



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

WILLIAM CHAVES LIMA

**COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA EM MICRORREDES SEM
COMUNICAÇÃO: NOVAS PERSPECTIVAS TEÓRICAS E METODOLOGIAS BASEADAS
NA PERTURBAÇÃO DE PARÂMETROS**

Recife

2025

WILLIAM CHAVES LIMA

**COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA EM MICRORREDES SEM
COMUNICAÇÃO: NOVAS PERSPECTIVAS TEÓRICAS E METODOLOGIAS BASEADAS
NA PERTURBAÇÃO DE PARÂMETROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Processamento de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Medeiros de Souza Azevedo

Coorientador: Prof. Dr. Fabrício Bradaschia

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Lima, William Chaves.

Compartilhamento de potência em microrredes sem comunicação: novas perspectivas teóricas e metodologias baseadas na perturbação de parâmetros / William Chaves Lima. - Recife, 2025. 151f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Gustavo Medeiros de Souza Azevedo.

Coorientação: Prof. Dr. Fabrício Bradaschia.

Inclui referências.

1. Microrredes; 2. Compartilhamento de potência; 3. Perturbação de parâmetros; 4. Controle por inclinação; 5. Controle droop; 6. Hardware-In-the-Loop. I. Azevedo, Gustavo Medeiros de Souza. II. Bradaschia, Fabrício. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

WILLIAM CHAVES LIMA

**“COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA EM MICRORREDES
SEM COMUNICAÇÃO: NOVAS PERSPECTIVAS TEÓRICAS E
METODOLOGIAS BASEADAS NA PERTURBAÇÃO DE
PARÂMETROS”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Processamento de Energia.

Aprovada em: 19/02/2025

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Gustavo Medeiros de Souza Azevedo
(Orientador e Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Rafael Cavalcanti Neto
(Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. João Américo Vilela Júnior
(Examinador Externo)
Universidade do Estado do Paraná

AGRADECIMENTOS

Aprendi que na vida somente conseguimos realizar aquilo que temos condições, ou oportunidade, de fazer. Um indivíduo não poderá, sozinho, criar todas as condições para realizar aquilo que almeja. O máximo que pode é fazer o melhor com as condições que a vida lhe dá. Nesse sentido, se este trabalho tem algum mérito ou alguma qualidade, o tem porque houveram condições para tanto e, por isso, é preciso agradecer.

A jornada do mestrado foi bastante intensa nas diversas etapas que fazem a têmpera de um pesquisador: as disciplinas e seu caráter formativo; os seus desafios e tarefas, que fomentam o pensamento crítico e a capacidade de resolução de problemas; e a busca por um propósito de pesquisa que seja realizável, relevante e que traga contribuições satisfatórias. Para mim o último aspecto foi sem dúvida o mais difícil e marcado por uma drástica mudança de trajetória. No entanto, tenho certeza de que bati na porta certa e agradeço imensamente ao professor Fabrício por ter acolhido minha problemática e acreditado que eu seria capaz de realizar este trabalho.

Não posso dizer que não tenho sorte, pois busquei um orientador e recebi, na verdade, uma dupla, composta também pelo professor Gustavo, a quem agradeço por ter me proposto o tema do compartilhamento de potência. Em dezembro de 2023, eu era uma pessoa em busca de um propósito de pesquisa, em busca de um problema desafiador a ser resolvido. Em dezembro do ano seguinte, eu havia praticamente terminado este trabalho, com a grande satisfação de poder apresentar minhas perspectivas e propostas de metodologias, que espero que sejam de alguma contribuição ao tema.

Fruto de muitas horas de estudo, discussão e aplicação, tais resultados que apresento, claro, não são somente devidos a mim. Não tenho palavras que expressem o quanto sou grato a meus dois orientadores por acompanharem todo o processo do desenvolvimento deste trabalho, com ricas discussões a três, marcadas por um incansável interesse, mesmo que as reuniões fossem logo antes da hora do almoço. Busquei aproveitar ao máximo esses encontros, tentando trazer meu próprio direcionamento, que foi muito bem guiado para a trajetória que me levou a esse desfecho. Fabrício com sua característica empolgação e pujança argumentativa e Gustavo com a temperança, o cuidado e a generosidade da escuta compuseram, somando-se a isso suas experiências, um ambiente fértil no qual tive a oportunidade de crescer em mais essa etapa.

Além disso, também tive na universidade um ambiente propício, a começar pelas disciplinas que cursei durante o mestrado. A sala de aula é, para mim, um rico espaço de aprendizado ativo, de discussões, de crescimento intelectual e de concentração, mas também de descontração e de interação. Por todos esses momentos que contribuem para o crescimento pessoal e intelectual, além de agradecer aos meus próprios orientadores, que também foram professores em algumas cadeiras, agradeço aos professores Limongi, Marcelo, Juliano, Ronaldo, José Filho e Pedro Rosas.

A figura do professor, no entanto, transcende a sala de aula e, muitas vezes, apenas um breve e fortuito encontro nos corredores do departamento vem acompanhado de ensinamentos e palavras de incentivo. Por isso, agradeço também aos professores Zanoni, Alex e Lauro. Além deles, não posso deixar de agradecer aos professores Vicente, Geraldo e Augusto, pelo apoio quando decidi realizar a mudança de tema de pesquisa; por terem compreendido as minhas inquietudes; e por terem também oferecido, anteriormente, um ambiente propício ao meu desenvolvimento acadêmico.

Costuma-se dizer que a jornada da pesquisa é solitária. De fato, a árdua tarefa do pensar se processa, em grande parte, no silêncio e o registro das ideias e resultados em longas horas de escrita do texto. Seria injusto, entretanto, dizer que não havia outras pessoas realizando o mesmo processo; que faltaram oportunidades; e que não havia um ambiente vivo, rico de interações acadêmicas e também pessoais. Não; muito pelo contrário. Na verdade, sou eu uma pessoa bastante solitária. Ainda assim, nas poucas vezes em que interagi com os colegas, que formam um diverso embora coeso grupo de pesquisa, fui muito bem recebido e pude com eles até dar boas risadas, sentindo-me também parte integrante desse conjunto. Por isso, e também pela atenção e solicitude com a qual minhas demandas foram atendidas quando necessitei, gostaria de agradecer aos colegas do GEPAE, em especial a Valdemar, Camila, Néstor, Éricles e Eduardo.

No ambiente da sala de aula, também tive a oportunidade da convivência, dividindo com os colegas a minha empolgação, mas também as dificuldades do aprender. Agradeço pela confiança das pessoas com quem realizei trabalhos em equipe durante as disciplinas e que, em algum momento, compartilharam comigo suas dúvidas e dificuldades. Tenho muita satisfação se pude ajudá-las e também aprender com elas. Agradeço especialmente a Paulo, Maria Clara, Tiago, Gustavo, Taciana, Renê, Joás e Gabriel, a quem também agradeço por ter gentilmente cedido uma simulação modelo, desenvolvida no seu trabalho de dissertação, contendo a modelagem chaveada do conversor, a qual utilizei como base para elaboração das minhas simulações no capítulo 4.

Por fim, faço o agradecimento a uma pessoa fundamental sem a qual eu não poderia ter este desenvolvimento, ou pelo menos não da maneira como tive: a minha mãe, Helena. Além do apoio nos aspectos estruturais da minha vida, tenho a escuta e o conselho de alguém que já trilhou o caminho acadêmico, professora também desta mesma universidade. Tenho, por generosidade dela, uma condição muito mais favorável do que a que ela própria teve quando realizou seu mestrado. Por isso agradeço imensamente e espero ter realizado com este trabalho o melhor que pude com as condições que tive.

O caminho para a sabedoria passa por abrir mão de regras desnecessárias

RESUMO

Embora já existam diversas abordagens para resolução do problema de compartilhamento de potência reativa em microrredes sem comunicação, essa ainda é uma temática em aberto, principalmente devido à ausência de uma metodologia que seja genericamente aplicável a uma microrrede qualquer e, ao mesmo tempo, que tenha uma implementação simples e livre de desvantagens significativas. Visando contribuir com essa discussão, este trabalho propõe três novas metodologias de correção de compartilhamento de potência baseadas na perturbação de parâmetros da microrrede, as quais foram desenvolvidas a partir de uma proposta já existente. Essa metodologia, tal como enunciada originalmente, carece de críticas, reformulações e extensões, também realizadas neste trabalho, com base no arcabouço teórico desenvolvido. Este último engloba também uma revisão do problema de compartilhamento de potência, reabordando alguns de seus conceitos e realizando observações inéditas, dentre elas, a da não obrigatoriedade da escolha proporcional dos coeficientes n no *droop* $Q - V$, ideia que poderá trazer novas perspectivas para o problema em questão. Além das proposições teóricas, este trabalho apresenta investigações em simulação sobre o comportamento das metodologias estudadas, identificando e sanando situações potencialmente problemáticas, como a mudança de carga durante o processo de perturbação. Essas investigações, juntamente com a realização de simulações *Hardware-In-The-Loop* considerando uma microrrede de topologia genérica, atestam o bom desempenho das metodologias propostas, oferecendo bons indícios de que são alternativas relevantes para a solução do problema de compartilhamento de potência reativa.

Palavras-chave: Microrredes; Compartilhamento de potência; Perturbação de parâmetros; Controle por inclinação; Controle *droop*; *Hardware-In-The- Loop*.

ABSTRACT

Although there are already many approaches for the solution of the reactive power sharing problem on microgrids without communication, this is still an open issue, especially due to the absence of a methodology which is generically applicable to any microgrid and, at the same time, that has an implementation both simple and free of significant disadvantages. Aiming to contribute to this discussion, this work proposes three new power sharing methodologies based on parameter perturbation, which were developed based on an already existing one. This methodology, as originally stated, lacks some criticism, reformulations and extensions, which are also presented on this work, alongside a comprehensive theoretical foundation. The latter also encompasses a review of the power sharing problem, revising some of its concepts and doing some unprecedented observations, among which the one about the non-requirement of proportional choice for the n coefficients of the $Q - V$ droop, an idea that can bring new perspectives to this field of study. In addition to the theoretical propositions, this work investigates the performance of the studied methodologies by means of simulations, identifying and solving potentially problematic situations, as when a load change occurs during the power correction process. These investigations, alongside the execution of *Hardware-In-The-Loop* simulations considering a microgrid of generical topology, confirm that the proposed methodologies perform well, offering good evidence that they are a relevant alternative for the solution of the reactive power sharing problem.

Keywords: Microgrids; Power sharing; Parameter perturbation; *Droop* control; *Hardware-In-The-Loop*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características de inclinação $P - \omega$ e $Q - V$ com pontos de ajuste (P_0, ω_0) e (Q_0, V_0)	28
Figura 2 – Conversor ligado à microrrede por ponto de acoplamento.	29
Figura 3 – <i>Loci</i> da potência complexa caso impedância indutiva.	32
Figura 4 – <i>Loci</i> da potência complexa caso genérico.	32
Figura 5 – Região de estabilidade angular ($V_i = V_{ic}$).	34
Figura 6 – <i>Loci</i> da potência complexa (potência mista).	37
Figura 7 – Microrrede genérica.	39
Figura 8 – Microrrede simplificada.	40
Figura 9 – Esquema genérico de controle sem comunicação para um conversor.	41
Figura 10 – Controle de um conversor representado pelo modelo médio.	42
Figura 11 – Resposta de P e Q à adição de carga para o <i>droop</i> convencional.	44
Figura 12 – Resposta de P e Q à adição de carga para o <i>droop</i> $Q - \omega$	45
Figura 13 – Respostas de potência à adição de carga para o <i>droop</i> misto.	46
Figura 14 – Curvas características das impedâncias de acoplamento.	50
Figura 15 – Obtenção gráfica dos pontos de operação.	52
Figura 16 – Efeito do aumento de n	53
Figura 17 – Exemplos de pontos de operação com ns distintos.	57
Figura 18 – Efeitos dos aumentos individuais e alternados dos ns (passos de 0,01).	58
Figura 19 – Ilustração do princípio de funcionamento do método de correção do compartilhamento de potência reativa a partir da perturbação de n	71
Figura 20 – Controle do conversor com as modificações do método QZ.	75
Figura 21 – Onda de perturbação de n e lógicas de aquisição de Q	76
Figura 22 – Resultados da aplicação do método QZ para rede com impedâncias genéricas.	78
Figura 23 – Resultados da aplicação do método QZ para rede com impedâncias puramente indutivas.	79
Figura 24 – Resultados da aplicação do método QZ para rede com impedâncias puramente resistivas.	80
Figura 25 – Resultados de Q e V para um caso com menor Δn	82
Figura 26 – Resultados de Q e V para um caso com menor Δn compensado pelo aumento de h	82
Figura 27 – Resultados de Q e V para um caso Δn original e h dobrado.	83
Figura 28 – Resultados da aplicação do método QZ para um caso com 3 conversores.	84
Figura 29 – Resultados da aplicação do método QZ para um caso com 3 conversores com potências nominais distintas.	85
Figura 30 – Resultados de uma simulação longa com aplicação contínua da metodologia.	87

