ordem sintonizados em 6Hz. Nos casos anteriores o cálculo da média não necessitava de filtro, pois era calculada a partir da média algébrica das amplitudes, extraídas conforme explicado.

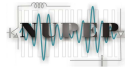
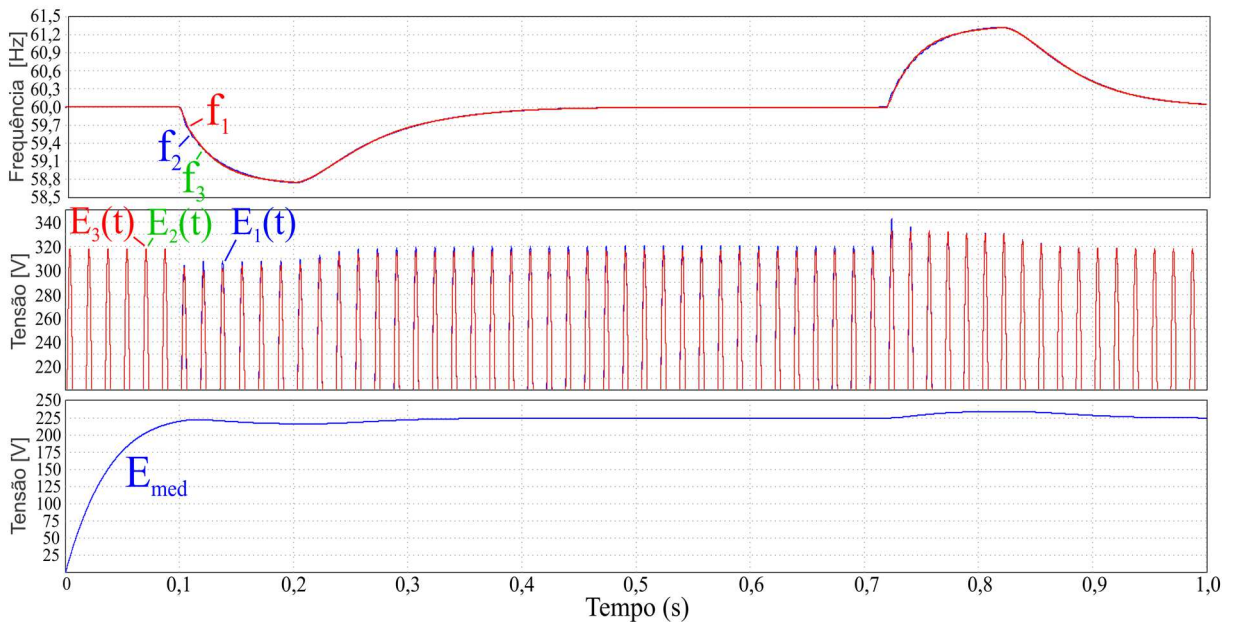


Figura 4.12 - Frequências e tensões para o caso 4b



Fonte: o autor (2018).

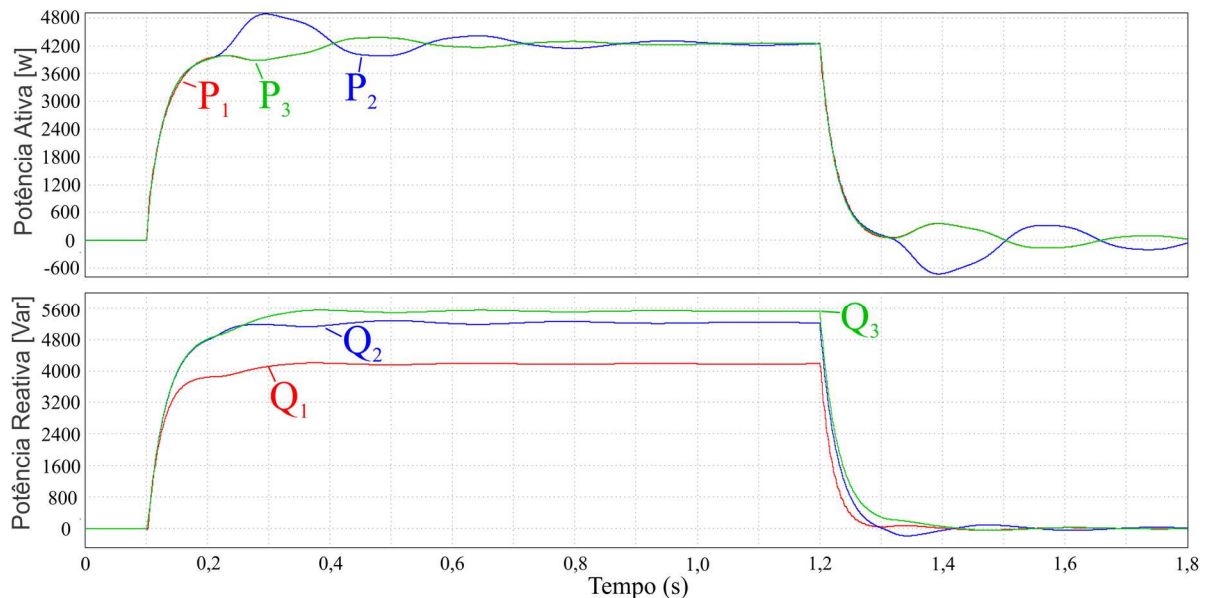
Para o caso 4b, o resultado para as frequências (Figura 4.12) pode ser considerado livre de oscilações, diferentemente do caso 2b (Figura 4.8), mostrando um bom amortecimento através da inserção das impedâncias virtuais. O valor de pico das tensões apresenta variações expressivas somente entre o momento do chaveamento da carga e início da resposta do controle secundário e o valor da média das tensões é regulado precisamente em 225 V, o que mostra a eficácia das compensações da queda de tensão devido ao controle primário pelo CST e da queda de tensão nas impedâncias virtuais por (3.34). O tempo de restauração do CS permaneceu próximo ao dos casos anteriores.

Trocando a topologia da rede de dados para mínima, a Figura 4.13 exibe as potências ativa e reativa de saída das UGs para o caso 4c. Comparando o comportamento das potências da Figura 4.13 (4c) com a Figura 4.11 (4b) para verificação do efeito da alteração da topologia da rede de dados de completa para mínima, nota-se que houve redução no amortecimento das potências, especialmente a ativa, muito similarmente ao que também apareceu na comparação entre os subcasos b e c dos casos 1 e 2.

Comparando a Figura 4.13 (4c) agora com a Figura 4.9 (2c), pode-se verificar que a inserção das impedâncias virtuais proporcionou uma redução quase completa das oscilações de alta frequência que eram visíveis no caso 2c nos momentos em que o CS ainda não havia reagido, que são causadas pela dinâmica do controle primário em conjunto com a dinâmica elétrica da MR. Já a respeito das oscilações de maior amplitude e menor frequência, que aparecem em ambas figuras após o início da atuação do CS, verifica-se que elas foram pouco

afetadas entre os casos 2c e 4c, indicando que a impedância virtual contribuiu pouco nesse aspecto.

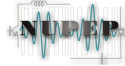
Figura 4.13 - Potências ativa e reativa de saída para o caso 4c



Fonte: o autor (2018).

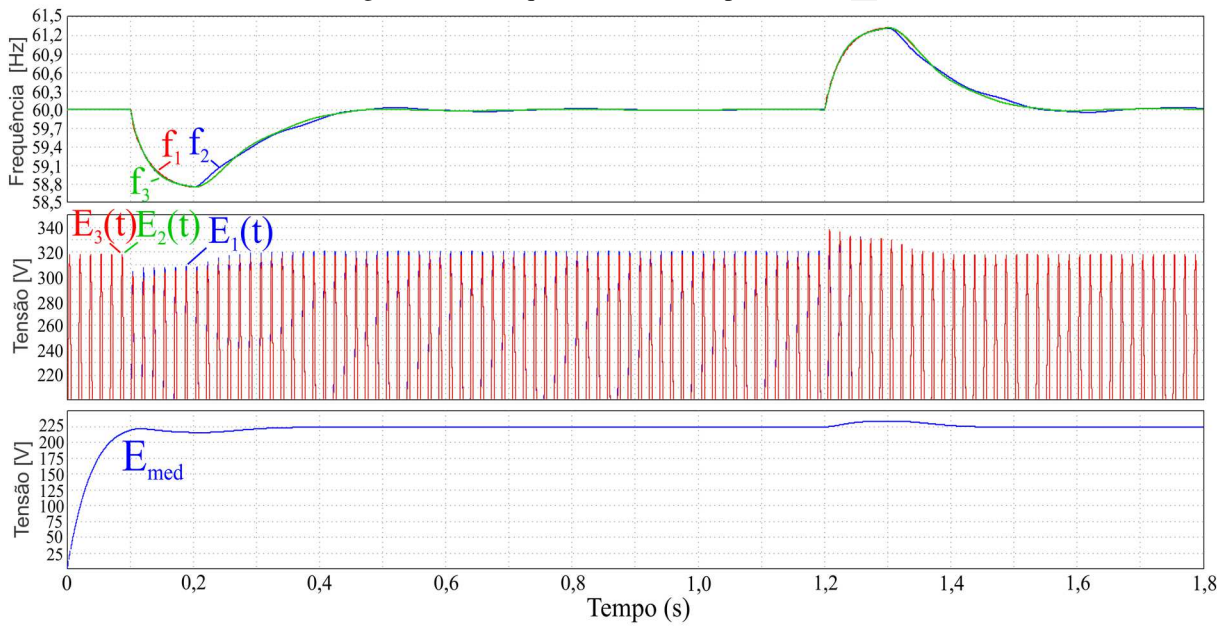
Ainda sobre a situação 4c, a Figura 4.14 apresenta os resultados para as frequências e tensões. Comparando com a Figura 4.12 (4b), nota-se uma pequena redução do amortecimento nas frequências, especialmente para a UG 2, que é aquela que conta com dois *links* de comunicação e as demais com apenas um. Há também um pequeno aumento no tempo total de restauração após o atraso da rede de dados, que passa a ser de cerca de 250 ms, enquanto que com a rede de dados completa (4b) foi de cerca de 200 ms, ou seja, a convergência do consenso é um pouco mais lenta com menos conexões. Novamente, a visível redução no amortecimento da potência ativa (do subcaso c em relação ao subcaso b) teve efeito quase desprezível no comportamento das frequências e tensões.

Comparando o resultado da Figura 4.14 (4c) com aqueles da Figura 4.10 (2c), também se confirma o efeito de amortecimento através das impedâncias virtuais, pois as oscilações presentes na frequência, por exemplo de $t = 100\text{ms}$ até $t = 200\text{ms}$, foram consideravelmente amortecidas no caso 4c. Isso reforça a dedução de que a restauração por (3.34) tem efeito apenas em regime permanente.