Figura 31 – Efeitos da mudança de carga entre 8 e 9 minutos.	87
Figura 32 – Corrente instantânea durante a situação de instabilidade.	88
Figura 33 – Comportamento do critério $\Delta Z/Z$	90
Figura 34 – Variação de Z virtual e critério $\Delta Z/Z$ para uma simulação mais longa. . . .	90
Figura 35 – Comportamento do critério $\Delta(\Delta Z_{rel})$	92
Figura 36 – Aplicação do método de correção de compartilhamento de Q aliado a critério de parada.	92
Figura 37 – Comportamento do critério $\Delta(\Delta Z_{rel})$ em um caso com três conversores e limite de parada de 0,1.	93
Figura 38 – Comportamento das variações de impedância e da impedância acumulada em um caso com 3 conversores e limite de parada de 0,1.	94
Figura 39 – Comportamento do critério $\Delta(\Delta Z_{rel})$ e de ΔZ em um caso com três conversores e limite de parada de 0,5.	95
Figura 40 – Critério $\Delta Q_{n,rel}$ para a simulação exemplo com impedância genérica.	96
Figura 41 – Aplicação do método de correção de compartilhamento para 3 conversores com o critério de parada $\Delta Q_{n,rel}$ e $h = 0,015$	97
Figura 42 – Aplicação do método de correção de compartilhamento para 3 conversores com o critério de parada $\Delta Q_{n,rel}$ e $h = 0,018$	97
Figura 43 – Simulação com mudança de carga entre 8 e 9 minutos com aplicação do critério $ Z + \Delta Z $	99
Figura 44 – Resultados de Q e impedância virtual para simulação no patamar de carga alto.	100
Figura 45 – Simulação com mudança de carga entre 24 e 25 minutos com aplicação do critério $ Z + \Delta Z $ utilizando o valor de h do patamar de carga alto.	100
Figura 46 – Resultados de Q e impedância virtual para simulação com mudança de carga entre 10 e 11 minutos somente com a aplicação do critério $ Z + \Delta Z $	102
Figura 47 – Simulação com aumento de carga de 50% entre 8 e 9 minutos (caso 1).	105
Figura 48 – Simulação com diminuição de carga de 50% entre 8 e 9 minutos (caso 2).	105
Figura 49 – Simulação com aumento de carga de 50% entre 10 e 11 minutos (caso 3).	106
Figura 50 – Simulação com diminuição de carga de 50% entre 10 e 11 minutos (caso 4).	107
Figura 51 – Tensões para os quatro casos de variação de carga.	107
Figura 52 – Aplicação do critério $\Delta P_{n,rel}$ para o caso 1.	108
Figura 53 – Aplicação do critério $\Delta P_{n,rel}$ para o caso 2.	108
Figura 54 – Aplicação do critério $\Delta P_{n,rel}$ para o caso 3.	109
Figura 55 – Aplicação do critério $\Delta P_{n,rel}$ para o caso 4.	109
Figura 56 – Fluxograma do método de correção de compartilhamento de potência baseado na perturbação de n	110
Figura 57 – Simulação com o método Q_n para o caso com impedâncias puramente indutivas.	113
Figura 58 – Simulação com o método Q_n para o caso com impedâncias genéricas.	114
Figura 59 – Simulação com o método Q_n para o caso com impedâncias puramente resistivas.	115

Figura 60 – Simulação com o método Qn para o caso com 3 conversores (impedância genérica).	116
Figura 61 – Aperfeiçoamento do compartilhamento de potência no método Qn com a utilização de coeficientes h distintos (impedância genérica).	116
Figura 62 – Simulação com o método QV para o caso com impedâncias genéricas. . . .	118
Figura 63 – Simulação com o método QV para o caso com impedâncias puramente indutivas.	119
Figura 64 – Simulação com o método QV para o caso com impedâncias puramente resistivas.	119
Figura 65 – Simulação com o método QV para o caso com 3 conversores (impedância genérica).	120
Figura 66 – Aperfeiçoamento do compartilhamento de potência no método QV com a utilização de coeficientes h distintos (impedância genérica).	121
Figura 67 – Controle do conversor com as modificações do método QR.	123
Figura 68 – Simulação com o método QR para o caso com impedâncias genéricas. . . .	123
Figura 69 – Simulação com o método QR para o caso com impedâncias puramente indutivas. . . .	124
Figura 70 – Simulação com o método QR para o caso com impedâncias puramente resistivas.	125
Figura 71 – Simulação com o método QR para o caso com 3 conversores (impedância genérica).	125
Figura 72 – Simulação com o método QR para o caso de aumento de carga de 3x o valor nominal, entre 8 e 9 minutos, sem aplicação do critério $\Delta P_{n,rel}$ (impedâncias genéricas).	126
Figura 73 – Simulação de aumento de carga após correção do compartilhamento com o método QV (impedância genérica).	128
Figura 74 – Simulação de aumento de carga após correção do compartilhamento com o método QR (impedância genérica).	129
Figura 75 – Microrrede exemplo com cargas distribuídas para verificação da aplicabilidade dos métodos baseados em perturbação paramétrica.	132
Figura 76 – Esquema de controle e circuito de saída dos conversores.	132
Figura 77 – Equipamento Typhoon HIL modelo 404 conectado ao computador.	133
Figura 78 – Resultados de potência reativa para o método QR (com modelo chaveado para conversores).	135
Figura 79 – Resultados de simulação para método QR com idealização dos modelos dos conversores.	136
Figura 80 – Resultados de simulação para método QR (modelo médio) aumentando as impedâncias de acoplamento para $Z_{ac} = 0.2 + j 0.2\Omega$	137
Figura 81 – Resultados de simulação para método QR (modelo chaveado) aumentando as impedâncias de acoplamento para $Z_{ac} = 0.2 + j 0.2\Omega$	138

Figura 82 – Resultados de simulação para método QZ (modelo médio).	139
Figura 83 – Comparação entre os resultados do método QV com modelo médio e com modelo chaveado para os conversores.	140
Figura 84 – Comparação entre os resultados do método Qn com modelo médio e com modelo chaveado para os conversores.	141
Figura 85 – Resultados de simulação HIL do método QR com a aplicação do filtro de medição de Q e ajuste das impedâncias de acoplamento.	142
Figura 86 – Resultados de simulação HIL do método QV com a aplicação do filtro de medição de Q	143
Figura 87 – Resultados de simulação HIL do método Qn com a aplicação do filtro de medição de Q	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Parâmetros do circuito para as simulações exemplo.	43
Tabela 2	– Aberturas angulares entre a tensão de cada conversor e a tensão da carga para as simulações com <i>droop</i> convencional.	46
Tabela 3	– Tensões de regime nas saídas dos conversores e no ponto de acoplamento comum (valores rms).	47
Tabela 4	– Comparação entre os resultados obtidos a partir da Figura 15 e os resultados de simulação.	52
Tabela 5	– Comparação entre os pontos de operação antes e depois do aumento de n (valores simulados).	53
Tabela 6	– Parâmetros do circuito para a simulação com 3 conversores.	83
Tabela 7	– Parâmetros de controle (ganhos contínuos) e filtro de saída dos conversores (POGAKU; PRODANOVIC; GREEN, 2007).	133
Tabela 8	– Parâmetros da microrrede exemplo (KOSARI; HOSSEINIAN, 2017).	134

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

HIL	<i>Hardware-In-the-Loop</i>
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> - Modulação por Largura de Pulso
VSM	<i>Virtual Synchronous Machine</i> - Máquina Síncrona Virtual

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Potência Ativa
ω	Frequência angular
Q	Potência Reativa
V	Módulo da tensão
P_0	Potência Ativa do ponto de ajuste do <i>droop</i> $P - \omega$
ω_0	Frequência angular do ponto de ajuste do <i>droop</i> $P - \omega$
Q_0	Potência Reativa do ponto de ajuste do <i>droop</i> $Q - V$
V_0	Módulo da tensão do ponto de ajuste do <i>droop</i> $Q - V$
$\dot{V}$	Derivada do módulo da tensão
n	Coeficiente de inclinação do <i>droop</i> $Q - V$
m	Coeficiente de inclinação do <i>droop</i> $P - \omega$
δ_i	Diferença entre aberturas angulares da tensão produzida pelo conversor e da tensão no seu ponto de acoplamento à microrrede
θ_i	Abertura angular da tensão produzida pelo conversor
θ_{ic}	Abertura angular da tensão no ponto de acoplamento do conversor à microrrede
S_i	Potência complexa produzida pelo conversor
V_i	Fasor da tensão produzida pelo conversor
V_{ic}	Fasor da tensão produzida pelo conversor
Z_i	Impedância de acoplamento de um conversor à microrrede
Z_i^*	Conjugado da impedância de acoplamento de um conversor à microrrede
S_{ic}	Potência complexa após subtraídas as perdas da impedância de acoplamento
$ Z_i $	Módulo da impedância de acoplamento
R_i	Resistência - parte real da impedância de acoplamento
X_i	Reatância - parte imaginária da impedância de acoplamento

α_i	Argumento da impedância de acoplamento
P'	Termo de potência mista análogo à potência ativa
Q'	Termo de potência mista análogo à potência reativa
S'	Potência complexa mista
v_o^*	Tensão de referência do controle de um conversor
P_R	Potência Ativa nominal do conversor
Q_R	Potência Reativa nominal do conversor
N	Número de conversores da microrrede
K	Diferença entre a frequência angular de operação e a de ajuste (Constante)
a	Constante de proporcionalidade entre P_0 e P_R
b	Constante de proporcionalidade entre P e P_R
c	Diferença entre β e α
K'	Constante de proporcionalidade inversa entre m e P_R
K''	Constante de proporcionalidade inversa entre n e Q_R
V_L	Módulo da tensão no ponto comum de carga
θ_L	Abertura angular da tensão no ponto comum de carga
V_b	Base de tensão (sistema por unidade)
Q_b	Base de Potência (sistema por unidade)
S_{iL}	Potência entregue por um conversor à carga concentrada
V_L	Fasor da tensão no ponto comum de carga
P_{iL}	Potência ativa entregue por um conversor à carga concentrada
Q_{iL}	Potência reativa entregue por um conversor à carga concentrada
S_L	Potência complexa solicitada pela carga concentrada
I_L	Fasor da corrente solicitada pela carga concentrada
Z_L	Impedância da carga concentrada
P_L	Potência ativa consumida pela carga concentrada

Q_L	Potência reativa consumida pela carga concentrada
R_L	Resistência da carga concentrada
X_L	Reatância da carga concentrada
$\varepsilon(Q_i)$	Erro entre a potência reativa entregue por um conversor e a média das potências
Q_m	Valor médio de potência reativa fornecida pelos conversores
σ	Variância do conjunto de valores de potência reativa
$\langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle$	Produto interno entre dois vetores $\mathbf{u}$ e $\mathbf{v}$
h	Constante de proporcionalidade para o cálculo de variações paramétricas
k	Sinal alternante para o cálculo de variações paramétricas
C	Número de ciclos completos de perturbação de n
s	Índice do passo de perturbação de n
Z_v	Impedância virtual acumulada
$\Delta Z_{v,s}$	Variação de impedância virtual do s -ésimo passo
$\Delta Q_{n,s}$	Variação de potência reativa provocada pela variação de n do s -ésimo passo
V'	Termo de tensão do <i>droop</i> convencional
Δn	Variação do coeficiente n
ΔZ	Variação de impedância virtual
$\Delta(\Delta Z)_{rel}$	Variação relativa de ΔZ
$\Delta Q_{n,rel}$	Variação relativa de Q devido a n
$\Delta P_{n,rel}$	Variação relativa de P devido a n
$\Delta \rho_s$	Variação paramétrica do s -ésimo passo de perturbação
Δn_{ac}	Variação de n acumulada
Δn_s	Variação de n do s -ésimo passo de perturbação
ΔV_{ac}	Variação de V_0 acumulada
ΔV_s	Variação de V do s -ésimo passo de perturbação

R_v	Resistência virtual
i	Corrente instantânea de saída entregue pelo conversor
R_v	Resistência virtual
ΔR_s	Variação de resistência virtual do s-ésimo passo
C_f	Capacitância do filtro de saída
L_f	Indutância do filtro de saída
r_f	Resistência da indutância do filtro de saída
L_c	Indutância de acoplamento do filtro de saída
r_{Lc}	Resistência da indutância de acoplamento do filtro de saída
K_{pv}	Ganho proporcional do controle de tensão
K_{iv}	Ganho integrativo do controle de tensão
K_{pi}	Ganho proporcional do controle de corrente
K_{ii}	Ganho integrativo do controle de corrente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	FUNDAMENTAÇÃO E NOVAS PERSPECTIVAS TEÓRICAS SOBRE O PROBLEMA DE COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA .	27
2.1	Controle por inclinação: propósitos, origens e discussões	27
2.2	O problema do compartilhamento de potência	47
2.3	O método de correção do compartilhamento de potência reativa a partir da perturbação de n	69
3	INVESTIGAÇÕES E PROPOSIÇÕES PARA O MÉTODO DE CORREÇÃO DE COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA E SUAS VARIANTES	74
3.1	Implementação e investigações em simulação	75
3.1.1	A necessidade de um critério de parada e de uma limitação da variação de impedância virtual	86
3.1.2	Aperfeiçoamento da operação sob mudança de carga	98
3.2	Variantes do método de correção do compartilhamento de potência reativa a partir da perturbação de n	111
3.2.1	Correção de compartilhamento de potência por modificação de n	112
3.2.2	Correção de compartilhamento de potência por modificação de V_0 . . .	117
3.2.3	Correção de compartilhamento de potência por adição de resistência virtual	121
3.3	Comparação qualitativa entre os métodos apresentados	127
4	SIMULAÇÃO HIL DOS MÉTODOS PROPOSTOS COM MODELAGEM DE CONVERSORES EM UMA MICRORREDE GENÉRICA . .	131
5	CONCLUSÕES	146
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	147
	REFERÊNCIAS	149

1 INTRODUÇÃO

A premissa fundamental de qualquer sistema elétrico é garantir o fornecimento de energia com qualidade e confiabilidade, gerenciando os seus diversos recursos energéticos para atender à demanda de carga. Desde as primeiras utilizações da eletricidade como forma de realizar trabalho e iluminar ambientes em meados do século XIX, o crescimento de suas aplicações possíveis nos mais diversos setores da sociedade, como a indústria, o setor residencial e o setor de serviços, atrelou o desenvolvimento energético de um país ao seu desenvolvimento econômico e social. Nesse sentido, a demanda elétrica tem sido, em geral, sempre crescente ao longo do tempo, salvo raras exceções históricas como durante a pandemia de Covid-19, em que houve severa retração do consumo em virtude das restrições necessárias à resolução dessa crise global de saúde (IEA, 2020). No mundo contemporâneo, impensável na ausência de energia elétrica, novas aplicações com grande potencial de escalabilidade e difusão na sociedade, como a utilização de carros elétricos e de inteligência artificial, diretamente associada à construção de *Data Centers*, geram expectativas e preocupações sobre o aumento que podem causar na demanda por energia, ou, sob outro ponto de vista, sobre o quanto essas novas atividades serão impactadas caso o setor elétrico não consiga responder ao seu crescimento, em termos não só de geração, mas de infraestrutura de transmissão e distribuição (IEA, 2024).