4. Resultados para UGs de Capacidades Nominais Iguais

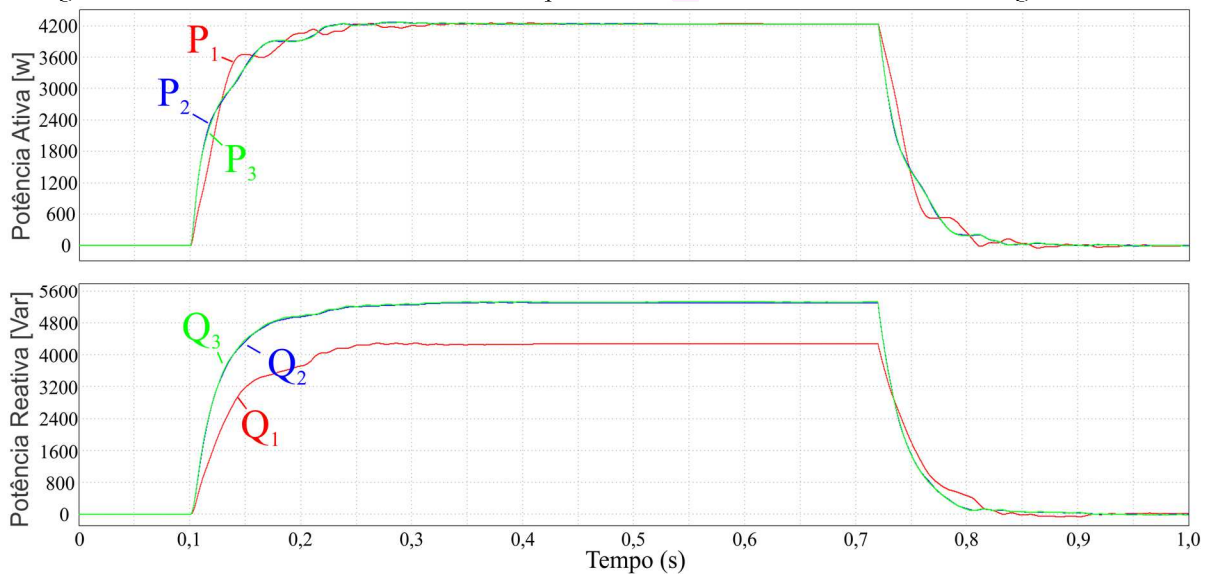
Figura 4.14 - Frequências e tensões para o caso 4c



Fonte: o autor, 2018.

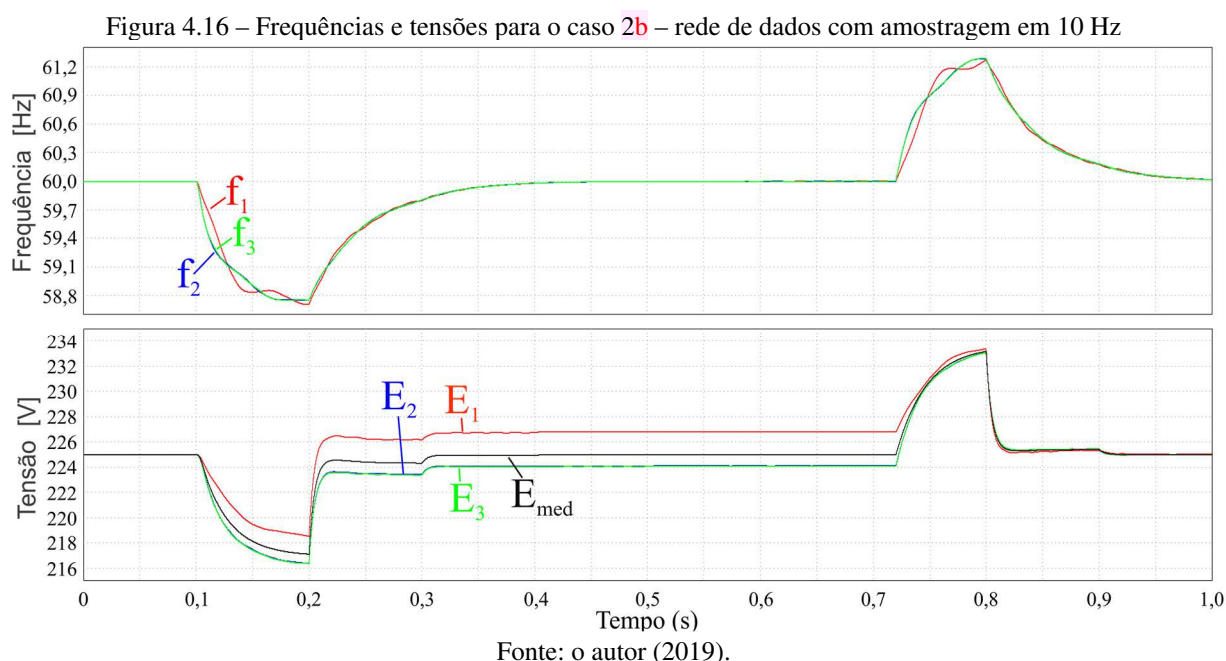
Já que a rede de dados implementada na prática é um sistema digital, para verificar uma situação mais realista, a rede de dados foi convertida para o domínio discreto com amostragem de 10 Hz utilizando *Zero Order Hold*. Em [17], uma taxa de amostragem de 50 Hz foi testada para o CSF no qual o CS deste trabalho se baseou. O caso escolhido para teste foi o 2b. A Figura 4.15 mostra os resultados das potências e a Figura 4.16, o resultado das tensões e frequências para a rede com taxa de amostragem em 10 Hz.

Figura 4.15 – Potências ativa e reativa de saída para o caso 2b – rede de dados com amostragem em 10 Hz



Fonte: o autor (2019).

Comparando a Figura 4.15 (2b – rede de dados com amostragem em 10 Hz) com a Figura 4.7 (2b original), verifica-se que a inclusão da taxa de amostragem não exerceu nenhuma influência significativa nas curvas de potência ativa. Já para a potência reativa, houve um ligeiro aumento nas oscilações nos primeiros centésimos de segundos da atuação do CS, mas elas continuam dentro de níveis muito aceitáveis.

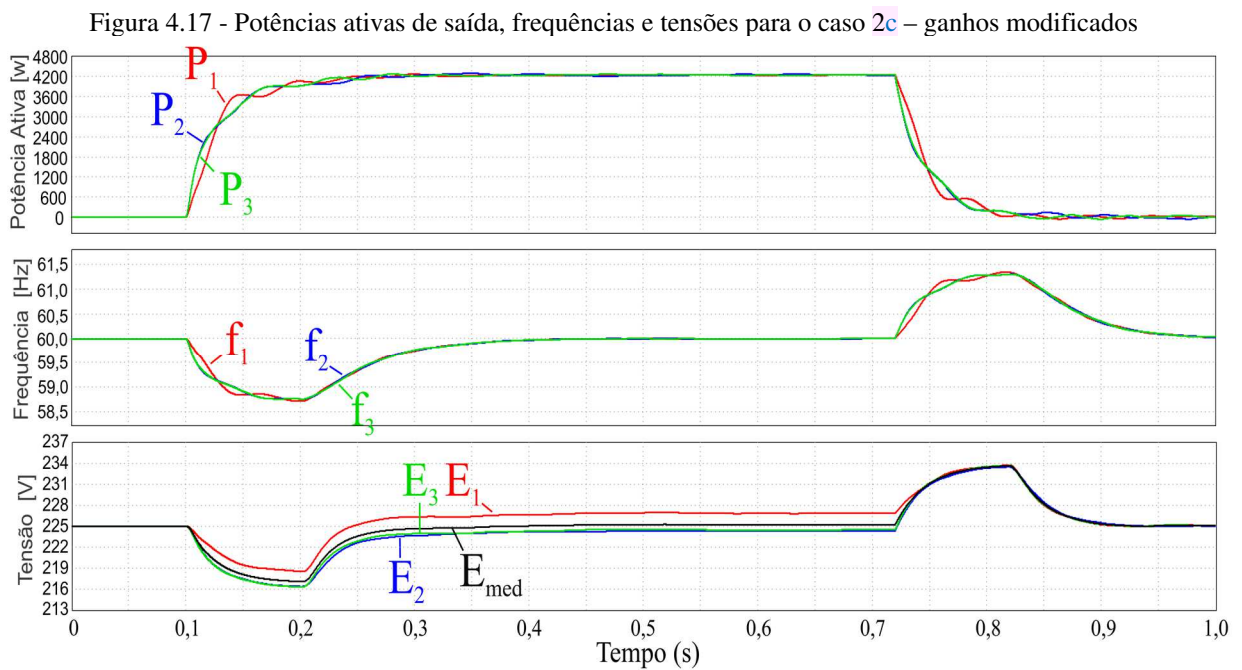


Comparando a Figura 4.16 (2b – rede de dados com amostragem em 10 Hz) com a Figura 4.8 (2b original), observa-se que a taxa de amostragem da rede de dados não causou alteração significativa no comportamento das frequências. Com as tensões, consegue-se perceber pequenas alterações nas curvas. Houve uma aceleração inicial na restauração das tensões até $t = 0,25s$. A partir disso, há uma desaceleração na atuação, e o processo termina por volta de $t = 0,41s$. Apesar da forma de onda das tensões terem sido alteradas ligeiramente, não houveram diferenças técnicas - o nível de oscilação e tempo final de acomodação permaneceram inalterados.

O foco agora passa para nas oscilações na potência ativa durante ação do CS, principalmente para a UG 2, que apareceram em todos subcasos c (rede mínima). Investigações foram feitas para entender o problema e mostraram que a principal causa é o fato da UG 2 ser um vértice de maior grau no grafo equivalente da rede mínima, implicando que atue de forma mais rápida na restauração em relação as demais UGs, sendo sobrecarregada transitoriamente. A solução é uma alteração dos ganhos da integral do CS fazendo uma compensação do fato dela possuir o dobro de ramos de comunicação que as demais.

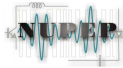
Nesse caso, originalmente os ganhos do CS foram escolhidos iguais para as três unidades. Há duas soluções para o problema: manter fixos os ganhos da UG 1 e 3 e reduzir os ganhos da UG 2; ou manter fixos os ganhos da UG 2 e aumentar os da UG 1 e UG 3. Ou seja, o importante é a relação entre os ganhos das unidades e não necessariamente o valor deles. A(s) unidade(s) com maior quantidade de dados recebidos deverá(ão) ter ganhos menores em relação às demais. A primeira solução pode trazer uma redução da velocidade de convergência do CS e a segunda pode trazer um aumento da velocidade.

Optou-se então, pelo aumento dos ganhos da UG 1 e UG 3, ficando: $k_{pr_1} = k_{pr_3} = 30$; $k_{qr_1} = k_{qr_3} = 200$; $k_{pr_2} = 12$ e $k_{qr_2} = 100$, ao invés de: $k_{pr_1} = k_{pr_2} = k_{pr_3} = 12$ e $k_{qr_1} = k_{qr_2} = k_{qr_3} = 100$. A Figura 4.17 mostra as potências ativas de saída das UGs, as frequências e as tensões, incluindo a média para essa nova situação que foi denominada de: “caso 2c - ganhos modificados”. A configuração elétrica da MR e da rede de dados são as mesmas do caso 2c. Comparando a Figura 4.17 (2c - ganhos modificados) com a Figura 4.9 (2c) e a Figura 4.13 (4c), pode ser verificado que a resposta melhorou fortemente, eliminando quase totalmente as oscilações apresentadas durante a restauração pelo CS.



Fonte: o autor (2018).

Comparando a Figura 4.17 com a Figura 4.10 também pode ser verificado que a velocidade de restauração das tensões e frequências foi pouco afetada pelo aumento dos valores de k_{pr_1} , k_{pr_3} , k_{qr_1} e k_{qr_3} uma explicação para isso é que a atuação do CS depende muito do

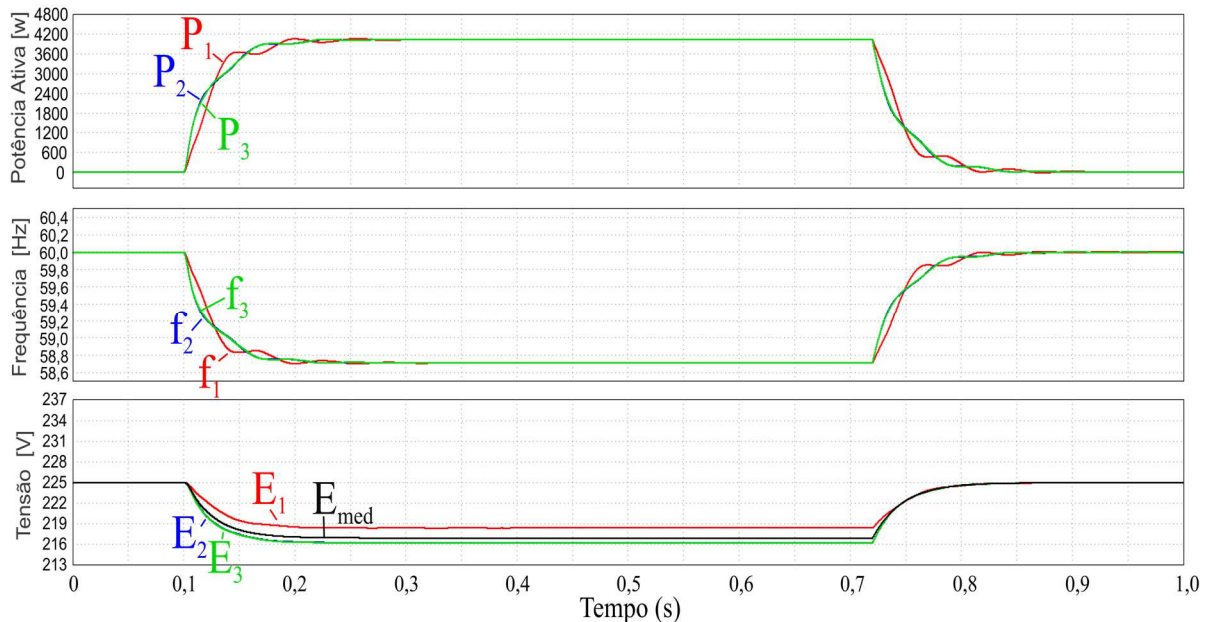


controle primário tendo sua velocidade de atuação limitada pelo DrC além da rede de dados. Portanto, sua velocidade de resposta é pouco sensível a elevações no ganho de suas integrais.

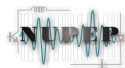
A Figura 4.18 exibe as mesmas variáveis com a mesma configuração do caso 2, com exceção para o CS, que foi totalmente removido (2a). Comparando a Figura 4.18 com todas as anteriores relativa às situações 1b e 2b, fica comprovado que grande parte das oscilações vistas com a rede de dados na topologia completa (subcasos b), principalmente para o caso 2 (sistema sem impedância virtual e com linhas elétricas de impedância pequena), não são causadas pelo CS.

Para a situação de topologia mínima (subcasos c), comparando a Figura 4.18 (2c - sistema apenas com controle primário) com a Figura 4.17 (2c - sistema com ganhos do CS modificados) e com a Figura 4.10 (2c original), confirma-se que as oscilações antes da atuação do CS são presentes mesmo no sistema operando apenas com controle primário. Já para as oscilações durante a atuação do CS, confirma-se que realmente foram devidas ao CS operando com rede de dados mínima, mas foram praticamente eliminadas com a alteração dos ganhos discutida (Figura 4.17).

Figura 4.18 - Potências ativas, frequências e tensões para sistema do caso 2a



Fonte: o autor (2018).



4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

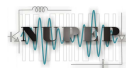
Inicialmente, o comportamento em regime permanente do sistema com três UGs de mesma potência foi analisado para 19 situações diferentes, variando diversos aspectos do controle da MR e as impedâncias de linha, para melhor compreensão do funcionamento do CS proposto e sua interação com o controle primário. Os resultados de regime permanente mostraram que a estratégia trouxe resultados positivos em todas as situações analisadas e restaurou a tensão e frequência nos barramentos a valores adequados, mesmo com forte variação no carregamento de potência reativa, sem prejuízo na distribuição de potência.

A restauração da média das tensões de saída foi sempre exata para a topologia de rede de dados completa e com a estratégia de compensação da queda de tensão nas impedâncias virtuais (nas situações em que elas foram utilizadas). Com a rede de dados mínima, a regulação da tensão foi aproximada, com desvios na ordem de centésimos de volt, sendo menor quanto mais próximas forem as potências reativas de saída das UGs.

Os resultados dinâmicos foram mostrados para as situações 1b, 1c, 2b, 2c, 4b, 4c e, no final, uma situação especial do caso 2c modificado, com os ganhos do CS alterados para maior amortecimento. Os resultados mostraram uma boa robustez do CS. As curvas de frequências e tensões tiveram comportamento bem amortecido durante a restauração feita pelo CS, especialmente as tensões. Já para as potências, foram verificadas algumas situações subamortecidas, sendo que grande parte das oscilações vistas não foram causadas pelo CS, estando presentes mesmo sem sua utilização ou em momentos que este não está reagindo.

A maior influência do CS na dinâmica do sistema foi verificada para topologia de rede de dados mínima, onde ocorreu uma redução considerável no amortecimento da potência ativa e uma redução quase insignificante no amortecimento da potência reativa. As curvas das frequências e tensões não sofreram alterações consideráveis. Ao final, isso foi mostrado ser facilmente contornável, bastando reduzir os ganhos do CS (k_{pr_n} e k_{qr_n}), da(s) enésima(s) UG(s) que esteja(m) sofrendo tais oscilações - que é/são aquela(s) que se comunica(m) com uma maior quantidade de UGs vizinhas - em relação aos ganhos das demais. Isso pode ser feito tanto reduzindo-se os ganhos das UGs em questão quanto aumentando os demais, já que é a relação entre eles que mais importa nesse contexto.

As diferenças vistas entre o grau de amortecimento dos diferentes estados do sistema chamam a atenção para o fato de que a análise dinâmica da MR não deve ser feita apenas através

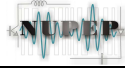


de um ou outro estado, pois o fato de uma variável não mostrar oscilações significativas não garante que não haja(m) outra(s) com forte comportamento oscilatório.

Pela comparação dos resultados dinâmicos dos casos 1, 2 e 4, também pode-se verificar que o grau de amortecimento e velocidade de atuação e frequência das oscilações do controle primário depende consideravelmente das impedâncias (físicas e virtuais), conforme já discutido na literatura. Entretanto, tais impedâncias tiveram efeito desprezível na velocidade de restauração das tensões e frequências pelo CS. Nesse aspecto, a linha de dados é que cumpre papel notável, comparando-se os resultados dos subcasos b e c.

Em uma segunda versão do caso 2b, a rede de dados – que estava sendo simulada no domínio de tempo contínuo é substituída por uma rede operando no domínio discreto, com taxa de amostragem de 10 Hz. Não houveram alterações tecnicamente relevantes nos resultados com a discretização da comunicação. Isso indica que o CS proposto precisa de cerca de apenas duas amostras de potência recebidas para realizar sua atuação quase totalmente e realmente não exige muito da rede de dados.

É importante ressaltar que o tratamento hierárquico pressupõe que o CS será mais lento que o primário. Logo, nos primeiros milésimos de segundo após uma perturbação, as variações nas tensões e frequências são devidas ao controle primário e o CS nada pode fazer. Eventual limitação da magnitude de tal variação transitória deve ser feita através do projeto dos controles primário e interno.



5. RESULTADOS PARA UGS DE CAPACIDADES NOMINAIS DIFERENTES

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo visa mostrar o funcionamento do sistema para UGs de capacidades distintas, verificando a regulação de frequência e tensão e a distribuição equitativa de potência. A MR será considerada composta por três UGs trifásicas sendo suposto que a unidade 1 deverá assumir metade da potência ativa e reativa da unidade 2 e que a unidade 3 deverá assumir 25% a mais que a unidade 2. As faixas consideradas adequadas em regime permanente continuam sendo de 202 a 231 V, para tensão de fase, e 59,9 a 60,1 Hz para a frequência [74].

O controle primário utilizado continua seguindo as equações (2.1) e (2.2), e o controle secundário as equações (3.3) e (3.11), todos distribuídos nas três UGs. Novamente, os três inversores são considerados fontes ideais de tensão controlada. Na Tabela 5.1 os parâmetros gerais do sistema são mostrados, sendo similares aos do capítulo anterior. A potência nominal total da carga continua sendo de 12,8 kW - 14,4 kVar - 19,3 kVA.

Tabela 5.1 - Parâmetros gerais do sistema simulado

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão de equilíbrio de referência (fase)	E_0	225	V
Classe de tensão nominal (fase/linha)	V_{no}	220/380	V
Frequência de equilíbrio de referência	ω_0	$2\pi 60$	rad/s
Freq. de corte do filtro das potências	ω_f	$2\pi 6$	rad/s
Resistência equivalente da carga (por fase)	R_L	5	Ω
Indutância equivalente da carga (por fase)	L_L	15	mH
Capacidade nominal da UG 1	P_{no_1}, Q_{no_1}	0,5	p.u.
Capacidade nominal UG 2	P_{no_2}, Q_{no_2}	1,0	p.u.
Capacidade nominal da UG 3	P_{no_3}, Q_{no_3}	1,25	p.u.
Ganho do CSF	$k_{pr_{123}}$	12	W/s
Ganho do CST	$k_{qr_{123}}$	100	Var/s
Atraso de tempo da comunicação	t_d	100	ms

Fonte: o autor (2018).



5.2 CASOS DE ESTUDO

Os estudos foram realizados envolvendo diferentes situações com relação

- Aos valores das linhas elétricas: **iguais** (LI) ou **diferentes** (LD);
- Aos coeficientes de inclinação do controle primário (k_{p_n} e k_{v_n}): **iguais** (cI), **balanceados** (cB) ou **balanceados e reduzidos** (cR);
- À topologia da rede de dados: Rede **mínima** (RM) ou Rede **completa** (RC).

Os valores de impedâncias das linhas elétricas para as duas situações são mostrados na Tabela 5.2. Observar que os valores das impedâncias deste capítulo são diferentes dos valores utilizados no capítulo anterior, de forma intencional, para maior grau de generalização do estudo. Ao todo, no trabalho, foram utilizados cinco conjuntos consideravelmente distintos de valores de impedância para as linhas elétricas, além da impedância virtual, que foi inserida em alguns resultados.

Os valores dos coeficientes k_{p_n} e k_{v_n} , para as três situações, são mostrados na Tabela 5.3. Na situação cB, os coeficientes são balanceados conforme as capacidades de potência de acordo com (2.8) e (2.9), em que C_1 e C_2 foram escolhidos de forma com que a média dos três coeficientes seja igual a 0,002. Ou seja, a média dos coeficientes na situação cB é igual aos coeficientes na situação cI, para que as duas dinâmicas sejam próximas. A situação cR significa que os coeficientes foram reduzidos, valendo metade dos valores da situação cB.

Tabela 5.2 - Impedâncias das linhas elétricas para cada situação

Situação	Parâmetros das Linhas					
	R_1 [Ω]	R_2 [Ω]	R_3 [Ω]	L_1 [mH]	L_2 [mH]	L_3 [mH]
LI	0,13	0,13	0,13	7,5	7,5	7,5
LD	0,11	0,13	0,15	7,5	8,8	6,0

Fonte: o autor (2018).