De maneira simplificada, esse é o problema energético enfrentado continuamente pela humanidade: atender às demandas sempre crescentes por energia fazendo-se uso de recursos limitados. Se não por limitações físicas e ambientais, por limitações tecnológicas. As soluções de hoje tornar-se-ão os problemas de amanhã à medida em que sempre é necessário buscar novas fontes de geração, aumentar a eficiência de processos e, possivelmente, repensar a própria estrutura do setor elétrico a fim de suplantarmos os desafios que constantemente se renovam. Ao longo do desenvolvimento dos sistemas elétricos durante o século XX, a estratégia que prevaleceu para abordagem do problema energético consiste em organizar a geração de forma centralizada, em grandes centros geradores, distantes dos centros de carga e conectados a eles por redes de transmissão, as quais, em geral, interligam grandes extensões de um país e são, por sua vez, ligadas às redes de distribuição, que ficam próximas às cargas. Esse paradigma da geração centralizada vem sendo desafiado, tanto por razões econômicas, associadas ao custo da operação e infraestrutura dos sistemas elétricos, quanto pela crescente penetração de fontes renováveis nas matrizes energéticas, principalmente as fontes eólica e solar. Essas fontes trazem grandes desafios a uma operação centralizada do sistema, uma vez que não são despacháveis ou controláveis, diferentemente das fontes tradicionais, como a hidrelétrica, a térmica e a nuclear.

Em contrapartida, as fontes renováveis, além de estarem associadas a um forte discurso de mitigação de impactos ambientais, possibilitam, especialmente no caso da fotovoltaica, a alocação da geração muito próxima à carga, configuração implementada com base em um conceito que se tornou um dos pilares da descentralização pela qual passam os setores elétricos ao redor

do mundo: o conceito de microrredes. Tal como definido em meados de 2002, as microrredes modernas podem ser entendidas como pequenos sistemas elétricos inteligentes, dotados de fontes de geração locais e dispositivos de armazenamento, o que as torna capazes de operar tanto de maneira coordenada à rede de distribuição quanto de maneira autossuficiente, provendo atendimento às respectivas cargas de forma independente da rede centralizada quando necessário (LASSETER, 2002). Embora o conceito moderno seja relativamente recente, considera-se que as primeiras microrredes surgiram ainda no início do desenvolvimento da própria eletricidade, com a estação de Pearl Street, nos Estados Unidos, idealizada por Thomas Edison em 1882 (COHN, 2019). Essa microrrede precursora e, ao mesmo tempo, a primeira estação de energia elétrica do mundo (SOARES; OLIVEIRA, 2022), fazia uso de geração a partir de fontes térmicas com o propósito de alimentar as primeiras lâmpadas elétricas de residências e comércios próximos, antes mesmo do desenvolvimento dos sistemas de geração, transmissão e distribuição que viriam a se tornar, no século seguinte, o padrão elétrico de grande escala.

Na segunda metade do século XX, entretanto, eventos de grande choque econômico e energético, como a crise do petróleo em 1973, ocasionaram, especialmente nos países cuja matriz energética é mais dependente de combustíveis fósseis, uma busca por diversificação de fontes, a qual, aliada às preocupações ambientais que ganharam força também nessa época, fomentou o desenvolvimento e a forte integração de fontes renováveis nas matrizes energéticas que se observa na atual conjuntura. No entanto, essa argumentação de uma contraposição entre uma geração predominantemente térmica, baseada em combustíveis fósseis, e uma transição para uma matriz renovável é mais adequada especificamente para países como os Estados Unidos, alguns países da Europa e a China. No caso do Brasil, que teve o desenvolvimento de seu sistema de geração centralizado com forte base hidrelétrica, fonte renovável e que ainda deverá ter grande importância futura na matriz nacional, o discurso de contraposição às fontes eólica e solar não se aplica. Ainda assim, os impactos socioambientais causados pela construção das hidrelétricas com grandes reservatórios, os quais possibilitam flexibilidade operativa fornecendo energia firme ao sistema, têm interposto entraves à expansão desse tipo de unidade geradora no Brasil (EPE, 2018). Ironicamente, é justamente esse tipo de geração, controlável e despachável, que permite o aumento da inserção de fontes com característica de geração intermitente, fortemente dependentes de condições climáticas locais e instantâneas, ou limitadas a certos períodos do dia, i.e. as fontes eólica e solar.

Nos países em que as fontes firmes são térmicas, a contradição pode ser ainda maior, uma vez que o crescimento das capacidades instaladas das fontes renováveis pode provocar também um crescimento das fontes fósseis, como tem acontecido na China, que enfrenta grandes desafios para integração desses recursos e expansão energética, considerando as especificidades regionais e a necessidade de construção de novas usinas a carvão, ainda que em parte como fonte reserva, à medida em que se expandem as gerações eólica e solar (SHUWEI, 2023). Exemplos como esse evidenciam que, ao menos do ponto de vista de um setor elétrico centralizado, não existe propriamente uma substituição de fontes tradicionais por fontes renováveis. Muito pelo contrário,

a resposta para o problema da segurança energética tem sido a diversificação das matrizes, o que traz, inerentemente, a questão do gerenciamento da operação dos sistemas e planejamento de infraestrutura de transmissão, visando o balanceamento entre geração e carga, inclusive entre regiões distantes de um mesmo país. Os critérios para gerenciamento do despacho geralmente são econômicos, de custo marginal de operação, embora também existam restrições operativas que podem provocar o corte de gerações renováveis, adicionando ao problema muito mais do que simplesmente questões ambientais ou mesmo de custo, mas também de operação e confiabilidade.

Por mais bem planejado que seja um sistema elétrico centralizado, ele pode não ser flexível o suficiente para comportar fontes com dinâmicas mais rápidas e não controláveis, especialmente se considerado que a própria construção de complexas malhas de transmissão, necessárias a essa flexibilidade de despacho a níveis nacionais, avança em um ritmo muito mais lento que a introdução de novas fontes renováveis geradoras, como tem acontecido recentemente no Brasil. Essas dificuldades resumem o dilema atual do setor elétrico, direcionando-o à sua descentralização, questão que divide opiniões com relação aos limites dessa reformulação (MARTINS; DINIZ; BARROS, 2020). De toda forma, o fato é que as microrredes são uma parte criticamente importante à resolução desse dilema energético, possibilitando a integração de gerações próximas às cargas e gerenciamento local de potência, o que, aliás, é um dos problemas cuja resolução é de fundamental importância à correta operação desses sistemas, tal como para as redes de grande porte.

Quando operam conectadas à rede de distribuição, por meio do denominado ponto de acoplamento comum (PAC), as microrredes têm as potências de seus recursos geradores definidas de acordo com critérios de despacho econômico, ficando a tensão e frequência de operação estabelecidas pela rede. Na ocorrência de condições adversas de operação, como faltas ou afundamentos da tensão na rede de distribuição, o ponto de conexão inteligente da microrrede deve ser capaz de identificar o problema e executar uma operação de ilhamento, isolando as cargas e fontes da microrrede e permitindo a continuidade de sua operação de maneira independente. Nessa situação, as referências de tensão e frequência deverão ser estabelecidas pelos próprios conversores da microrrede, bem como o despacho gerenciado de forma a compartilhar as cargas de maneira proporcional à potência nominal de cada conversor.

Esses objetivos podem ser atingidos, basicamente, de duas maneiras: com ou sem sistemas de comunicação entre os conversores. Considerando que a microrrede tenha apenas recursos conectados por meio de conversores, sem nenhum gerador síncrono, a primeira estratégia requer que pelo menos um deles, denominado "formador de rede", opere sendo controlado em tensão, enquanto os demais, denominados "seguidores de rede", podem operar controlados em corrente para fornecer potências determinadas por um controle hierárquico superior da microrrede. Tal abordagem, embora bastante eficaz no quesito do compartilhamento de potência, requer a interconexão dos conversores por meio de um sistema de comunicação, o que pode limitar a distância entre eles e adiciona uma certa complexidade operacional, uma vez que se deve considerar também os atrasos nos sinais de referência, ocasionados pela transmissão de

sinais. Além disso, o funcionamento correto da microrrede fica dependente desse aparato de comunicação, o que diminui a confiabilidade da operação. (HAN et al., 2017)

Em contrapartida, a abordagem de controle sem comunicação, foco deste trabalho, traz desafios com respeito ao compartilhamento de potência, uma vez que a operação de cada conversor é, nesse caso, autorregulada unicamente por meio das medições locais das próprias potências. Para isso, utiliza-se o controle por inclinação, também denominado controle *droop*, de forma a estabelecer relações entre as potências, ativa e reativa, e as variáveis de frequência e módulo da tensão fornecidas pelo conversor, à semelhança do controle utilizado para máquinas síncronas. O compartilhamento da potência ativa, priorizado em relação ao da potência reativa, pode ser atingido com perfeição, bastando para isso que se associe essa variável à frequência, por meio do *droop* $P - \omega$, dado que se escolham os coeficientes de inclinação considerando a proporção entre as potências nominais dos conversores.

Como será discutido com mais detalhes no Capítulo 2, o mesmo não ocorre com a potência reativa, associada à tensão pelo *droop* $Q - V$, por conta das assimetrias entre as impedâncias da microrrede. Neste ponto, é importante salientar que, à medida em que se expande a utilização de geração distribuída para as mais diversas aplicações, como instalações militares, hospitalares e empresariais, as microrredes tornam-se mais complexas e de maior tamanho. Outro exemplo são as denominadas *Campusgrids*, que visam atender às necessidades de grandes *Campi* universitários reduzindo os custos com contratação de energia, tendo essa estratégia sido adotada em várias universidades ao redor do mundo (MUQEET et al., 2021). Em cenários como esse, em que as microrredes podem abranger uma certa extensão física, é inevitável que haja um distanciamento considerável entre os conversores e diferentes impedâncias entre cada conversor e as cargas, de modo a ocasionar desbalanceamentos de potência reativa. A severidade desses desequilíbrios pode levar à sobrecarga de alguns dos conversores da microrrede ou, em casos mais extremos, ocasionar recirculação de potência entre eles, de modo que é necessário, para viabilizar a abordagem sem comunicação, utilizar algum artifício de controle além do *droop* convencional. Várias estratégias já foram propostas, cada uma com suas vantagens e desvantagens, para tentar contornar esse problema, ainda considerado como uma temática em aberto (ROSINI et al., 2021).

Uma abordagem bastante utilizada e que rendeu muitas derivações é a da impedância virtual, originalmente idealizada por Guerrero et al. (2005). Essa estratégia utiliza uma modificação no controle de tensão dos conversores que pode ser interpretada como a adição de uma impedância de saída virtual ao conversor, a qual é projetada manipulando os ganhos do controle e pode ser escolhida de maneira a equilibrar os desbalanços de potência. Além disso, essa abordagem proporciona também compartilhamento de cargas não lineares, uma vez que se pode fazer a característica da impedância virtual variável com a frequência. No entanto, a escolha dos valores de impedância virtual não segue um método bem definido e generalizado, sendo praticamente um processo heurístico, mesmo para as variantes mais recentes dessa ideia (ROSINI et al., 2021), além do que se pode criticar que essa abordagem foi desenvolvida considerando uma topologia simplificada da microrrede, com os conversores em paralelo, ligados a um ponto comum de

carga.

Outra metodologia propõe a utilização de uma relação entre a potência reativa e a derivada da tensão, denominada $Q - \dot{V}$, aliada a um mecanismo restaurador de tensão. A premissa é realizar o compartilhamento de potência de forma semelhante ao do *droop* $P - \omega$, no qual a potência está relacionada à derivada do ângulo da tensão produzida (LEE; CHU; CHENG, 2013). A aplicação desse método, conforme demonstração na própria referência, equivale à aplicação do *droop* convencional com um valor equivalente de inclinação, ou seja, do coeficiente n , produzindo-se o mesmo resultado de regime permanente. Como é bem documentado na literatura, o aumento de n provoca diminuição no erro de compartilhamento de potência reativa, ao custo de diminuir também a tensão na carga (para uma microrrede com carga concentrada) (LIU et al., 2019). Essa prática pode ser considerada, inclusive, como um método simplificado para melhoria no compartilhamento de potência, embora não consiga atingir uma boa aproximação entre os valores de Q além de certo ponto. Portanto, a “equivalência” entre o método $Q - \dot{V}$ e o método de aumento de n explica por que essa técnica, a despeito de quaisquer possíveis vantagens dinâmicas, não consegue atingir compartilhamento de potência perfeito, sendo esse um dos argumentos para crítica dessa metodologia (AZEVEDO et al., 2019).

Outra abordagem possível para o problema de compartilhamento de potência realiza modificações nas equações *droop* originais, introduzindo um acoplamento entre os *droops* de potência ativa e reativa apenas durante o transitório de correção do compartilhamento. Esse método requer um canal de comunicação entre cada conversor e um controle central, de onde é acionado o início do processo, para que ocorra sincronamente em todos os conversores. Após recebimento do comando, ocorre a modificação das relações de inclinação, adicionando-se ao *droop* de potência ativa o termo de potência reativa e ao *droop* de potência reativa um termo integral que utiliza as diferenças entre o valor transitório de potência ativa e o anterior ao início do processo para calcular um fator de correção que permanecerá ao final do processo, garantindo bom compartilhamento de potência reativa (HE; LI, 2012). Uma limitação desse método, embora o transitório do processo de correção seja rápido, é que a microrrede não pode sofrer mudanças de carga durante a execução da metodologia, problema que ainda pode ser contornado utilizando esquemas de detecção de mudança de carga (KOSARI; HOSSEINIAN, 2017).

As estratégias citadas representam apenas uma fração dos inúmeros métodos e variantes existentes para solução do problema de compartilhamento de potência, cada uma com suas vantagens, desvantagens e limitações. Todos esses métodos, entretanto, partem de certos princípios, já bastante estabelecidos na literatura, desenvolvendo seus argumentos com base na estrutura básica do *droop* convencional. Esse arcabouço básico do problema de compartilhamento de potência tem sido apresentado de maneira consistente, porém fragmentada, na literatura sobre o tema, de forma que alguns aspectos carecem de esclarecimentos e outros podem até ser questionados. Esse processo, de compreensão e questionamento, é fundamental para que se atinja o âmago da questão, possibilitando que se proponha novas abordagens, sempre tendo em mente o propósito de resolver o problema de compartilhamento de potência em microrredes com

uma metodologia de ampla e simples aplicação. O Capítulo 2 deste trabalho se prestará a essas discussões teóricas, das quais já se pode adiantar um questionamento importante e, até onde permite o conhecimento do autor, inédito na área em questão.

Conforme já dito, é bem estabelecido que a potência ativa pode ser compartilhada perfeitamente através do *droop* $P - \omega$, bastando que se escolham os coeficientes de inclinação m inversamente proporcionais às potências nominais dos conversores, fato que será demonstrado no Capítulo 2. Embora esse mesmo comportamento não aconteça para o *droop* $Q - V$, convencionou-se utilizar os coeficientes de inclinação n também proporcionais, à semelhança dos coeficientes m , e todas as estratégias de compartilhamento de potência partem dessa premissa básica. Como bem se sabe, entretanto, essa escolha não resulta, por si só, em compartilhamento proporcional de potência reativa. A proporcionalidade entre os coeficientes n é, portanto, uma regra desnecessária. Mais ainda, é uma restrição, uma condição de contorno extra, que pode atrapalhar a resolução do problema estudado, o qual é, tão somente, obter a proporcionalidade entre os valores de Q . Como será mostrado no Capítulo 2, ainda que de maneira empírica, é possível escolher um conjunto de valores de n que não segue qualquer regra de proporcionalidade e resulta em compartilhamento proporcional de potência reativa.

Esse novo ponto de vista fomentou a procura por uma metodologia que envolvesse a busca por esse conjunto de valores de n , de preferência prescindindo de quaisquer informações prévias sobre o circuito da microrrede. Uma abordagem com base na perturbação de parâmetros, naturalmente sugerida pela própria investigação teórica realizada, e que fosse capaz de, a partir de perturbações controladas no ponto de operação da microrrede, indicar as modificações necessárias em seus parâmetros para equilíbrio das potências atenderia aos propósitos pretendidos. Pelo menos uma metodologia como essa já fora proposta, pouco antes do início desta pesquisa (WU; ZHANG; ZHAN, 2023). No entanto, essa abordagem, embora seja capaz de apresentar uma solução ao problema de compartilhamento, carece de melhor compreensão de seus princípios de funcionamento e de um exame cuidadoso de algumas situações que podem prejudicar sua aplicação.

A despeito disso, a ideia central proposta por essa metodologia, principalmente a sua forma de cálculo de variações paramétricas a partir da variação de potência reativa, é valiosíssima, tendo servido como ponto de partida para a proposição, neste trabalho, de três variantes dessa metodologia, as quais buscam não somente melhorar o desempenho, mas também a formulação original, inclusive considerando, em uma das possibilidades, o novo ponto de vista da não obrigatoriedade da proporcionalidade entre os coeficientes n . Assim como os demais métodos já existentes na literatura, a proposta de Wu, Zhang e Zhan (2023) também considera a proporcionalidade entre esses coeficientes e, como será mostrado, pode ser modificada justamente para encontrar conjuntos de valores de n não proporcionais e que resultam em bom compartilhamento de potência reativa.

Almeja-se que esse desenvolvimento traga contribuições ao tema do compartilhamento de potência, tanto no campo teórico, a partir da revisão, crítica e interpretação dos conceitos

e premissas desse tema, quanto para a busca de soluções de compartilhamento de potência generalizáveis a qualquer microrrede e de fácil aplicação. As contribuições deste trabalho podem ser resumidas basicamente em 4 aspectos:

- Proposição de um novo viés teórico para a abordagem do problema de compartilhamento de potência, tendo como premissa a não obrigatoriedade da escolha proporcional dos coeficientes n no *droop* $Q - V$;
- Revisão teórica de certos aspectos do controle por inclinação, apresentando novas observações e demonstrações de comportamentos já conhecidos, dentre eles o efeito de diminuição do erro de compartilhamento de potência reativa provocado pelo aumento dos coeficientes n .
- Aprofundamento da compreensão sobre o método proposto por Wu, Zhang e Zhan (2023), inclusive evidenciando e solucionando algumas de suas limitações; e
- Proposição de 3 variantes desse método, reformulando a abordagem original com o intuito de compreendê-la fundamentalmente e explorar as possibilidades oriundas da perturbação de parâmetros.

Quanto à organização do texto, o Capítulo 2 se concentra na fundamentação teórica tanto do problema de compartilhamento de potência quanto da metodologia de perturbação de parâmetros, que é o foco deste trabalho, realizando críticas e reformulações com o intuito de fortalecer o arcabouço teórico desses assuntos e preparar a fundação para o Capítulo 3. Este, por sua vez, investiga o comportamento dessa metodologia em simulação, além de propor três variantes independentes da metodologia original, todas elas dotadas de uma formulação clara e capazes de desempenho satisfatório no compartilhamento de potência reativa, o que serve como uma "prova de conceito" para as metodologias propostas. As simulações realizadas nesse capítulo, consideram, entretanto, uma modelagem simplificada para os conversores de potência, utilizando-se o modelo médio, de forma que no Capítulo 4 é realizado mais um passo em direção à aplicação prática dessas metodologias, com o desenvolvimento de simulações *Hardware-in-the-Loop* (HIL) considerando o modelo chaveado para os conversores em uma aplicação com uma topologia genérica de microrrede. Essa nova etapa evidenciou potenciais dificuldades anteriormente não observadas, as quais, ainda que tenham sido contornadas, ensejam mais investigações sobre o tema, para que se possa estabelecer de fato a generalidade das metodologias propostas. O Capítulo 5 encerra o texto com as conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

2 FUNDAMENTAÇÃO E NOVAS PERSPECTIVAS TEÓRICAS SOBRE O PROBLEMA DE COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA

Uma vez já introduzido o problema de compartilhamento de potência de forma conceitual e citadas algumas possíveis abordagens à sua solução, faz-se necessário aprofundar o entendimento matemático do método de correção do compartilhamento de potência reativa a partir da perturbação de n , tanto para esclarecer os princípios de seu funcionamento quanto para verificar a sua generalidade. Antes, porém, é importante reabordar teoricamente o controle *droop* convencional, por ser esse o ponto de partida para qualquer discussão acerca do problema de compartilhamento de potência, mas, além disso, para acrescentar a essas discussões algumas observações inéditas.

2.1 CONTROLE POR INCLINAÇÃO: PROPÓSITOS, ORIGENS E DISCUSSÕES

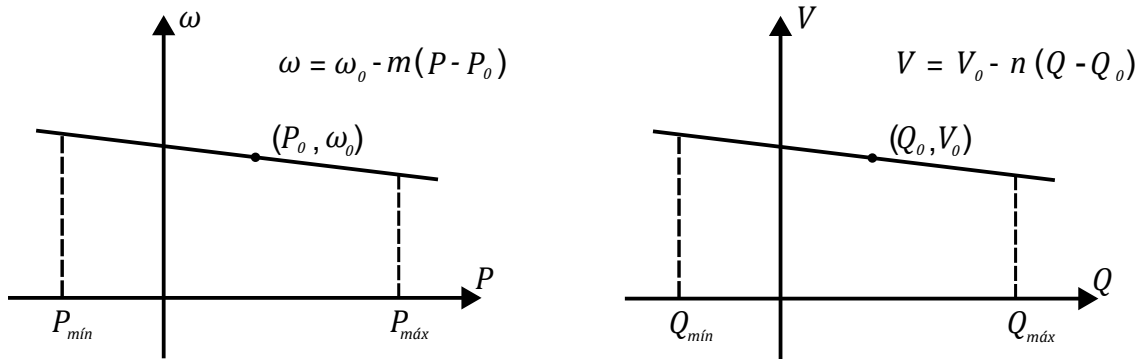
O propósito do controle por inclinação é adicionar à dinâmica dos conversores, de maneira artificial, relações entre a tensão produzida (magnitude e frequência) e as potências ativa e reativa entregues pelo conversor, mimetizando o comportamento de uma máquina síncrona. Essa abordagem confere aos conversores a capacidade de operação em paralelo inclusive na ausência de um sistema de comunicação e das já citadas estratégias "formador-seguidor", uma vez que suas tensões são auto-reguladas com base unicamente nas medições de potência em seus terminais (COELHO; CORTIZO; GARCIA, 2002 apud AZEVEDO, 2011). Conforme já introduzido, a crescente penetração de geração distribuída nos sistemas elétricos enseja preocupações com relação à estabilidade da frequência de operação da rede, aspecto fortemente relacionado, nos sistemas elétricos tradicionais, à inércia inerente às máquinas síncronas. Essa última característica pode ser emulada nos conversores, constituindo o que comumente se denomina por adição de inércia virtual, a partir de várias abordagens, sendo o controle por inclinação a mais simples delas (JAFARI; GHAREHPETIAN; ANVARI-MOGHADDAM, 2024).

Devido à natureza eletromecânica específica das máquinas síncronas, quanto maior for a potência ativa entregue pela máquina, menor será a sua velocidade de rotação, e, portanto, menor será a frequência da tensão gerada, constituindo uma relação inversa (denominada *drooping*) entre potência ativa e frequência, que pode ser feita linear por um mecanismo governador (CHAPMAN, 2012, p.229-331). Relação análoga ocorre para a magnitude da tensão e a potência reativa. Sob esse ponto de vista, é possível interpretar que a abordagem do controle *droop* convencional impõe essas relações aos conversores, ou seja, impõe diretamente o resultado, em termos elétricos, das características de operação da máquina síncrona. Por outro lado, as abordagens de máquina síncrona virtual (VSM) buscam modelar de fato o comportamento eletromecânico desse elemento, por meio das equações relevantes. De acordo com D'Arco e Suul (2014), ambas as alternativas são experimentalmente e matematicamente equivalentes, o que se demonstra levando em consideração para a análise da primeira os filtros passa baixa necessários

para as medições de potência.

Embora os argumentos apresentados até então indiquem que as características de inclinação $P - \omega$ e $Q - V$, apresentadas na Figura 1, são de fato adequadas para emular o comportamento da máquina síncrona, não necessariamente é preciso realizar a representação fiel desse elemento a fim de obter uma microrrede estável. Pelo fato de se tratar de um artifício, existe uma certa liberdade na elaboração do controle por inclinação nos conversores, tanto que há várias abordagens com *droop* modificado já citadas que visam melhorar o compartilhamento de potência reativa.

Figura 1 – Características de inclinação $P - \omega$ e $Q - V$ com pontos de ajuste (P_0, ω_0) e (Q_0, V_0) .



Fonte: O autor (2024).