Tabela 5.3 - Coeficientes de inclinação do controle primário para cada situação

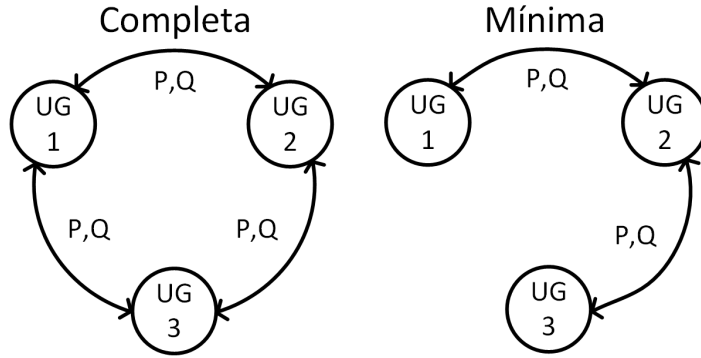
Situação	Coeficientes do <i>Droop Control</i>		
	k_{p_1} e k_{v_1}	k_{p_2} e k_{v_2}	k_{p_3} e k_{v_3}
cI	0,002	0,002	0,002
cB	0,003158	0,001579	0,001263
cR	0,001579	0,0007895	0,0006315

Fonte: o autor (2018).



A configuração topológica da rede de dados, aqui lembrada na Figura 5.1, é exatamente igual à do capítulo anterior, valendo os mesmos comentários já realizados.

Figura 5.1 - Topologias consideradas para a rede de dados



Fonte: o autor (2018).

Nos resultados que serão apresentados a seguir, são mostrados o valor da frequência do sistema, as amplitudes das tensões de saída das UGs (E_1 , E_2 e E_3), a amplitude da tensão no barramento de carga (E_c), o desvio ($\Delta \bar{E}$) entre a média das tensões E_1 , E_2 e E_3 e a referência E_0 (em volts) e, finalmente, os desvios percentuais (DP_n e DQ_n) entre as potências fornecidas por cada unidade e os valores que deveriam fornecer, quantificando a distribuição de potências.

DP_n é dado pela equação (5.1), em que P_n^* é dado por (5.2) conforme as capacidades de cada UG, representando a potência que a UG deveria estar fornecendo, que é uma parcela fixa da potência total, que é variável. A definição de DQ_n é análoga e está indicada nas mesmas equações.

$$DP_n[\%] = \frac{P_n - P_n^*}{P_n^*} \cdot 100 \quad (5.1)$$

$$DQ_n[\%] = \frac{Q_n - Q_n^*}{Q_n^*} \cdot 100$$

$$\begin{cases} P_1^* = 0,1818 \cdot (P_1 + P_2 + P_3) \\ P_2^* = 0,3636 \cdot (P_1 + P_2 + P_3) \\ P_3^* = 0,4545 \cdot (P_1 + P_2 + P_3) \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\begin{cases} Q_1^* = 0,1818 \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3) \\ Q_2^* = 0,3636 \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3) \\ Q_3^* = 0,4545 \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3) \end{cases}$$



5.3 RESULTADOS SEM CONTROLE SECUNDÁRIO

Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados de simulação, em regime permanente, para o sistema contendo apenas o controle primário, tendo os valores de P_{ref_n} e Q_{ref_n} mantidos zerados para todas as unidades, de modo que a frequência e tensão de saída a vazio de todas unidades sejam iguais a ω_0 e E_0 . Os coeficientes k_{p_n} e k_{v_n} são balanceados (cB) visando distribuição de potência. Os resultados são mostrados para linhas elétricas com impedâncias idênticas (LI) ou diferentes (LD).

Tabela 5.4 - Resultados para MR apenas com controle primário - k_{p_n} e k_{v_n} balanceados (cB)

Linhas elétricas	Freq. [Hz]	DP ₁ [%]	DP ₂ [%]	DP ₃ [%]	DQ ₁ [%]	DQ ₂ [%]	DQ ₃ [%]	E ₁ [V]	E ₂ [V]	E ₃ [V]	$\Delta \bar{E}$ [V]	E _c [V]
LI	59,01	0,0	0,0	0,0	59,8	-4,7	-20,2	217,57	220,57	221,29	-5,19	199,88
LD	59,00	0,0	0,0	0,0	56,2	-17,6	-8,4	217,74	221,17	220,74	-5,12	200,50

Fonte: o autor (2018).

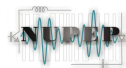
Os resultados da Tabela 5.4 confirmam que, mediante balanceamento dos coeficientes, o controle primário por DrC convencional é capaz de distribuir perfeitamente a potência ativa e incapaz de distribuir a potência reativa com precisão. Os valores da frequência e da tensão no barramento de carga ficam abaixo dos adequados. Uma forma de reduzir a queda nas tensões e na frequência, é a escolha de coeficientes menores para o controle primário, conforme visto no capítulo 2. Essa é a situação cR, em que os coeficientes, que continuam balanceados, são reduzidos pela metade. A Tabela 5.5 mostra os resultados para a situação reduzida dos coeficientes do controle primário (cR) e com as linhas elétricas diferentes (LD) e iguais (LI).

Tabela 5.5 - Resultados para MR apenas com controle primário - k_{p_n} e k_{v_n} reduzidos (cR)

Linhas elétricas	Freq. [Hz]	DP ₁ [%]	DP ₂ [%]	DP ₃ [%]	DQ ₁ [%]	DQ ₂ [%]	DQ ₃ [%]	E ₁ [V]	E ₂ [V]	E ₃ [V]	$\Delta \bar{E}$ [V]	E _c [V]
LI	59,50	0,0	0,0	0,0	69,1	-6,2	-22,7	220,99	222,77	223,17	-2,7	202,04
LD	59,49	0,0	0,0	0,0	65,2	-19,9	-10,1	221,08	223,1	222,87	-2,6	202,64

Fonte: o autor (2018).

Comparando os resultados da Tabela 5.5 com os da Tabela 5.4, é confirmado que a redução dos coeficientes leva a desvios menores de frequência e tensão. A tensão retorna para os limiares adequados, mas a frequência não. O problema é que a distribuição de potência reativa, que já era pobre, ficou ainda pior com a redução. Essa é a relação de compromisso que



os coeficientes k_{v_n} possuem entre regulação de tensão e precisão na distribuição de potência reativa, comentada no capítulo 2.

5.4 RESULTADOS COM CONTROLE SECUNDÁRIO

Seguindo o desenrolar natural da pesquisa, o sistema foi simulado com o controle secundário proposto pelas equações (3.3) e (3.11) e com os coeficientes do controle primário balanceados (cB), almejando a distribuição equitativa de potência pelo controle primário, como é convencionado.

A Tabela 5.6 mostra os resultados para tal situação, variando a topologia da rede de dados e a situação das linhas elétricas, mantendo os coeficientes do controle primário balanceados (cB) e o CS de (3.3) e (3.11). A frequência foi restaurada com precisão em todas as situações. Todavia, apareceram desvios elevados na distribuição da potência ativa, que antes eram nulos. Isso foi devido ao fato de que as potências ativas das três unidades passaram a ser iguais em todas as situações, devido à atuação do CS, mesmo com os coeficientes de inclinação do DrC diferentes - balanceados (cB). A distribuição de potência reativa também piorou em comparação com o sistema operando sem o CS.

Tabela 5.6 - Resultados para sistema com controle secundário sem pesos - k_{p_n} e k_{v_n} balanceados (cB)

Situação		Resultados											
Linhas elétricas	Rede de dados	Freq. [Hz]	DP ₁ [%]	DP ₂ [%]	DP ₃ [%]	DQ ₁ [%]	DQ ₂ [%]	DQ ₃ [%]	E ₁ [V]	E ₂ [V]	E ₃ [V]	$\Delta \bar{E}$ [V]	E _c [V]
LI	RC	60,00	83,4	-8,30	-26,70	83,40	-8,30	-26,70	225,00	225,00	225,00	0,00	204,44
LI	RM	60,00	83,4	-8,30	-26,70	83,40	-8,30	-26,70	225,00	225,00	225,00	0,00	204,44
LD	RC	60,00	83,4	-8,30	-26,70	80,70	-19,90	-16,30	225,19	225,84	224,25	0,10	205,00
LD	RM	60,00	83,4	-8,30	-26,70	76,06	-18,73	-15,42	224,35	225,75	224,06	-0,28	204,67

Fonte: o autor (2018).

Observando os resultados da primeira e segunda linha da Tabela 5.6, pode ser visto que na condição das linhas elétricas iguais (LI), as potências reativas de todas as UGs ficam iguais (pode ser comprovado testando a condição de $Q_1 = Q_2 = Q_3$ em (5.1) e (5.2) e comparando os três valores obtidos para DQ_n [%] com os apresentados na Tabela 5.6), sendo um dos casos de distribuição precisa de potência reativa pelo DrC convencional. Isso faz com que a média das tensões fique exatamente igual à referência e que as tensões de saída das três UG sejam iguais, independentemente da condição da rede de dados, conforme equações (3.14) e (3.16).



5. Resultados para UGs de Capacidades Nominais Diferentes

Ainda na Tabela 5.6, a regulação das tensões foi efetiva, restaurando a tensão no barramento de carga para a faixa adequada em todas situações, mesmo quando a regulação da média não foi exata (3ª e 4ª linhas).

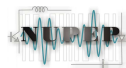
Visando resolver o problema causado na distribuição de potência, o controle secundário incluindo pesos de acordo com as capacidades de potência foi proposto, representado pelas equações (3.35) e (3.36). A Tabela 5.7 mostra os resultados utilizando o CS com pesos e a rede de dados com topologia completa (RC). A variação feita nos resultados é em relação às impedâncias das linhas elétricas (LI ou LD) e os coeficientes do controle primário (cI ou cB), que foram feitas de forma separada para k_{v_n} e k_{p_n} . Para todas as condições, a distribuição de potência ativa voltou a ficar precisa e a frequência foi restaurada completamente, mostrando total independência (em regime) de tais variáveis com os parâmetros que foram variados.

Tabela 5.7 - Resultados para o sistema com controle secundário com pesos - rede de dados completa (RC)

Situação			Resultados											
Linhas elétricas	k_{v_n}	k_{p_n}	Freq. [Hz]	DP ₁ [%]	DP ₂ [%]	DP ₃ [%]	DQ ₁ [%]	DQ ₂ [%]	DQ ₃ [%]	E ₁ [V]	E ₂ [V]	E ₃ [V]	$\Delta \bar{E}$ [V]	E _c [V]
LI	cB	cB	60,00	0,0	0,0	0,0	52,5	-3,6	-18,1	221,93	226,01	227,06	0,00	204,37
LI	cB	cI	60,00	0,0	0,0	0,0	52,5	-3,6	-18,1	221,93	226,01	227,06	0,00	204,37
LI	cI	cB	60,00	0,0	0,0	0,0	54,1	-5,6	-17,1	222,97	226,49	228,20	0,89	205,18
LI	cI	cI	60,00	0,0	0,0	0,0	54,1	-5,6	-17,1	222,97	226,49	228,20	0,89	205,18
LD	cB	cB	60,00	0,0	0,0	0,0	49,2	-15,7	-7,1	222,06	226,78	226,16	0,00	204,94
LD	cB	cI	60,00	0,0	0,0	0,0	49,2	-15,7	-7,1	222,06	226,78	226,16	0,00	204,94
LD	cI	cB	60,00	0,0	0,0	0,0	51,3	-16,5	-7,3	223,05	227,38	226,90	0,78	205,66
LD	cI	cI	60,00	0,0	0,0	0,0	51,3	-16,5	-7,3	223,05	227,38	226,90	0,78	205,66

Fonte: o autor (2018).

Verifica-se que as oito linhas da Tabela 5.7, podem ser divididas em apenas quatro pares distintos, mostrado que a variação dos k_{p_n} não causou diferença alguma. O primeiro e o terceiro par de resultados na Tabela 5.7 (contando de cima para baixo) compartilham da situação de k_{v_n} balanceados (cB) e ambos apresentaram regulação precisa da média das tensões pelo CST, independentemente das impedâncias das linhas elétricas serem iguais (LI) ou diferentes (LD). Já o segundo e quarto par, que compartilham da situação de k_{v_n} iguais (cI), apresentaram um pequeno desvio na regulação da média das tensões e desvios na distribuição de potência reativa maiores em relação ao primeiro e terceiro pares, respectivamente. A situação das impedâncias das linhas elétricas teve pouco efeito no sistema.



Ressalta-se que, mesmo nas situações em que a regulação não foi exata, o CST restaurou a tensão no barramento de carga a níveis adequados (≥ 202 V) e a frequência de forma precisa, mantendo a distribuição de potência ativa também precisa. Comparando a primeira e a quinta linha da Tabela 5.7 com a primeira e a segunda linha da Tabela 5.4, respectivamente, verifica-se que houve uma melhora na distribuição de potência reativa ao utilizar o CS.

Na Tabela 5.8 são exibidos os mesmos resultados que a Tabela 5.7, com a diferença que a rede de dados passou para topologia mínima. Novamente, para todas as configurações a frequência foi precisamente regulada e a distribuição de potência ativa foi precisa. Os oito resultados também podem ser resumidos em quatro pares distintos, pois a situação dos coeficientes k_{v_n} (cI ou cB) não trouxe efeito em regime permanente. A regulação da média das tensões não foi exata em nenhuma situação, porém os desvios foram pequenos (menores que 0,6 volt) e a tensão no barramento de carga foi sempre restaurada para níveis adequados.

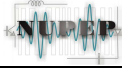
Tabela 5.8 - Resultados para sistema com controle secundário com pesos - rede de dados mínima (RM)

Situação			Resultados											
Linhas elétricas	k_{v_n}	k_{p_n}	Freq. [Hz]	DP ₁ [%]	DP ₂ [%]	DP ₃ [%]	DQ ₁ [%]	DQ ₂ [%]	DQ ₃ [%]	E ₁ [V]	E ₂ [V]	E ₃ [V]	$\Delta \bar{E}$ [V]	E _c [V]
LI	cB	cB	60,00	0,0	0,0	0,0	57,4	-2,1	-21,3	222,12	225,98	225,92	-0,33	204,07
LI	cB	cI	60,00	0,0	0,0	0,0	57,4	-2,1	-21,3	222,12	225,98	225,92	-0,33	204,07
LI	cI	cB	60,00	0,0	0,0	0,0	60,5	-3,1	-21,7	223,04	226,38	226,43	0,28	204,63
LI	cI	cI	60,00	0,0	0,0	0,0	60,5	-3,1	-21,7	223,04	226,38	226,43	0,28	204,63
LD	cB	cB	60,00	0,0	0,0	0,0	52,8	-13,5	-10,3	221,80	226,67	224,85	-0,56	204,36
LD	cB	cI	60,00	0,0	0,0	0,0	52,8	-13,5	-10,3	221,80	226,67	224,85	-0,56	204,36
LD	cI	cB	60,00	0,0	0,0	0,0	57,8	-13,4	-12,4	222,82	227,21	224,93	-0,01	204,82
LD	cI	cI	60,00	0,0	0,0	0,0	57,8	-13,4	-12,4	222,82	227,21	224,93	-0,01	204,82

Fonte: o autor (2018).

Comparando a primeira linha da Tabela 5.8 com a primeira da Tabela 5.7 e a quinta linha da Tabela 5.8 com a quinta da Tabela 5.7, verifica-se que a distribuição de potência reativa com a rede de dados mínima (RM) ficou um pouco pior em relação àquela com a rede completa (RC). Todavia quando comparada com a primeira e segunda linhas da Tabela 5.4, continuou existindo uma significativa melhoria em relação ao sistema operando somente com o controle primário.

Comparando o primeiro par de resultados da Tabela 5.8 com o segundo par, e o terceiro par com o quarto par, nota-se que a situação dos k_{v_n} iguais (cI) apresenta desvios maiores na



distribuição de potência reativa em relação àquela com k_{v_n} balanceados (cB), de forma similar ao ocorrido com a rede de dados completa (RC). Entretanto, os resultados da situação dos k_{v_n} balanceados (cB) apresentaram desvios na regulação da média maiores que os da situação de k_{v_n} iguais (cI), de forma oposta aos resultados para rede de dados completa (RC), em que k_{v_n} balanceados (cB) causaram regulação precisa da média das tensões, e k_{v_n} iguais (cI), não.

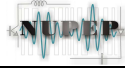
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O foco deste capítulo foi estudar a utilização do CS proposto em MRs com UGs de capacidade de potência diferentes. Como os resultados dinâmicos para UG de capacidades nominais idênticas já foram explorados, decidiu-se mostrar apenas resultados em regime permanente neste capítulo para limitação do tamanho do texto. Ressalta-se que os resultados acima mostrados foram extraídos diretamente de curvas obtidas de simulação no domínio do tempo e não se notou nenhum problema de estabilidade ou algum comportamento dinâmico que indique a necessidade de considerações diferentes daquelas feitas no capítulo anterior.

Foi confirmado que a distribuição de potência de forma proporcional às capacidades nominais deverá ser feita através de pesos no controle secundário, e não somente através do balanceamento das inclinações do DrC, como seria o método clássico em um sistema sem controle secundário.

O CST foi capaz de restaurar a tensões para faixas adequadas mesmo nas situações em que não teve desempenho ideal. Já o desempenho do CSF, foi preciso em todas as situações. Foi confirmado que a inclinação do *droop* de frequência (coeficiente k_{p_n}) das unidades deixou de exercer qualquer função em regime permanente no sistema. Já para os coeficientes k_{v_n} , tanto para impedâncias de linha iguais quanto distintas, os efeitos em regime permanente foram os seguintes:

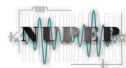
- Para rede de dados completa: com a utilização de k_{v_n} balanceados, a média das tensões dos nós de geração foi perfeitamente regulada pelo CST e a distribuição de potência reativa ficou melhor. Caso sejam igualados, há um pequeno desvio na média e piora na distribuição de potência reativa, que ainda continua superior àquela do sistema sem o CS;
- Para rede de dados mínima: a utilização de k_{v_n} balanceados também trouxe melhor distribuição de potência reativa em relação à utilização de k_{v_n} iguais. Porém, nesse caso a regulação da média da tensão ficou ligeiramente pior;



- Os valores dos k_{v_n} não exerceram efeito cruzado com a potência ativa ou frequência em nenhum caso (em regime permanente).

Para rede de dados mínima, a regulação de tensão não ficou exata em nenhuma situação. Todavia, os desvios em nenhum momento passaram de 1 volt. Em todas as condições, o CS melhorou a distribuição de potência reativa em relação ao sistema somente com controle primário.

Ainda que essa melhora não tenha sido tão expressiva em algumas situações, há também que se considerar uma contribuição adicional indireta, que não foi explicitamente mostrada: como visto, um aumento nos coeficientes k_{v_n} das UGs leva a melhor distribuição de potência reativa, com a desvantagem de maior variação na tensão, conforme exibido na Tabela 5.5. Inserindo o CST para restauro da tensão no sistema, k_{v_n} maiores podem passar a ser utilizados. Ou seja, o CS contribui para melhoria da distribuição de potência reativa por duas frentes distintas.



6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

6.1 CONCLUSÕES FINAIS

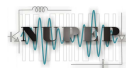
O trabalho iniciou com introdução ao controle de MRs, discutindo seus objetivos e limitações. A estrutura hierárquica foi apresentada, detalhando as funções e interações de cada camada. Foi feita uma revisão da literatura recente sobre os desenvolvimentos a respeito do controle interno, primário e secundário, mais detalhadamente sobre os dois últimos. Através da revisão bibliográfica foi mostrado que o tratamento hierárquico proposto em [5] está se consolidando.

Todavia, também foram mostrados alguns trabalhos que não utilizam a estratégia hierárquica, ou que a utilizam com algumas modificações em relação à proposta original, geralmente nas tarefas de cada controle. Por exemplo, alguns trabalhos apresentam controles secundários que também corrigem a distribuição de potência reativa, o que seria uma tarefa do controle primário. Também foram discutidos alguns controles primários modificados que fazem a tarefa que originalmente seria do controle secundário, ao restaurar níveis de frequência e/ou tensões.

MR é uma temática muito heterogênea, havendo muitas possibilidades diferentes de implementação, cada qual com suas peculiaridades a respeito do controle adequado. Como foi visto, isso se desenrola na publicação de inúmeras técnicas diferentes de controle, cada uma possuindo seus pontos fortes e fracos. Deve-se ter cautela ao analisar alguma técnica, pois uma abordagem ruim para determinada configuração de MR pode ser adequada para outra. Todavia, nessa inevitável miscelânea de propostas observa-se uma tendência no sentido da utilização de técnicas as mais distribuídas possível e com menor necessidade de comunicação de dados, por possuírem aplicabilidade mais abrangente em relação àquelas dotadas de algum controle centralizado ou que exijam mais do sistema de comunicação.

Para o controle interno, a abordagem utilizando duas malhas cascadeadas, sendo a interna de corrente e a externa de tensão, com utilização do Proporcional-Ressonante como compensador para ambas e a adição de estratégias *feedforward* é verificada como a técnica atualmente mais presente.

Ressalta-se que as técnicas baseadas em *droop control* estão consolidadas para o controle primário e possuem as importantes vantagens de simplicidade, robustez e ausência da necessidade de troca de informações entre as unidades, com o preço de uma distribuição aproximada da potência ativa (ou reativa, a depender da variante utilizada) e desvios nas tensões



e frequência, que serão corrigidos pelo controle secundário. O trabalho discutiu muitas vezes tais deficiências, de forma teórica e através da análise dos resultados de simulação.

Ainda que, conforme mostrado, existam outras propostas de controle primário com melhores resultados, no desenvolvimento do presente trabalho o controle primário utilizado foi o clássico DrC convencional com linhas e impedâncias virtuais predominantemente indutivas, visando simplificação, para que neste momento inicial a atenção seja voltada para o controle secundário em si, já que muitas propostas novas de controle primário ainda carecem de mais estudos sobre seu funcionamento, vantagens, limitações e método de projeto, enquanto que o DrC convencional já foi vastamente estudado desde a década de 80.

A técnica de impedância virtual foi abordada em diversos pontos do texto, ressaltando as suas diversas contribuições dinâmicas e em regime permanente para a MR, discutidos os principais aspectos de sua implementação e as técnicas propostas para o ajuste automático de seus valores, que visam melhorias na distribuição de potência - ativa, reativa e de distorção - em sistemas que apresentam deficiência na distribuição de alguma(s) dela(s).

O controle secundário foi detalhado, mostrando diversas técnicas propostas na última década, sendo apresentados seus principais pontos fortes e fracos. Ficou claro que a teoria do controle secundário é altamente interdisciplinar, tendo uma tendência atual da utilização principalmente das teorias de: grafos dirigidos e não dirigidos, álgebra linear, controle multiagente consensual, controle linear e controle não linear. Foi também apresentada uma introdução à teoria dos grafos, focada no que diz respeito à aplicação para controle de MRs, e descritos os pilares da filosofia de controle por consenso, citando diversos exemplos de trabalhos que se baseiam nela.