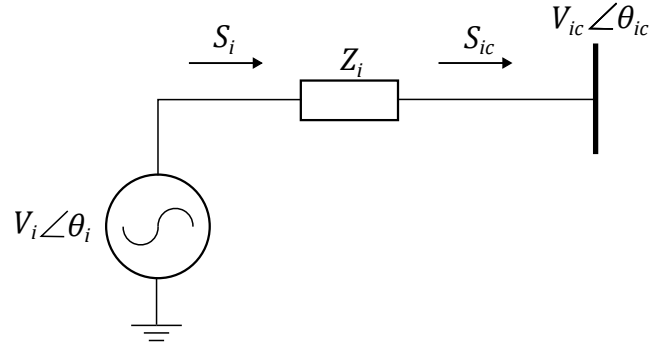
Outra maneira de discutir a validade do controle *droop* é por meio de uma análise de fluxo de potência, abordagem que, além de poder ser condizente com o argumento da artificialização do comportamento da máquina síncrona, também abre outras possibilidades para o controle por inclinação. Em geral, um conversor é conectado ao restante da microrrede por uma impedância de acoplamento, que engloba a impedância de saída do conversor e a impedância de uma linha. A Figura 2 mostra um conversor conectado pela impedância de acoplamento ao ponto de acoplamento com a microrrede. Para essa análise de regime permanente, os conversores são modelados de forma simplificada, como fontes de tensão.

A potência complexa entregue pelo i -ésimo conversor, medida nos seus terminais, pode ser expressa de acordo com a equação

$$S_i = V_i \left(\frac{V_i - V_{ic}}{Z_i} \right)^* = \frac{V_i^2 - V_i V_{ic} e^{j\delta_i}}{Z_i^*}, \quad (1)$$

em que V_i é o fasor da tensão nos terminais do conversor, V_{ic} é o fasor da tensão no ponto de acoplamento, Z_i é a impedância de acoplamento e $\delta_i = \theta_i - \theta_{ic}$, com as variáveis θ representando as fases das respectivas tensões.

Figura 2 – Conversor ligado à microrrede por ponto de acoplamento.



Fonte: O autor (2024).

Multiplicando pelo conjugado da impedância e tomando as partes real e imaginária, obtém-se as expressões para P e Q:

$$S_i = \frac{(V_i^2 - V_i V_{ic} e^{j\delta_i}) Z_i}{|Z_i|^2} ; Z_i = R_i + jX_i .$$

$$\begin{cases} P_i = R_i \frac{V_i^2}{|Z_i|^2} - \frac{R_i V_i V_{ic} \cos \delta_i}{|Z_i|^2} + \frac{X_i V_i V_{ic} \sin \delta_i}{|Z_i|^2} , \\ Q_i = X_i \frac{V_i^2}{|Z_i|^2} - \frac{R_i V_i V_{ic} \sin \delta_i}{|Z_i|^2} - \frac{X_i V_i V_{ic} \cos \delta_i}{|Z_i|^2} . \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P_i = R_i \left[\frac{V_i (V_i - V_{ic} \cos \delta_i)}{|Z_i|^2} \right] + X_i \left[\frac{V_i V_{ic} \sin \delta_i}{|Z_i|^2} \right] , \\ Q_i = X_i \left[\frac{V_i (V_i - V_{ic} \cos \delta_i)}{|Z_i|^2} \right] - R_i \left[\frac{V_i V_{ic} \sin \delta_i}{|Z_i|^2} \right] . \end{cases} \quad (2)$$

A partir das equações obtidas, usualmente são consideradas duas possibilidades para a natureza da impedância de acoplamento (GUERRERO et al., 2005): puramente indutiva e puramente resistiva. Para o primeiro caso, considerando $R_i = 0$ e $Z_i = jX_i$, as Equações (2) e (3) tornam-se

$$\Rightarrow \begin{cases} P_i = \frac{V_i V_{ic} \sin \delta_i}{X_i} , \\ Q_i = \frac{V_i (V_i - V_{ic} \cos \delta_i)}{X_i} . \end{cases} \quad (4)$$

Para simplificar ainda mais, pode-se considerar $\delta \approx 0$, o que é verdade para a maioria das aplicações práticas. Com essa aproximação, é possível desacoplar P e Q , de modo que a potência ativa seja dependente da abertura angular entre a tensão gerada e a tensão do ponto

de acoplamento, e, portanto, dependente da frequência da tensão gerada; e, além disso, que a potência reativa seja dependente da diferença entre as magnitudes das tensões gerada e de acoplamento, conforme as equações

$$\begin{aligned} \xrightarrow[\cos \delta \approx 1]{\sin \delta \approx \delta} \left\{ \begin{aligned} P_i &= \frac{V_i V_{ic} \delta_i}{X_i}, \\ Q_i &= \frac{V_i (V_i - V_{ic})}{X_i}. \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad \begin{aligned} (6) \\ (7) \end{aligned}$$

Esse comportamento é condizente com um controle *droop* com características de inclinação $P - \omega$ e $Q - V$, possibilidade já introduzida com o argumento da virtualização da máquina síncrona. As aproximações realizadas facilitam uma análise intuitiva sobre a estabilidade do sistema, pois é imediato observar que uma pequena variação positiva na frequência da tensão gerada implicará em aumento da diferença angular δ e, conseqüentemente, de P . Adotando o controle *droop* mostrado na Figura 1, o aumento da potência ativa provocará uma diminuição na frequência da tensão gerada. Em outras palavras, o controle adotado reage a uma perturbação na frequência com um efeito restaurador, o que indica comportamento estável. Análise semelhante pode ser realizada para a relação $Q - V$. Para essas análises, considera-se que a tensão no ponto de acoplamento permanece constante, tanto em termos de magnitude como de frequência.

É importante ressaltar que a natureza indutiva da impedância de acoplamento não é um requisito para operação estável da rede quando utilizado o *droop* convencional, nem tampouco restringe o uso das características da Figura 1 a esse caso. Embora seja evidente a estabilidade para a situação específica mostrada (*droop* convencional, linha indutiva e $\delta \approx 0$), isso não significa que essa situação seja a única que possibilite operação estável. Conforme já dito, existe grande liberdade na escolha da estratégia de controle utilizada e, para cada caso, é necessário estudar a escolha de parâmetros adequada que resultará em operação estável da microrrede. Tanto é que a maioria dos trabalhos acadêmicos que propõem metodologias de controle para os conversores de uma microrrede realiza análises dinâmicas de pequenos sinais para demonstrar sua validade e indicar quais os limites de variação de seus parâmetros (GUERRERO et al., 2007; HE; LI, 2012; LEE; CHU; CHENG, 2013; KOSARI; HOSSEINIAN, 2017).

Não sendo objetivo deste trabalho realizar essas análises dinâmicas, mas sim discutir e propor soluções ao problema de compartilhamento de potência, serão realizadas apenas verificações, a título de contra exemplo, do funcionamento do controle *droop* convencional independentemente da natureza da impedância de acoplamento. Tais verificações serão apresentadas posteriormente, juntamente com as referentes às demais possibilidades discutidas nesta seção. Antes, porém, é interessante desenvolver mais um argumento teórico que dá suporte às afirmações feitas. A exemplo do que já se desenvolveu em textos anteriores, pode-se interpretar a Equação (1) geometricamente para analisar casos em que a diferença angular não é próxima de zero, inclusive a fim de estabelecer um intervalo de estabilidade para esse parâmetro (AZEVEDO, 2011; GUERRERO et al., 2007).

A dita equação, quando simplificada para o caso de impedância com natureza indutiva, torna-se

$$\mathbf{S}_i = \frac{V_i^2 - V_i V_{ic} e^{j\delta_i}}{-jX_i} = \frac{jV_i^2}{X_i} + \frac{V_i V_{ic}}{X_i} e^{j(\delta_i - \pi/2)}. \quad (8)$$

Essa equação representa uma circunferência centrada no ponto $(0, \frac{V_i^2}{X_i})$ e de raio $\frac{V_i V_{ic}}{X_i}$, conforme mostra a Figura 3a, na qual também se destacam os pontos correspondentes a cada valor de δ . Uma variação angular corresponde a uma trajetória sobre a circunferência e uma variação de V_i corresponde a uma variação linear em seu raio e quadrática na posição de seu centro, conforme mostra a Figura 3b. Considerando a utilização de um controle *droop* convencional, tal como na Figura 1, a região de estabilidade angular corresponderá ao intervalo que apresente $\frac{\partial P}{\partial \omega} > 0$, de forma que pequenas perturbações em ω serão equilibradas pelo *droop* $P - \omega$, que tem inclinação negativa, à semelhança do que foi argumentado para o caso em que $\delta \approx 0$. A Figura 3a mostra que esse intervalo é $-90^\circ < \delta < 90^\circ$, resultado condizente com o apresentado por Azevedo (2011).

A análise do efeito da variação de ω , e, por conseguinte, da variação de δ , forneceu uma restrição sobre o ângulo para operação estável. Similarmente, a análise do efeito da variação da tensão gerada fornecerá uma restrição para essa grandeza. Como o *droop* $Q - V$ convencional também tem inclinação negativa, a estabilidade de tensão ocorrerá para os intervalos de tensão em que $\frac{\partial Q}{\partial V} > 0$. A Figura 3b mostra uma situação na qual, para um mesmo ângulo δ , o aumento da tensão entregue pelo conversor provoca um aumento da potência reativa, o que realmente acontece para uma operação normal da microrrede, quando as tensões V_i e V_{ic} são próximas. Mesmo assim, é interessante verificar, analisando a Equação (5), qual seria o limite teórico para essa estabilidade de tensão. Derivando em relação a V_i e admitindo δ constante, obtém-se que

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \frac{2V_i - V_{ic} \cos \delta_i}{X_i}, \quad \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} > 0 \Rightarrow 2V_i - V_{ic} \cos \delta_i > 0.$$

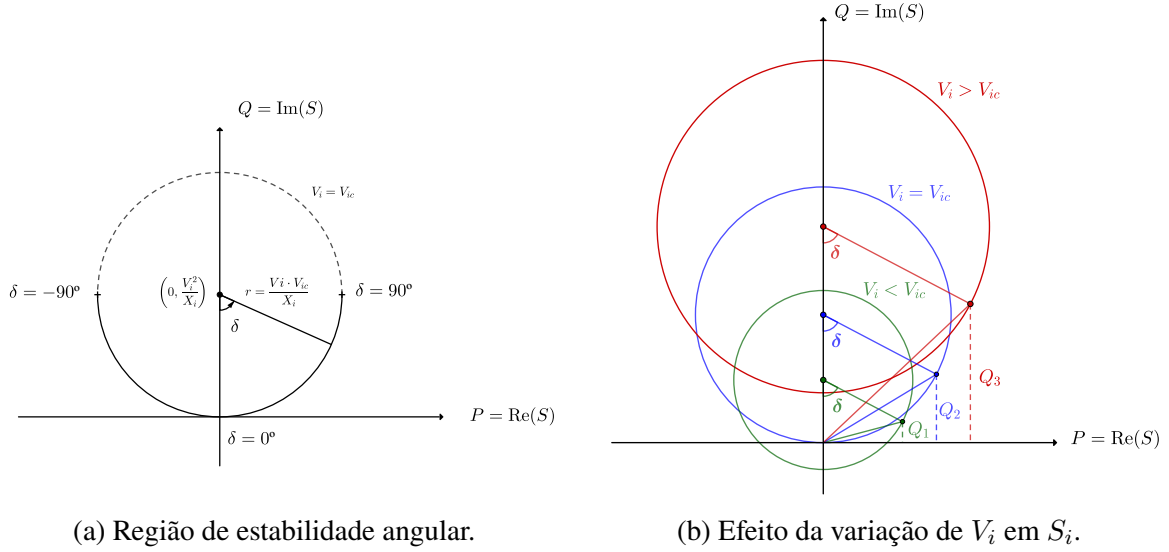
Para atender à desigualdade, haja vista que $\cos \delta_i \leq 1$, basta que

$$\boxed{V_i > \frac{V_{ic}}{2}}. \quad (9)$$

Sendo assim, dado um par de retas *droop*, o intervalo de estabilidade angular pode ser obtido analisando, para a variável de potência que está relacionada com a frequência, qual arco de circunferência corresponde a uma trajetória que proporcione derivada em relação a ω de sinal contrário ao coeficiente angular do *droop* em frequência. Do mesmo modo, o intervalo de estabilidade de tensão pode ser obtido analisando para quais valores de V a derivada da variável de potência relacionada a essa grandeza tem sinal contrário ao da reta *droop* em tensão.

Embora a estabilidade tenha sido verificada para um caso em que a impedância tem natureza indutiva, é possível também realizar essa verificação para uma impedância de linha de natureza genérica, utilizando argumentos geométricos semelhantes. Para isso, basta interpretar

Figura 3 – Loci da potência complexa caso impedância indutiva.



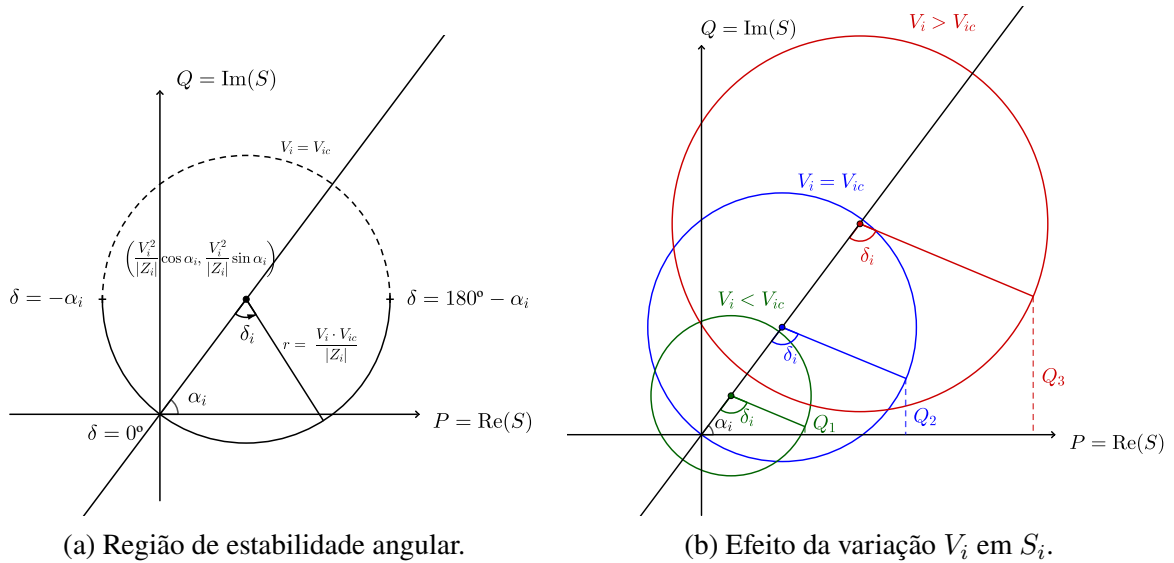
Fonte: O autor (2024).

diretamente a Equação (1), reescrita explicitando o módulo e o argumento da impedância:

$$\mathbf{S}_i = \frac{V_i^2}{|\mathbf{Z}_i|} (\cos \alpha_i + j \sin \alpha_i) + \frac{V_i V_{ic} e^{j(\delta_i + \alpha_i - \pi)}}{|\mathbf{Z}_i|}, \quad (10)$$

com $\mathbf{Z}_i = |\mathbf{Z}_i| e^{j\alpha_i}$ e $-90^\circ < \alpha_i < 90^\circ$, para garantir $R_i > 0$. A equação corresponde a uma circunferência centrada no ponto $\left(\frac{V_i^2}{|\mathbf{Z}_i|} \cos \alpha_i, \frac{V_i^2}{|\mathbf{Z}_i|} \sin \alpha_i \right)$ e com raio $\frac{V_i V_{ic}}{|\mathbf{Z}_i|}$. A Figura 4 é um análogo da Figura 3 para o caso genérico. Tomando $\alpha_i = 90^\circ$ no caso genérico obtém-se o resultado do caso para impedância de linha indutiva.

Figura 4 – Loci da potência complexa caso genérico.



Fonte: O autor (2024).

Com esse desenvolvimento, fica claro que o *droop* convencional, apresentado na Figura 1 não necessariamente precisa ser aplicado quando a impedância de acoplamento tem natureza indutiva, o que se verifica posteriormente em simulações exemplo. Pode-se, inclusive, fazer $\alpha_i = 0$ na Figura 4 para um caso em que a impedância tem natureza resistiva, observando que a região de estabilidade angular continuará sendo o semicírculo inferior da circunferência, enquanto for utilizado um *droop* $P - \omega$ com inclinação negativa. Por outro lado, para esse caso resistivo, as Equações (2) e (3) podem ser simplificadas considerando $X_i = 0$ e $Z_i = R_i$ e, além disso, considerando $\delta_i \approx 0$, para obter as seguintes equações:

$$\Rightarrow \begin{cases} P_i = \frac{V_i (V_i - V_{ic} \cos \delta_i)}{R_i}, \\ Q_i = -\frac{V_i V_{ic} \sin \delta_i}{R_i}. \end{cases} \quad (11)$$

$$\xrightarrow[\cos \delta \approx 1]{\sin \delta \approx \delta} \begin{cases} P_i = \frac{V_i (V_i - V_{ic})}{R_i}, \\ Q_i = -\frac{V_i V_{ic} \delta_i}{R_i}. \end{cases} \quad (13)$$

$$(14)$$

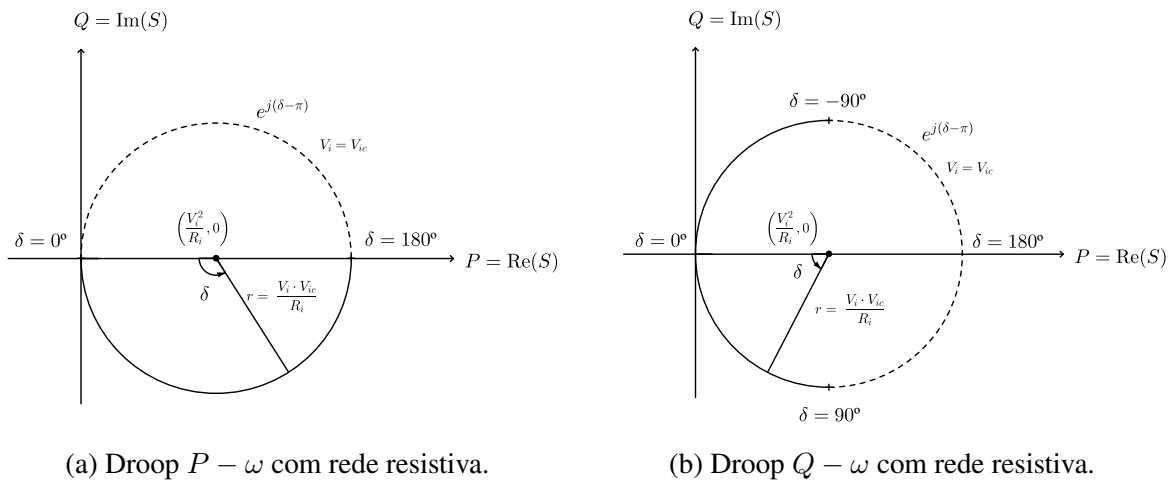
Embora essas equações sejam condizentes com o comportamento mostrado na Figura 4a, se considerado $\alpha_i = 0$ e $\delta_i \approx 0$, com a variação angular tendo maior efeito na potência reativa e a variação do módulo da tensão na potência ativa, pode-se também, por um argumento análogo ao já realizado para as Equações (6) e (7), sugerir que seria mais adequado utilizar relações *droop* $Q - \omega$ e $P - V$ ao invés do *droop* convencional até então utilizado, conforme proposto por Guerrero et al. (2007). Essa argumentação que atrela a escolha da estratégia de controle *droop* utilizada à natureza da impedância das linhas analisando equações de fluxo de potência, embora ainda bastante utilizada, não leva em consideração as diferenças inerentes que existem entre o *droop* que envolve a frequência e o que envolve a tensão com relação aos impactos dessas especificidades no resultado de regime permanente do compartilhamento de potência do sistema.

Conforme será explorado na Seção 2.2, a grandeza relacionada à frequência é sempre bem compartilhada, dado que se realize uma escolha adequada das inclinações desse *droop*. Em contrapartida, a grandeza relacionada à tensão está sujeita a erros no compartilhamento, oriundos da assimetria entre as impedâncias da microrrede, o que deve, então, ser corrigido por meio de alguma modificação na estratégia de controle. Em geral, esse tem sido o ponto de partida para alguns artigos que propõem soluções ao problema do compartilhamento de potência, tais como He e Li (2012), Lee, Chu e Cheng (2013), Kosari e Hosseinian (2017), dentre outros. Levando em conta que é mais importante compartilhar bem a potência ativa, inclusive porque a potência reativa pode ser compensada por outros meios, o argumento pela utilização do *droop* $P - \omega$ independentemente da natureza das impedâncias da microrrede é favorecido, mas não

sem ressalvas. A utilização do *droop* convencional em uma rede predominantemente resistiva, realidade comum em redes de baixa tensão, é mais suscetível a instabilidades (De Brabandere et al., 2007 apud HE; LI, 2012). Esse fato pode ser entendido comparando a região de estabilidade obtida analisando a Figura 4a para $\alpha_i = 0$ com a região de estabilidade para um *droop* $Q - \omega$, conforme proposto por Guerrero et al. (2007). Para o primeiro caso, ilustrado na Figura 5a, somente valores de δ_i no intervalo $0^\circ < \delta_i < 180^\circ$ resultam em operação estável, o que pode ser um problema se considerado que essa diferença angular geralmente é pequena e pode oscilar em torno de 0. O ideal seria que a região de estabilidade fosse um intervalo também em torno de zero, comportando essas possíveis oscilações inerentes à dinâmica do sistema. Por exemplo um intervalo $-90^\circ < \delta_i < 90^\circ$, que ocorria para linhas puramente indutivas, seria ideal.

A fim de obter esse intervalo de operação estável, à luz do princípio já estabelecido de que a taxa de variação da potência com relação à frequência no intervalo de estabilidade deve ter sinal contrário ao da inclinação da reta *droop* e levando em consideração a Equação (14), a qual já estabelece uma relação decrescente entre Q e δ em torno de $\delta_i = 0$, basta escolher um *droop* $Q - \omega$ com inclinação positiva. Conforme mostrado na Figura 5b, a região de estabilidade corresponde justamente ao intervalo em que o aumento da frequência e, portanto, de δ_i implica em diminuição de Q , o que é equilibrado pelo *droop* com inclinação positiva. A relação $P - V$ deve permanecer com inclinação negativa.

Figura 5 – Região de estabilidade angular ($V_i = V_{ic}$).



Fonte: O autor (2024).

É importante comentar que a Figura 5a não é suficiente para explicar o comportamento da potência entregue por um conversor quando aplicado o *droop* convencional se a rede for puramente resistiva, uma vez que a região de estabilidade delimitada só comporta valores negativos de Q , o que não corresponde à realidade, conforme será exemplificado ainda nesta seção. É preciso ter em mente que esses argumentos geométricos utilizados até então têm um propósito mais intuitivo, apenas indicando, ou servindo como uma primeira interpretação teórica, de como será o comportamento do sistema a fim de escolher uma estratégia *droop* adequada. Uma

aproximação utilizada por essas análises, inclusive para definir a região de estabilidade, é a de que a tensão no ponto de acoplamento do conversor com a microrrede, V_{ic} , permanece constante em módulo e ângulo, o que não é verdade. O acoplamento elétrico existente entre os conversores promove uma interdependência entre as grandezas elétricas relacionadas a cada conversor, de modo que uma perturbação em um deles terá impacto sobre os demais e sobre os nós elétricos da rede que os interliga. Então, a Figura 5a não representa bem o comportamento de um conversor controlado com um *droop* $P - \omega$ para uma rede resistiva, muito provavelmente porque nesse caso a interação com os outros conversores deve ser levada em conta, a fim de delimitar uma região de estabilidade que de fato seja condizente com o que se observa em simulação: a possibilidade de operação estável com P e Q positivos (pelo menos para algum dos conversores) quando se utiliza o *droop* convencional para uma rede puramente resistiva.

Além das duas estratégias de controle *droop* citadas, existe ainda uma terceira que pode se valer da argumentação geométrica desenvolvida: um *droop* com "potências mistas", que relaciona potência ativa e reativa por meio da razão X/R da impedância de acoplamento, o que pode ser interpretado geometricamente como uma rotação de eixos (De Brabandere et al., 2007 apud AZEVEDO, 2011). Ao invés de considerar um caso específico $Z_i = jX_i$ ou $Z_i = R_i$ para simplificar a relação entre as potências e a tensão e frequência geradas, pode-se manipular as Equações (2) e (3) para expressar os termos entre colchetes em função de uma combinação de P e Q . Multiplicando a primeira equação por R_i , a segunda por X_i e somando, obtém-se que

$$R_i P_i + X_i Q_i = \underbrace{(R_i^2 + X_i^2)}_{|Z_i|^2} \left[\frac{V_i (V_i - V_{ic} \cos \delta_i)}{|Z_i|^2} \right].$$

Multiplicando a primeira equação por X_i , a segunda por R_i e subtraindo, obtém-se a outra relação:

$$X_i P_i - R_i Q_i = \underbrace{(R_i^2 + X_i^2)}_{|Z_i|^2} \left[\frac{V_i V_{ic} \sin \delta_i}{|Z_i|^2} \right].$$

Dividindo ambas as equações por $|Z_i|$, obtém-se equações análogas àquelas em que havia uma potência relacionada à variação de tensão e outra à de frequência, mas agora valendo para um caso genérico, livre de simplificações acerca da natureza da impedância de acoplamento.

$$\Rightarrow \begin{cases} P'_i \equiv \frac{X_i}{|Z_i|} P_i - \frac{R_i}{|Z_i|} Q_i = \frac{V_i V_{ic} \sin \delta_i}{|Z_i|}, & (15) \\ Q'_i \equiv \frac{R_i}{|Z_i|} P_i + \frac{X_i}{|Z_i|} Q_i = \frac{V_i (V_i - V_{ic} \cos \delta_i)}{|Z_i|}. & (16) \end{cases}$$

Definindo as potências P'_i e Q'_i , fica clara a analogia com as Equações (4) e (5) para o caso indutivo e (11) e (12) para o caso resistivo, sendo esses conjuntos de equações casos especiais do conjunto genérico obtido, o que se pode ver facilmente realizando as simplificações

$R_i = 0$ ou $X_i = 0$. Para interpretar geometricamente as Equações (15) e (16), basta lembrar que $R_i = |\mathbf{Z}_i| \cos \alpha_i$ e $X_i = |\mathbf{Z}_i| \sin \alpha_i$, tornando visível a rotação de eixos na definição de P'_i e Q'_i .