Ainda sobre o controle secundário, foram discutidos aspectos sobre: a possível interferência na distribuição de potência, quantidade de parâmetros de projeto, aumento da ordem dinâmica do sistema, atraso de tempo na rede de dados, topologia da rede de dados, descentralização e interação com o sistema de impedância virtual.

Foi proposto um controle secundário completo, que se baseia na estratégia apresentada em [17] para regulação da frequência e da média das tensões de saída das UGs. Exaustivas combinações relativas a parâmetros elétricos e de controle da MR foram utilizadas para comprovação e compreensão do funcionamento do sistema completo. Através da comparação entre os diferentes resultados pôde-se separar melhor os efeitos de cada parâmetro.



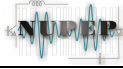
As características principais do controle secundário proposto foram expostas, sendo:

- Simplicidade de implementação e projeto, por possuir apenas dois parâmetros de sintonia no total, que apenas afetam a velocidade de convergência;
- Não eleva significativamente a ordem dinâmica do sistema, por ser composto de apenas dois integradores, quando comparado com muitas outras propostas que possuem maior ordem;
- É totalmente distribuído nas UGs e não necessita do acréscimo de medições nem inserção de dispositivos adicionais na MR (com exceção apenas da rede de dados de baixa velocidade e não necessariamente de topologia completa);
- Requer comunicação de baixa banda por trabalhar apenas com duas variáveis lentas (P e Q);
- Não necessita de modelos;

Com exceção das potências nominais, o controlador não utiliza nenhum parâmetro relacionado à planta (MR e seus componentes elétricos e malhas de controle) para o cálculo de sua ação de controle ou para o seu projeto. Naturalmente, um modelo matemático do sistema completo poderia auxiliar o projetista a escolher os valores de k_{qr_n} e k_{pr_n} , bem como realizar uma previsão da estabilidade do sistema em razão de algum parâmetro de projeto. Mas isso viria como uma mera comodidade adicional.

- Possui razoável independência da topologia da rede de dados (completa ou mínima);
- Apresentou bom comportamento dinâmico (amortecimento) na restauração da frequência e tensão;
- Boa robustez aos valores das impedâncias das linhas;
- Desde que o sistema completo se mantenha estável, não há exigências de que a perturbação seja de pequenos sinais. Foi testado sob perturbações de grande sinal, não mostrando problemas;
- Não prejudica a distribuição de potência, inclusive melhorando a distribuição da potência reativa em diversas situações demonstradas.

É importante reforçar que, sob o ponto de vista do controle, a técnica que constituiu o foco do trabalho para implementação do controle interno, primário e secundário, requer que os únicos dispositivos com papel ativo para a operação da MR sejam as UGs e a rede de dados.



As frequências e tensões tiveram comportamento bem amortecido durante a restauração feita pelo controle secundário. Grande parte das oscilações vistas não foram causadas por e, sendo presentes mesmo sem sua utilização ou em momentos anteriores à sua atuação. Tais oscilações aparecem principalmente quando impedâncias de linha pequenas (tipicamente menores que 2 mH) são utilizadas sem emprego de impedância virtual. Essas oscilações são devido ao controle primário e sua interação com os parâmetros elétricos da MR, conforme já explorado em [23], [45] e [75].

Com relação às oscilações causadas pelo controle secundário, elas aparecem de forma perceptível apenas com a utilização da rede com topologia mínima, sendo mais expressivas naquelas unidades que recebem dados de uma maior quantidade de unidades vizinhas. Foi verificado que o problema é facilmente contornável por redução nos ganhos das integrais do controle secundário das unidades que apresentarem o problema. Além disso, tais oscilações ficaram limitadas principalmente nas potências, tendo pouco efeito nas tensões e frequência, o que é uma vantagem, pois assim, um possível estresse transitório causado por elas fica contido nas UGs e não nas cargas.

Foi exemplificado pelos resultados e chamado a atenção para o fato de que a análise dinâmica da MR com seus controles não deve ser feita apenas através de uma ou poucas variáveis, pois o fato de uma variável ter comportamento bastante amortecido não garante que não haja(m) outra(s) significativamente oscilatórias.

Para o caso da MR ser formada por UGs de diferentes capacidades, foi apresentada uma versão modificada do controle secundário, com pesos em sua equação de acordo com tais capacidades, para correto funcionamento do sistema.

Os resultados de regime permanente mostraram que a estratégia proposta trouxe resultados positivos em todas as situações analisadas e restaurou a tensão e frequência nos barramentos a valores adequados, mesmo com forte carregamento de potência reativa.

Independentemente das UGs serem de potências diferentes ou não, das linhas elétricas serem de impedâncias iguais ou não e da rede de dados ser de topologia completa ou mínima, a distribuição de potência ativa e a regulação de frequência ficaram exatas e os coeficientes de inclinação do *droop* de frequência (os k_{p_n}) deixaram totalmente de afetar o sistema em regime permanente. Já os coeficientes de inclinação do *droop* de tensão (os k_{v_n}) continuam exercendo efeito, de uma forma um pouco diferente do habitual.

Se as UGs forem de mesma capacidade, os k_{v_n} deverão ser igualados. Nesse caso, se a rede de dados for de topologia completa, a média das tensões será regulada com exatidão



mesmo com linhas de impedâncias diferentes. Se a rede de dados for mínima, um pequeno desvio aparecerá, a não ser que as impedâncias das linhas sejam iguais, fazendo com que as potências reativas das unidades se igualem, nesse caso, a regulação da média também fica exata. Quanto mais próximas forem as potências reativas, mais próxima da referência a média ficará.

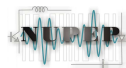
Se as UGs forem de capacidade diferentes, os pesos no controle secundário deverão ser utilizados. Nesse caso, o projeto dos k_{p_n} não precisa levar em conta as capacidades de potência.

Já com os k_{v_n} , acontece a seguinte relação: se a rede de dados for completa, o emprego de k_{v_n} balanceados conforme as capacidades nominais (procedimento detalhado no capítulo 2) fará com que a média das tensões seja regulada com exatidão, independentemente de as linhas elétricas terem impedâncias similares ou não. Essa configuração também traz os melhores resultados para distribuição de potência reativa; se a rede de dados for mínima, a média da tensão não será regulada com precisão absoluta em nenhuma situação. Nesse caso, a utilização de k_{v_n} balanceados também traz melhor distribuição de potência reativa, porém, a precisão da regulação da tensão seguiu o caminho inverso, ficando mais precisa com k_{v_n} iguais, de forma oposta ao que ocorreu com a rede de dados completa.

Os comentários feitos acima sobre a regulação em regime permanente da média das tensões *versus* conectividade da rede de dados, impedância das linhas e coeficientes do controle primário são válidos sempre para ausência de impedâncias virtuais ou, se forem presentes, com a utilização da estratégia apresentada para compensação total da queda de tensão nelas. Em todos os resultados de regime permanente, as médias foram tomadas das tensões de saída das UGs (E_n). Todavia, o CST proposto na realidade regula a média das tensões de saída do DrC (E_{dr_n}) da equação (2.2). As tensões E_{dr_n} serão exatamente iguais a E_n somente se o controle interno das unidades tiver erro desprezível e se as impedâncias virtuais não forem utilizadas - ou terem suas quedas de tensões em regime permanente canceladas.

A relação entre o controle secundário de tensão proposto com a distribuição de potência reativa e os coeficientes k_{v_n} ainda é um assunto pouco maduro, sendo necessários maiores estudos de modo a confirmar o grau de generalidade do comportamento verificado neste trabalho, especialmente com a utilização de topologia não completa para a rede de dados.

Além dos inúmeros resultados com atraso considerado (de 100 ms) na rede de dados, o CS proposto foi também testado com uma rede de dados discreta, com 10 Hz de taxa de amostragem por *Zero Order Hold* e mostrou funcionar muito bem nessa situação, com irrelevante diferença com os resultados no domínio do tempo contínuo.



Contudo, é importante ressaltar que nenhum dos parâmetros elétricos ou das malhas de controle utilizados nas simulações foram escolhidos para intencionalmente obter algum resultado específico, com exceção das situações em que isso esteve claro, como por exemplo, o balanceamento dos coeficientes conforme as capacidades nominais e os testes feitos com impedâncias de linha totalmente iguais ou aproximadamente iguais (resistências diferentes). Houve a preocupação em se realizar as simulações com uma grande quantidade de condições diferentes e os valores foram escolhidos aleatoriamente, apenas com o compromisso de se utilizar parâmetros tecnicamente coerentes e típicos.

Inúmeras outras simulações foram realizadas durante os desenvolvimentos intermediários do trabalho - que foram omitidas para evitar que o texto ficasse excessivamente longo ou confuso - visando dar suporte à compreensão e confirmação dos comportamentos observados, tendo existido sempre o cuidado de afirmar aqui apenas os comportamentos que se repetiram dentro de um grau razoável de condições diferentes.

Também foi dada uma atenção especial às precisões numéricas nos resultados. Todos os casos em que se afirmou no texto que determinada variável foi zerada, igualada a outra variável ou igualada a um valor de referência, foi confirmado que isso aconteceu com precisão de sete casas decimais, mesmo que os dados tenham sido arredondados para compactação das tabelas. Um exemplo é quando a frequência é dita regulada em 60Hz (referência), isso quer dizer que foi regulada a 60,0000000Hz.

Para todos os casos analisados, mesmo nas situações em que a atuação do controle secundário proposto não foi ideal, o seu objetivo foi atingido e o erro máximo na sua regulação se manteve na ordem de centésimos de volt. Ele não consegue restaurar as quedas de tensões nas impedâncias virtuais, apenas aquelas causadas pelo controle primário. Todavia, isso já é suficiente para haver o retorno da tensão no barramento de carga a níveis adequados em muitos casos.

Um algoritmo opcional bastante simples, distribuído e sem necessidade de comunicação também foi proposto para trabalhar em conjunto com o controle secundário, para compensar (totalmente ou em partes) a queda de tensão nas impedâncias virtuais em regime permanente, sem afetar o considerável amortecimento que elas adicionam ao sistema. Como desvantagem, o referido algoritmo elimina (totalmente ou em partes) a capacidade das impedâncias virtuais de atuarem na correção dos desvios na distribuição de potência. Os resultados mostraram a sua total funcionalidade, conforme o esperado.

6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A possibilidade de estudos dentro da temática de MRs é grande. A seguir são discutidas algumas propostas para a continuidade do trabalho desenvolvido.

- Implementação experimental do trabalho;

Os preparativos para a execução experimental da MR estão sendo realizados. Cerca de 90% dos materiais necessários já foram especificados e adquiridos ao longo dos dois anos deste trabalho e as placas eletrônicas auxiliares para comando, sinalização, proteção, comunicação, alimentação, automatização e sensoramento de variáveis, para cada UG, já foram projetadas e estão em fase de confecção.

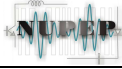
- Documentação e análise do efeito de uma rede de dados com atrasos de tempo consideravelmente distintos entre as diferentes linhas de dados, supondo ainda, UGs com diferentes capacidades nominais e linhas elétricas heterogêneas;
- Verificação da influência dos coeficientes de inclinação do controle primário na dinâmica do controle secundário;
- Modelagem dinâmica da MR, incluindo as linhas de transmissão, cargas, controle primário, controle secundário e a rede de dados - considerando sua topologia e atraso de tempo;

O estudo pode iniciar com a aplicação a técnica dos trabalhos [17] e [40]. A primeira pergunta a ser respondida é o quão bem ela conseguirá representar o sistema, já que sua complexidade foi aumentada. Se o resultado for insatisfatório, melhorias poderão ser propostas, como o aumento da ordem na linearização.