$$\begin{cases} P'_i = P_i \sin \alpha_i - Q_i \cos \alpha_i \\ Q'_i = P_i \cos \alpha_i + Q_i \sin \alpha_i \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} P'_i \\ Q'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha_i & -\cos \alpha_i \\ \cos \alpha_i & \sin \alpha_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix}. \quad (17)$$

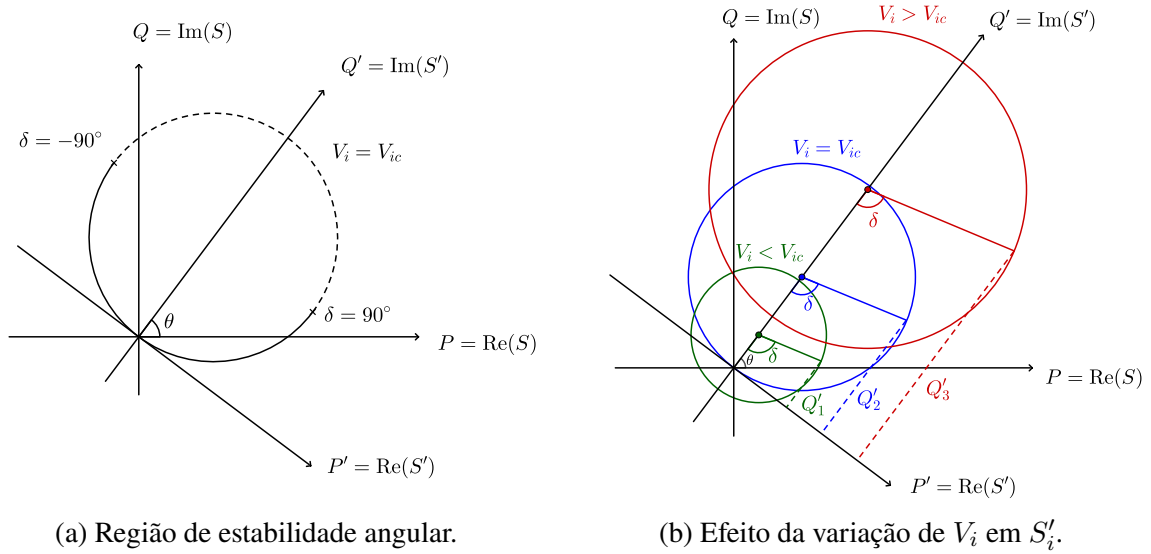
Expressando em termos de potência complexa, tem-se que

$$\begin{aligned} P'_i + jQ'_i &= P_i (\sin \alpha_i + j \cos \alpha_i) + Q_i (j \sin \alpha_i - \cos \alpha_i) = (P_i + jQ_i) e^{j(\pi/2 - \alpha_i)} \\ &\Rightarrow \mathbf{S}'_i = \mathbf{S}_i e^{j(\pi/2 - \alpha_i)}. \end{aligned} \quad (18)$$

Essa equação indica que os eixos do sistema de coordenadas P'_i e Q'_i estão rotacionados de $\pi/2 - \alpha_i$ dos eixos originais no sentido horário. É interessante notar que ao multiplicar a Equação (10) por $e^{j(\pi/2 - \alpha_i)}$ e aplicar a Equação (18), obtém-se justamente a Equação (8), porém referente ao novo sistema de coordenadas. A Figura 6 representa geometricamente a equação da potência complexa nesse novo sistema. Além da rotação de eixos, essa figura é basicamente a mesma Figura 4, a não ser pela mudança no intervalo de estabilidade, que nesse caso volta a ser $-90 < \delta_i < 90$, intervalo em que $\frac{\partial P'}{\partial \omega} > 0$. Essas características correspondem a um comportamento bastante semelhante ao do sistema com impedâncias de acoplamento indutivas e *droop* convencional, se interpretadas a partir dos novos eixos de coordenadas. Dessa forma, basta utilizar as mesmas relações $P - \omega$ e $Q - V$, porém aplicadas a P' e Q' . Essa alternativa se promove como um meio termo entre as duas anteriormente citadas, atendendo a uma situação genérica em que as impedâncias da rede não podem ser consideradas nem como puramente indutivas nem como puramente resistivas, ao custo de uma informação a mais: a razão X/R das impedâncias das linhas. É preciso levar em consideração que a obtenção dessa razão pode não ser trivial em casos práticos, o que constitui uma desvantagem dessa abordagem.

Conforme já argumentado, o desenvolvimento baseado na análise de fluxo de potência pode ser usado para justificar tanto a abordagem *droop* convencional, que é condizente com a representação de uma máquina síncrona, quanto abordagens modificadas, das quais os últimos dois casos discutidos são exemplos. O primeiro, do *droop* adequado a linhas resistivas, promove uma inversão dos pares de variáveis, relacionando a potência reativa com a frequência e a ativa com a tensão, de acordo com a relação obtida do fluxo de potência para esse caso específico. O segundo exemplo promove uma modificação ainda maior, utilizando nas relações *droop* um misto de potências relacionadas pela característica X/R das impedâncias de acoplamento. Essas duas abordagens não se relacionam de nenhuma maneira à representação de uma máquina síncrona, o que de fato não é uma necessidade, dada a liberdade que existe na escolha da estratégia *droop* utilizada, contanto que se obtenha operação estável. A discussão apresentada busca deixar claro que os diversos argumentos encontrados na literatura devem ser tratados como independentes entre si e não necessários, no sentido de que não demonstram a necessidade de se utilizar esta ou aquela estratégia, mesmo considerando as condições específicas sob as quais são propostos.

Figura 6 – Loci da potência complexa (potência mista).



Fonte: O autor (2024).

Tanto é que os argumentos apresentados podem ser categorizados em três grupos independentes, cada um com o seu viés teórico, conforme a seguir:

- Argumentos que buscam a representação de uma máquina síncrona, de maneira mais ou menos detalhada: *droop* convencional e demais estratégias de máquina síncrona virtual;
- Argumentos que priorizam a dinâmica e a estabilidade da microrrede, desenvolvidos a partir de uma análise de fluxo de potência para entender o acoplamento entre as variáveis de potência e tensão e para delimitar intervalos de estabilidade: *droop* $Q - \omega$ e *droop* potência mista; e
- Argumentos que priorizam o resultado do compartilhamento de potência em regime permanente: nesta categoria se enquadram todas as propostas que utilizam o *droop* $P - \omega$, independentemente da natureza da linha, partindo do princípio de que a variável relacionada com a frequência será sempre bem compartilhada, dado que os coeficientes de inclinação sejam escolhidos adequadamente. Com esse tipo de abordagem, resta corrigir o compartilhamento da potência reativa por meio de alguma modificação ou estratégia adicional de controle.

Sendo o foco deste trabalho o problema de compartilhamento de potência, o viés adotado doravante será o do último item, para a discussão do qual se reserva a próxima seção. Antes, porém, é importante apresentar simulações exemplo, inclusive como forma de justificar a abordagem realizada e introduzir o problema foco do trabalho.

Verificações sobre o funcionamento do controle *droop* independentemente da natureza das linhas

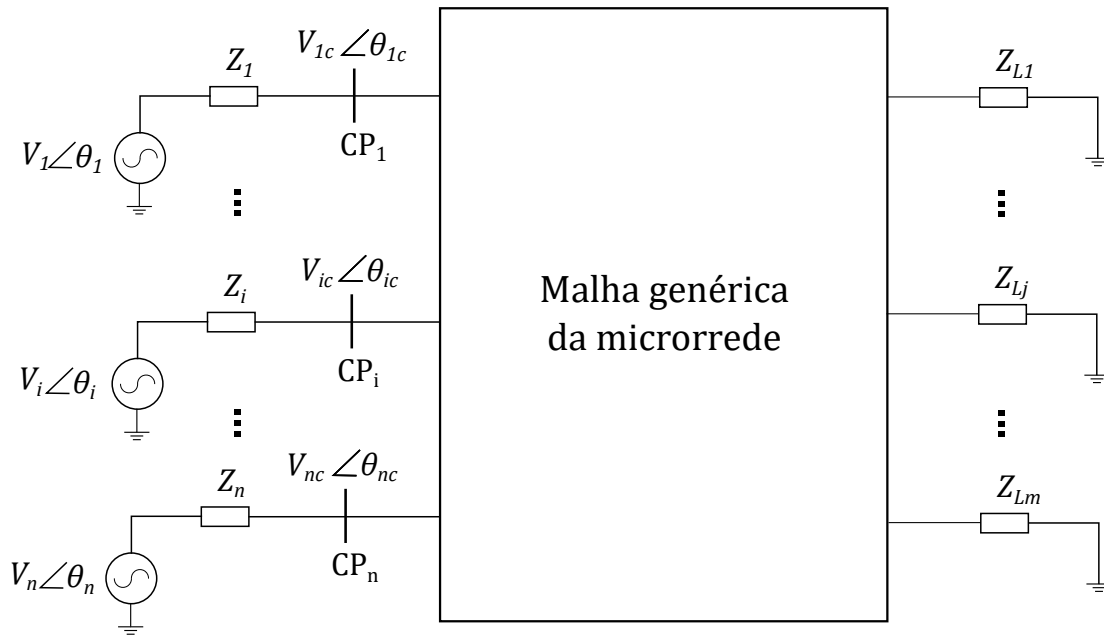
Em geral, o circuito de uma microrrede pode consistir de vários conversores ligados a partir de seus pontos de acoplamento a uma malha elétrica genérica na qual também estão conectadas cargas, lineares ou não lineares, distribuídas ao longo do circuito. É preciso ter em mente que, dada a amplitude do conceito de microrrede, existe uma grande variação de tamanho e complexidade especialmente em se tratando das microrredes de maior porte. A posição das cargas dependerá obviamente da sua localização física, fator atrelado a aspectos construtivos e específicos de projeto do local em que a microrrede é implementada, de modo que a topologia do circuito geralmente não pode ser manipulada para conveniência ou facilitação do aspecto elétrico. Do mesmo modo, os recursos de geração distribuída e, portanto, os conversores, também estarão localizados nos espaços mais adequados à sua instalação, não necessariamente convenientemente dispostos para formar um circuito de simples análise. Essa realidade traz desafios à implementação e operação das microrredes, por exemplo, por conta da distância considerável que pode existir entre os conversores e da assimetria entre as impedâncias de acoplamento.

O primeiro ponto, da distância entre os conversores, é um dos problemas que dificulta a aplicação de métodos com comunicação, uma vez que, além das conexões elétricas, essa estratégia exige conexão por meio de cabos de comunicação, aumentando o custo e diminuindo a confiabilidade do sistema, cujo desempenho passa a depender do bom funcionamento desse aparato. Além disso, há um inerente atraso na transmissão dos sinais de comunicação, especialmente a longas distâncias, o que torna mais complexo o sistema de controle da microrrede e dificulta a adição de novos conversores a sistemas já em funcionamento (HAN et al., 2017; ROSINI et al., 2021). Essas questões, em grande parte, motivam os desenvolvimentos acerca de sistemas sem comunicação, cuja grande dificuldade passa a ser o problema do compartilhamento de potência, ocasionado pelo segundo desafio citado, da assimetria entre as impedâncias da rede, conforme já introduzido. Para evidenciar esse problema, na forma de simulações exemplo, aproveitando também para discutir a influência da estratégia *droop* utilizada, é interessante, para efeito didático, considerar simplificações tanto na topologia da microrrede quanto no modelo do conversor.

A utilização de uma topologia de microrrede genérica, tal como ilustrada na Figura 7, adicionaria uma complexidade inicial desnecessária aos propósitos pretendidos. Mesmo assim, é imediato que poderia-se tomar o equivalente do circuito composto pela rede e pelas cargas, utilizando o equivalente de Thèvenin de n portas (WARD, 1949 apud LIMA, 2022), o que resultaria numa malha de cargas equivalentes ligadas aos pontos de acoplamento, e realizar quaisquer análises por meio do circuito equivalente. Entretanto, a fim de facilitar as análises deste capítulo teórico, com foco nas estratégias *droop* discutidas e em seus resultados de regime permanente, é suficiente utilizar uma simplificação bastante difundida nos artigos sobre esse tema: considerar um único ponto de acoplamento, comum para todos os conversores, e que toda

a carga da microrrede está concentrada e ligada também a esse ponto (ROSINI et al., 2021). Essa topologia simplificada é mostrada na Figura 8, na qual também se considera a ausência de cargas locais próximas aos conversores. Além da simplificação topológica, neste trabalho todas as cargas são modeladas como impedâncias constantes, não sendo considerada a possibilidade de cargas não lineares, cuja presença no circuito estende o problema de compartilhamento de potência também para as harmônicas da frequência fundamental (AZEVEDO, 2011).