- Aperfeiçoar a estratégia proposta de controle secundário de tensão, no intuito de compensar (pela média), além da variação causada pelo DrC, a queda de tensão causada pelas impedâncias virtuais sem que a distribuição de potência reativa seja prejudicada;

A estratégia aqui mostrada implica em prejuízos na atuação da impedância virtual na melhoria da distribuição de potência reativa, pelo menos em partes. Do mesmo modo que o controle secundário proposto restaura a queda de tensão pelo DrC sem prejuízo na distribuição de potência, é desejável que isso seja feito também para as impedâncias virtuais.

- Estudo do comportamento do sistema com a inserção de uma ou mais unidades geradoras operando no modo de corrente controlada (*Current Control Mode – CCM*), tais como os inversores fotovoltaicos com corrente de saída controlada, dotados de sistemas para anti-ilhamento e rastreamento do ponto de máxima potência;



Inicialmente seria interessante verificar o comportamento da MR com tal inserção sem realizar nenhuma alteração no controle do inversor CCM ou no controle hierárquico, para diferentes situações de fluxo de potência. Se o resultado for insatisfatório, alguma alteração nos controles poderá ser proposta.

- Conexão da MR à rede elétrica com implementação do controle terciário e sistema para sincronismo e detecção de ilhamento;

É um desenvolvimento natural do sistema, pois via de regra é desejável que as MRs possam trocar potência com a rede elétrica, conforme já discutido. Um dos pontos de estudo é a interação entre o controle terciário e o sistema de sincronismo com o controle secundário proposto.

- Distribuição de potências ativa e reativa não somente dependente da capacidade nominal das unidades geradoras, mas também considerando critérios variáveis, como o estado de carga das baterias e critérios econômicos [5], [76];

Em uma aplicação real é de muita valia que o sistema de controle não distribuísse a potência apenas de acordo com as capacidades nominais das unidades, mas também por outros fatores dinâmicos. E isso não é mais um problema apenas para o controle primário. Uma possibilidade seria a variação dinâmica dos pesos do controle secundário.

- Estudo teórico-matemático aprofundado do controle secundário, utilizando-se da teoria de grafos, consenso, álgebra linear, controle e sistemas não lineares;

Falta uma melhor compreensão matemática sobre o controle secundário sob a luz de tais teorias, para estudos de critérios suficientes e necessários para convergência, principalmente envolvendo parâmetros da rede de dados. Por exemplo, estudar a influência da utilização de rede de dados dirigidas do tipo fortemente e fracamente conexas.

Ainda que o controle se enquadre de forma teórica na teoria de sistemas multiagente e consenso, possui diferenças significativas com relação aos algoritmos de consenso mais comuns, como o *average-consensus* ou o *average-consensus* com pesos. Falta encontrar (ou formular) o protocolo de consenso que o CS realmente se enquadra e derivar as propriedades matemáticas, conforme já extensamente feito para o *average-consensus*.

- Estudo do desempenho do controle secundário para MRs com mais unidades e de topologias elétricas mais diversas.

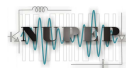


Deve se analisar o desempenho, principalmente com relação às tensões, potência reativa e efeitos da topologia da rede de dados em sistemas de topologia elétricas diferentes e assimétricas, por exemplo: possuindo algumas cargas locais ligadas diretamente na saída de algumas UGs e MRs com diferentes barramentos de carga.

6.3 PUBLICAÇÕES

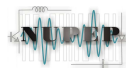
Até o momento, este estudo gerou duas publicações: uma em evento regional e outra em evento internacional, ambos no ano de 2018. São elas:

- Carvalho, Henrique Tannús M.; Coelho, Ernane Antônio A.; Freitas, Luiz Carlos G.; de Lima, Gustavo B.; de Freitas, Luiz Carlos; Vieira Júnior, João Batista. **Controle Secundário Distribuído para Regulação de Tensão e Frequência De Microrredes em Operação Ilhada.** Apresentado na cidade de São Paulo – SP durante o *13th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications* (INDUSCON 2018). Evento promovido pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, *International Conference on Industry Applications (IAS)* e Universidade de São Paulo (USP);
- Carvalho, Henrique Tannús M.; Coelho, Ernane Antônio A.; Freitas, Luiz Carlos G.; de Lima, Gustavo B.; de Freitas, Luiz Carlos. **Controle Secundário Distribuído em Microrredes: Análise da Distribuição de Potência entre Unidades Geradoras de Capacidades Diferentes.** Apresentado na cidade de Uberlândia - MG durante a XVI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (XVI CEEL). Evento promovido pela Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).



7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. C. Green e M. Prodanović, “Control of inverter-based micro-grids”, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 77, no 9, p. 1204–1213, jul. 2007. doi: 10.1016/j.epsr.2006.08.017.
- [2] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, M. Castilla, e L. G. de Vicuna, “Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no 3, p. 726–736, mar. 2009. doi:10.1109/TIE.2008.2009274.
- [3] J. Schiffer, T. Seel, J. Raisch, e T. Sezi, “Voltage Stability and Reactive Power Sharing in Inverter-Based Microgrids With Consensus-Based Distributed Voltage Control”, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 24, no 1, p. 96–109, jan. 2016. doi:10.1109/TCST.2015.2420622.
- [4] R. H. Lasseter, “MicroGrids”, in 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309), 2002, vol. 1, p. 305–308. doi:10.1109/PESW.2002.985003.
- [5] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna, e M. Castilla, “Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no 1, p. 158–172, jan. 2011. doi:10.1109/TIE.2010.2066534.
- [6] W. Meng, X. Wang, e S. Liu, “Distributed Load Sharing of an Inverter-Based Microgrid With Reduced Communication”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no 2, p. 1354–1364, mar. 2018. doi:10.1109/TSG.2016.2587685.
- [7] F. Doost Mohammadi, H. Keshtkar Vanashi, e A. Feliachi, “State-Space Modeling, Analysis, and Distributed Secondary Frequency Control of Isolated Microgrids”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 33, no 1, p. 155–165, mar. 2018. doi:10.1109/TEC.2017.2757012.
- [8] Q. Shafiee, V. Nasirian, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, e A. Davoudi, “A Multi-Functional Fully Distributed Control Framework for AC Microgrids”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no 4, p. 3247–3258, jul. 2018. doi:10.1109/TSG.2016.2628785.
- [9] G. Chen e Z. Zhao, “Delay Effects on Consensus-Based Distributed Economic Dispatch Algorithm in Microgrid”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no 1, p. 602–612, jan. 2018. doi:10.1109/TPWRS.2017.2702179.
- [10] B. Wei, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, e X. Guo, “A Circulating-Current Suppression Method for Parallel-Connected Voltage-Source Inverters With Common DC and AC Buses”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no 4, p. 3758–3769, jul. 2017. doi:10.1109/TIA.2017.2681620.
- [11] U. B. Tayab, M. A. Bin Roslan, L. J. Hwai, e M. Kashif, “A review of droop control techniques for microgrid”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, no November 2016, p. 717–727, set. 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.028.
- [12] Y. Sun, X. Hou, J. Yang, H. Han, M. Su, e J. M. Guerrero, “New Perspectives on Droop Control in AC Microgrid”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no 7, p. 5741–5745, jul. 2017. doi:10.1109/TIE.2017.2677328.



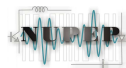
- [13] N. F. Avila e C.-C. Chu, “Distributed Pinning Droop Control in Isolated AC Microgrids”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no 4, p. 3237–3249, jul. 2017. doi:10.1109/TIA.2017.2691298.
- [14] M. Eskandari e L. Li, “A novel small signal model of multi-bus microgrids for modeling interaction of droop controllers through the power network”, in 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017, p. 1–6. doi:10.1109/ICEMS.2017.8055943.
- [15] X. Wu e C. Shen, “Distributed Optimal Control for Stability Enhancement of Microgrids With Multiple Distributed Generators”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no 5, p. 4045–4059, set. 2017. doi:10.1109/TPWRS.2017.2651412.
- [16] H. Zhang, S. Kim, Q. Sun, e J. Zhou, “Distributed Adaptive Virtual Impedance Control for Accurate Reactive Power Sharing Based on Consensus Control in Microgrids”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no 4, p. 1749–1761, jul. 2017. doi:10.1109/TSG.2015.2506760.
- [17] E. A. A. Coelho, D. Wu, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, T. Dragicevic, C. Stefanovic, e P. Popovski, “Small-Signal Analysis of the Microgrid Secondary Control Considering a Communication Time Delay”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no 10, p. 6257–6269, out. 2016. doi:10.1109/TIE.2016.2581155.
- [18] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, e J. C. Vasquez, “Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids—A Novel Approach”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no 2, p. 1018–1031, fev. 2014. doi:10.1109/TPEL.2013.2259506.
- [19] J. W. Simpson-Porco, F. Dörfler, e F. Bullo, “Synchronization and power sharing for droop-controlled inverters in islanded microgrids”, *Automatica*, vol. 49, no 9, p. 2603–2611, set. 2013. doi:10.1016/j.automatica.2013.05.018.
- [20] R. Carnieletto, D. B. Ramos, M. G. Simoes, e F. A. Farret, “Simulation and analysis of DQ frame and P+Resonant controls for voltage source inverter to distributed generation”, in 2009 Brazilian Power Electronics Conference, 2009, p. 104–109. doi:10.1109/COBEP.2009.5347677.
- [21] Dan Wu, Fen Tang, J. C. Vasquez, e J. M. Guerrero, “Control and analysis of droop and reverse droop controllers for distributed generations”, in 2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14), 2014, no 3, p. 1–5. doi:10.1109/SSD.2014.6808842.
- [22] J. W. Simpson-Porco, Q. Shafiee, F. Dorfler, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, e F. Bullo, “Secondary Frequency and Voltage Control of Islanded Microgrids via Distributed Averaging”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no 11, p. 7025–7038, nov. 2015. doi:10.1109/TIE.2015.2436879.
- [23] E. A. A. Coelho, “Técnicas de controle aplicadas ao paralelismo de inversores”. Tese de Doutorado - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 154, 2000.
- [24] H. Mahmood, D. Michaelson, e J. Jiang, “Accurate Reactive Power Sharing in an Islanded Microgrid Using Adaptive Virtual Impedances”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no 3, p. 1605–1617, mar. 2015. doi:10.1109/TPEL.2014.2314721.



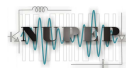
- [25] R. Majumder, G. Ledwich, A. Ghosh, S. Chakrabarti, e F. Zare, “Droop Control of Converter-Interfaced Microsources in Rural Distributed Generation”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no 4, p. 2768–2778, out. 2010. doi:10.1109/TPWRD.2010.2042974.
- [26] S. Mukherjee, P. Shamsi, e M. Ferdowsi, “Impedance shaping for improved load sharing among inverters in AC microgrids”, in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, p. 738–744. doi:10.1109/ECCE.2015.7309763.
- [27] J. He e Y. W. Li, “Analysis, Design, and Implementation of Virtual Impedance for Power Electronics Interfaced Distributed Generation”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no 6, p. 2525–2538, nov. 2011. doi:10.1109/TIA.2011.2168592.
- [28] D. He, D. Shi, e R. Sharma, “Consensus-based distributed cooperative control for microgrid voltage regulation and reactive power sharing”, in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*, 2014, p. 1–6. doi:10.1109/ISGTEurope.2014.7028803.
- [29] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, e J. M. Guerrero, “Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no 3, p. 2427–2451, mar. 2017. doi:10.1109/TPEL.2016.2569597.
- [30] A. Dehghan Banadaki, F. D. Mohammadi, e A. Feliachi, “State space modeling of inverter based microgrids considering distributed secondary voltage control”, in *2017 North American Power Symposium (NAPS)*, 2017, no 1, p. 1–6. doi:10.1109/NAPS.2017.8107326.
- [31] A. Tuladhar, H. Jin, T. Unger, e K. Mauch, “Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections”, in *Proceedings of APEC 97 - Applied Power Electronics Conference*, 1997, vol. 1, p. 94–100. doi:10.1109/APEC.1997.581439.
- [32] F. de Bosio, L. A. de Souza Ribeiro, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, e J. M. Guerrero, “Control design of VSIs to enhance transient performance in microgrids”, in *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, 2016, p. 1–8. doi:10.1109/EPE.2016.7695496.
- [33] F. de Bosio, L. A. D. S. Ribeiro, M. S. Lima, F. Freijedo, J. M. Guerrero, e M. Pastorelli, “Inner current loop analysis and design based on resonant regulators for isolated microgrids”, in *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 2015, p. 1–6. doi:10.1109/COBEP.2015.7420244.
- [34] H. J. Avelar, “Estudo e Desenvolvimento de um Sistema de Energia Baseado em Célula a Combustível para Injeção de Potência na Rede Elétrica”. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p.163, 2012.
- [35] D. N. Zmood e D. G. Holmes, “Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no 3, p. 814–822, 2003. doi:10.1109/TPEL.2003.810852.
- [36] M. J. Ryan, W. E. Brumsickle, e R. D. Lorenz, “Control topology options for single-phase UPS inverters”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, no 2, p. 493–501, 1997. doi:10.1109/28.568015.



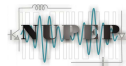
-
- [37] W. A. Parreira, “Análise da Estabilidade de Inversores Conectados em Paralelo em Rede Isolada, sem Interconexão no Controle e com Aumento do Amortecimento Via Malha de Deslocamento de Fase”. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 129, 2014.
 - [38] A. G. Yepes, F. D. Freijedo, J. Doval-Gandoy, Ó. López, J. Malvar, e P. Fernandez-Comesaña, “Effects of Discretization Methods on the Performance of Resonant Controllers”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no 7, p. 1692–1712, jul. 2010. doi:10.1109/TPEL.2010.2041256.
 - [39] A. G. Yepes, F. D. Freijedo, Ó. Lopez, e J. Doval-Gandoy, “High-Performance Digital Resonant Controllers Implemented With Two Integrators”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no 2, p. 563–576, fev. 2011. doi:10.1109/TPEL.2010.2066290.
 - [40] E. A. A. Coelho, P. C. Cortizo, e P. F. D. Garcia, “Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone AC supply systems”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no 2, p. 533–542, 2002. doi:10.1109/28.993176.
 - [41] L.-Y. Lu e C.-C. Chu, “Consensus-Based Secondary Frequency and Voltage Droop Control of Virtual Synchronous Generators for Isolated AC Micro-Grids”, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 5, no 3, p. 443–455, set. 2015. doi:10.1109/JETCAS.2015.2462093.
 - [42] M. Yazdanian e A. Mehrizi-Sani, “Washout Filter-Based Power Sharing”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no 2, p. 1–2, 2015. doi:10.1109/TSG.2015.2497964.
 - [43] R. M. dos Santos Filho, “Contribuição ao Controle Digital do Paralelismo sem Comunicação de Sistemas de Energia Ininterrupta”. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 269, 2009.
 - [44] H. J. Avelar, W. A. Parreira, J. B. Vieira, L. C. G. de Freitas, e E. A. A. Coelho, “A State Equation Model of a Single-Phase Grid-Connected Inverter Using a Droop Control Scheme With Extra Phase Shift Control Action”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no 3, p. 1527–1537, mar. 2012. doi:10.1109/TIE.2011.2163372.
 - [45] É. P. de Paiva, “Uma Proposta de Controle de Paralelismo com c Rede Elétrica Utilizando-se a Técnica de Realimentação de Fase”. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 177, 2006.
 - [46] J. Lu, M. Savaghebi, B. Wei, e J. Guerrero, “An enhanced control scheme for uninterruptible power supply”, in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2017, vol. 2017 – Janeiro, p. 2043–2050. doi:10.1109/ECCE.2017.8096408.
 - [47] J. He e Y. W. Li, “Analysis and design of interfacing inverter output virtual impedance in a low voltage microgrid”, in *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2010, p. 2857–2864. doi:10.1109/ECCE.2010.5618181.
 - [48] J. M. Guerrero, L. Garcia de Vicuna, J. Matas, M. Castilla, e J. Miret, “Output Impedance Design of Parallel-Connected UPS Inverters With Wireless Load-Sharing Control”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no 4, p. 1126–1135, ago. 2005. doi:10.1109/TIE.2005.851634.



- [49] J. M. Guerrero, J. Matas, L. Garcia de Vicuna, M. Castilla, e J. Miret, “Decentralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters Using Resistive Output Impedance”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no 2, p. 994–1004, abr. 2007. doi:10.1109/TIE.2007.892621.
- [50] A. Micallef, M. Apap, C. S. Staines, e J. M. Guerrero Zapata, “Secondary control for reactive power sharing and voltage amplitude restoration in droop-controlled islanded microgrids”, in *2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 2012, p. 492–498. doi:10.1109/PEDG.2012.6254048.
- [51] J. Zhang, J. Ning, L. Huang, H. Wang, e J. Shu, “Adaptive droop control for accurate power sharing in islanded microgrid using virtual impedance”, in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017, no 2, p. 2383–2388. doi:10.1109/IECON.2017.8216401.
- [52] J. Zhou, S. Kim, H. Zhang, Q. Sun, e R. Han, “Consensus-Based Distributed Control for Accurate Reactive, Harmonic, and Imbalance Power Sharing in Microgrids”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no 4, p. 2453–2467, jul. 2018. doi:10.1109/TSG.2016.2613143.
- [53] J. He e Y. W. Li, “An Enhanced Microgrid Load Demand Sharing Strategy”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no 9, p. 3984–3995, set. 2012. doi:10.1109/TPEL.2012.2190099.
- [54] Q.-C. Zhong e T. Hornik, *Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd., 2012. doi:10.1002/9781118481806.
- [55] H. Han, X. Hou, J. Yang, J. Wu, M. Su, e J. M. Guerrero, “Review of Power Sharing Control Strategies for Islanding Operation of AC Microgrids”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no 1, p. 200–215, jan. 2016. doi:10.1109/TSG.2015.2434849.
- [56] J. M. Guerrero, J. Matas, L. Garcia De Vicunagarcia De Vicuna, M. Castilla, e J. Miret, “Wireless-Control Strategy for Parallel Operation of Distributed-Generation Inverters”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no 5, p. 1461–1470, out. 2006. doi:10.1109/TIE.2006.882015.
- [57] B. França, E. Emmerik, J. Caldeira, e M. Aredes, “Sliding Droop Control For Distributed Generation In Microgrids”, *Eletrônica de Potência*, vol. 22, no 4, p. 429–439, dez. 2017. doi:10.18618/REP.2017.4.2726.
- [58] C.-T. Lee, C.-C. Chu, e P.-T. Cheng, “A New Droop Control Method for the Autonomous Operation of Distributed Energy Resource Interface Converters”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no 4, p. 1980–1993, abr. 2013. doi:10.1109/TPEL.2012.2205944.
- [59] L.-Y. Lu e C.-C. Chu, “Consensus-Based Droop Control Synthesis for Multiple DICs in Isolated Micro-Grids”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no 5, p. 2243–2256, set. 2015. doi:10.1109/TPWRS.2014.2368135.



- [60] W. Yao, M. Chen, J. Matas, J. M. Guerrero, e Z.-M. Qian, “Design and Analysis of the Droop Control Method for Parallel Inverters Considering the Impact of the Complex Impedance on the Power Sharing”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no 2, p. 576–588, fev. 2011. doi:10.1109/TIE.2010.2046001.
- [61] R. Olfati-Saber, J. A. Fax, e R. M. Murray, “Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems”, *Proc. IEEE*, vol. 95, no 1, p. 215–233, jan. 2007. doi:10.1109/JPROC.2006.887293.
- [62] A. Bidram, A. Davoudi, F. L. Lewis, e J. M. Guerrero, “Distributed Cooperative Secondary Control of Microgrids Using Feedback Linearization”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no 3, p. 3462–3470, ago. 2013. doi:10.1109/TPWRS.2013.2247071.
- [63] Wei Ren, R. W. Beard, e E. M. Atkins, “A survey of consensus problems in multi-agent coordination”, in *Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005.*, 2005, p. 1859–1864. doi:10.1109/ACC.2005.1470239.
- [64] A. R. G. LOZANO, A. S. SIQUEIRA, e S. MATTOS, S.R.P. JURKIEWICZ, “Produto Funcional de Grafos: Um Modelo para Conexão de Sistemas Multiagentes”, *TEMA (São Carlos)*, vol. 17, no 3, p. 341–352, 2016. doi: 10.5540/tema.2016.017.03.0341.
- [65] R. F. Parente, “Empacotamento e contagem em digrafos: cenários aleatórios e extremos”. Tese de Doutorado – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.
- [66] R. Olfati-Saber e R. M. Murray, “Consensus Problems in Networks of Agents With Switching Topology and Time-Delays”, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 49, no 9, p. 1520–1533, set. 2004. doi:10.1109/TAC.2004.834113.
- [67] C. Godsil e G. Royle, *Algebraic graph theory*. New York: Springer, 2001.
- [68] M. Nelson e P. E. Jordan, “Automatic Reconfiguration of a Ship’s Power System Using Graph Theory Principles”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no 3, p. 2651–2656, maio 2015. doi:10.1109/TIA.2014.2365622.
- [69] F. Guo, C. Wen, J. Mao, e Y.-D. Song, “Distributed Secondary Voltage and Frequency Restoration Control of Droop-Controlled Inverter-Based Microgrids”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no 7, p. 4355–4364, jul. 2015. doi:10.1109/TIE.2014.2379211.
- [70] R. O. Saber e R. M. Murray, “Consensus protocols for networks of dynamic agents”, in *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.*, 2003, vol. 2, p. 951–956. doi:10.1109/ACC.2003.1239709.
- [71] R. Olfati-Saber e R. M. Murray, “Consensus Problems in Networks of Agents With Switching Topology and Time-Delays”, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 49, no 9, p. 1520–1533, set. 2004. doi:10.1109/TAC.2004.834113.
- [72] D. P. Spanos, R. Olfati-Saber, e R. M. Murray, “Dynamic Consensus for Mobile Networks”, in *16th IFAC World Congress, 2005*.
- [73] Road vehicles - Controller Area Network (CAN), Part 2: High Speed Medium Access Unit, ISO 11898-2:2016. Suíça, 2016.
- [74] ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST): Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica”, Revisão 10 (Resolução Normativa no 794/2017), 2012.



- [75] W. A. Parreira, H. J. Avelar, J. B. Vieira, L. C. Freitas, L. C. G. De Freitas, e E. A. A. Coelho, “Small-signal analysis of parallel connected voltage source inverters using a frequency and voltage droop control including an additional phase shift”, *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, vol. 25, no 5, p. 597–607, out. 2014. doi:10.1007/s40313-014-0143-5.
- [76] Y. Guan, L. Meng, C. Li, J. C. Vasquez, e J. M. Guerrero, “A Dynamic Consensus Algorithm to Adjust Virtual Impedance Loops for Discharge Rate Balancing of AC Microgrid Energy Storage Units”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no 5, p. 4847–4860, set. 2018. doi:10.1109/TSG.2017.2672882.