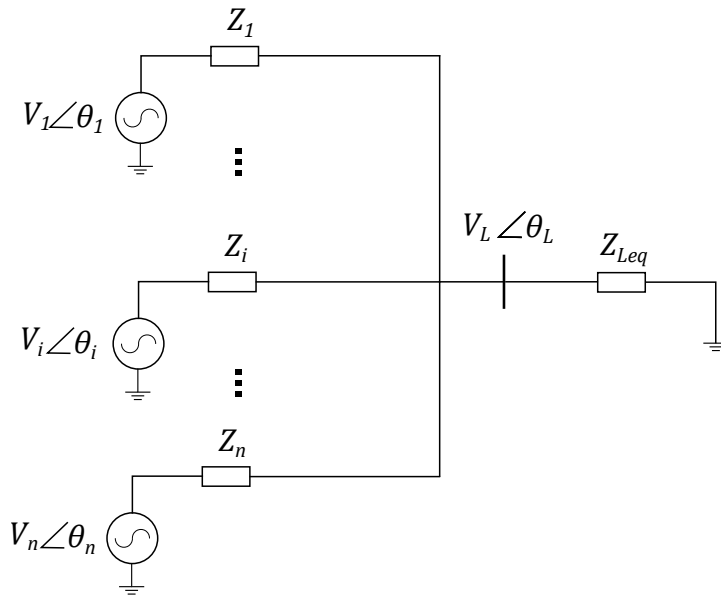
Figura 7 – Microrrede genérica.



Fonte: O autor (2024).

Neste e no próximo capítulo, o modelo dos conversores também será simplificado, adotando-se um modelo médio, de forma que se possa concentrar as atenções somente no controle *droop*. A depender dos objetivos e da abordagem utilizada para o projeto da microrrede, um conversor pode ser controlado de várias maneiras, aproveitando a flexibilidade proporcionada pela eletrônica de potência. Em geral, o controle por meio da modulação por largura de pulso (PWM) recebe como entrada uma referência para a tensão a ser produzida pelo chaveamento. Essa tensão é, instantaneamente, uma tensão chaveada, rica em harmônicos e cujo valor médio corresponde à tensão de referência, de forma que deve ser filtrada para que seja viável conectar o conversor à rede. O filtro inerentemente provocará também uma queda de tensão e uma mudança na corrente, caso haja elemento *shunt*, tal como nos filtros *LC*, modificando os valores obtidos na saída do conjunto. É para controlar esses valores de saída, manipulando a referência de tensão entregue para o PWM, que se utilizam esquemas de controle, com os quais se pode

Figura 8 – Microrrede simplificada.



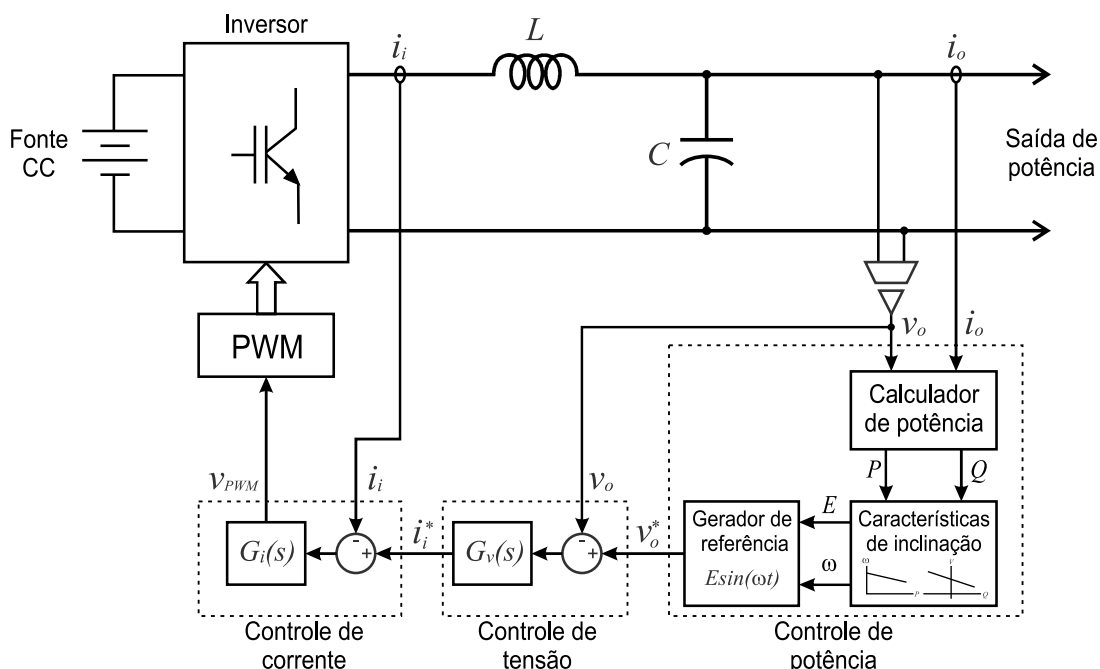
Fonte: O autor (2024).

controlar tanto a corrente, como a tensão de saída com base em valores de referência obtidos, por exemplo, de um sistema de controle central, no caso de microrredes com sistema de comunicação. Em contrapartida, a estratégia de controle por inclinação permite eliminar a necessidade de comunicação ao gerar a referência do controle de tensão localmente, por meio da medição da potência de saída do conversor e da utilização das retas *droop*, constituindo um sistema capaz de se auto regular tal como ilustra a Figura 9 (AZEVEDO, 2011).

A simplificação a ser realizada consiste em considerar as malhas mais internas, do controle de tensão e corrente com dinâmica muito mais rápida que a do controle por inclinação, o que implica que se pode tomar a produção da tensão de saída como instantânea, para um dado valor de referência v_o^* . O conjunto, conversor + filtro passa a ser representado por uma fonte de tensão que já fornece o valor médio da onda produzida de acordo com a referência oriunda do controle por inclinação tal como mostra a Figura 10. Uma vez tomadas essas simplificações, pode-se realizar as simulações exemplo utilizando o dispositivo virtual do programa *Typhoon HIL*, programa utilizado no restante deste trabalho, inclusive por conta de sua capacidade de simulação em tempo real, a ser utilizada quando da simulação com modelo completo do conversor. Para as simulações exemplo, considera-se uma microrrede com dois conversores idênticos ligados à carga e cujas impedâncias de linha alternam entre puramente resistiva, puramente indutiva e genérica, para cada estratégia *droop* analisada, mantendo o mesmo módulo da impedância original. A carga, por sua vez, é adicionada em duas etapas inicializando-se a simulação com metade da carga e adicionado a outra metade após 1 minuto. Os parâmetros de simulação encontram-se na Tabela 1.

A escolha dos coeficientes de inclinação foi realizada de maneira empírica, buscando não

Figura 9 – Esquema genérico de controle sem comunicação para um conversor.

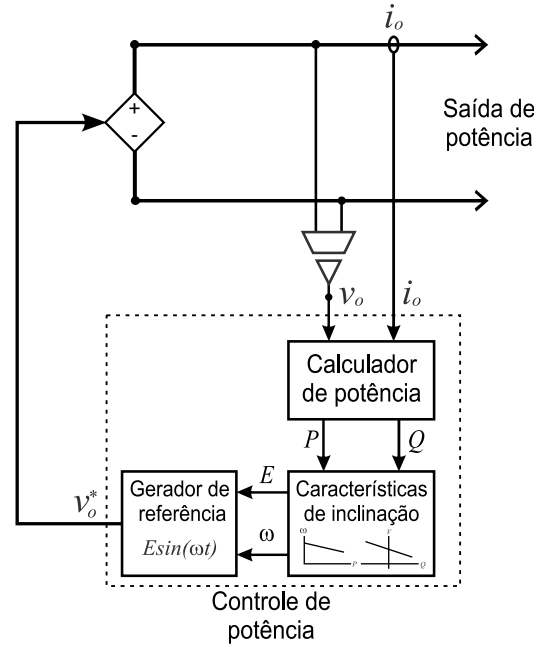


Fonte: (AZEVEDO, 2011).

só uma operação estável, mas também um adequado tempo de resposta transitória. Esses dois aspectos são fortemente influenciados pelo par de coeficientes escolhido (GUERRERO et al., 2004), de forma que é mais apropriado realizar uma abordagem matemática cuidadosa, por meio de uma análise de pequenos sinais, para verificar quais valores resultam em operação estável e, dentre os valores da faixa obtida, escolher aqueles que produzem uma resposta transitória adequada (POGAKU; PRODANOVIC; GREEN, 2007). Conforme já comentado, o propósito do controle por inclinação é adicionar à operação dos conversores uma dinâmica artificial, não inerente à sua operação, tal que a sua resposta a uma alteração na rede não seja tão rápida e suscetível à instabilidade, ou seja, de forma que apresente alguma inércia. Outro aspecto de projeto que também influencia na dinâmica do sistema e, como já dito, na representação da inércia virtual, é o do filtro passa baixas utilizado para medição das potências, cuja ordem e frequência de corte foram ajustadas empiricamente de modo que as respostas de potência obtidas fossem livres de oscilações. Utilizou-se um filtro de segunda ordem criticamente amortecido com frequência de corte de 1Hz. Conforme mostram as Figuras 11 a 13, optou-se por tempos transitórios da ordem de minutos, mantendo para todos os casos, exceto um, os mesmos coeficientes de inclinação, o que resultou em variações no tempo de resposta à mudança de carga de acordo com o tipo de linha.

Uma análise rápida das figuras obtidas cumpre o propósito estabelecido para as simulações exemplo, uma vez que fica claro que, para o *droop* convencional, a potência ativa é sempre bem compartilhada, independentemente do tipo de linha e para o *droop* $Q - \omega$ a situação se inverte, sendo a potência reativa bem compartilhada independentemente do tipo de linha. É interessante

Figura 10 – Controle de um conversor representado pelo modelo médio.



Fonte: O autor (2024) adaptado de (AZEVEDO, 2011).

observar que, ao contrário do que sugere a Figura 5a, é possível simular a situação com *droop* convencional, mesmo na rede puramente resistiva, conforme as Figuras 11e e 11f, o que resultou em circulação de corrente entre os conversores, visto que um deles atua recebendo potência reativa e tem ângulo de operação positivo, enquanto o outro tem ângulo negativo e entrega potência reativa, encontrando-se em uma região de operação em que se previa instabilidade.

Isso indica que, de fato, para explicar o comportamento da microrrede nessa situação extrema, de uma rede puramente resistiva com os conversores controlados a partir do *droop* $P - \omega$, não é suficiente analisar cada conversor separadamente a partir da argumentação anteriormente realizada, sendo necessários argumentos matemáticos mais detalhados para identificar a região de estabilidade. Mesmo assim, é possível perceber em simulação que esse caso específico é mais propenso a instabilidades, conforme documentado na literatura (De Brabandere et al., 2007 apud HE; LI, 2012). O sistema é muito mais sensível a variações nos parâmetros de inclinação e, embora não se tenha demonstrado matematicamente, é possível perceber um intervalo mais restrito de parâmetros m e n que resultam em operação estável da microrrede. Complementando os resultados obtidos pelas figuras, as Tabelas 2 e 3 apresentam os valores dos ângulos e das tensões de operação, respectivamente. Para as demais possibilidades simuladas, os valores angulares obtidos são condizentes com as análises teóricas realizadas, levando em consideração também os valores de tensão apresentados na Tabela 3. Observa-se que os valores da Tabela 2 são próximos de 0, conforme esperado.

Especificamente no caso do *droop* de potência mista, foi realizada somente a simulação para a impedância genérica, uma vez que os casos puramente indutivo e resistivo recairiam

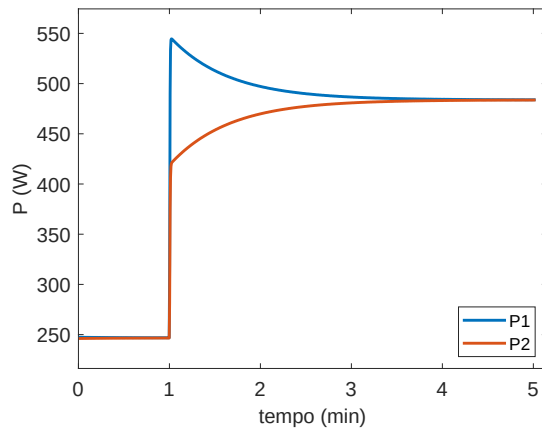
nas situações do *droop* convencional e $Q - \omega$, respectivamente, conforme já discutido. Em compensação, na Figura 13 são apresentados os gráficos de P , Q e também das potências mistas $RP + XQ$ e $XP - RQ$. Nesse caso, diferentemente dos anteriores, nem a potência ativa nem a reativa são bem compartilhadas, mas sim a potência mista $P' = XP - RQ$, controlada por meio do *droop* de frequência. Isso não significa, entretanto, que a abordagem do *droop* misto seja inadequada ou que não se possa resolver o compartilhamento de potência a partir dela. A mesma ponderação pode ser feita com relação ao *droop* $Q - \omega$. É importante salientar que as simulações exemplo foram realizadas implementando somente a estratégia *droop*, sem levar em conta artifícios adicionais que podem ser necessários à resolução do problema. Por exemplo, tanto em Guerrero et al. (2007) como em De Brabandere et al. (2007) as estratégias *droop* propostas, respectivamente o *droop* $Q - \omega$ e o *droop* misto, foram implementadas juntamente com uma técnica de impedância virtual, que proporciona inclusive compartilhamento de potência harmônica, assunto que ultrapassa o escopo deste trabalho.

Apesar da simplicidade das simulações realizadas, fica claro que, independentemente do tipo de linha, a variável de potência que é compartilhada no *droop* de frequência fica sempre bem compartilhada, enquanto a outra carece de mais algum artifício para atingir compartilhamento adequado, conforme já se havia sugerido. Essa conclusão é corroborada pelo que se encontra nos trabalhos de Azevedo et al. (2019) e Giraldo et al. (2023), que apresentam um comparativo de técnicas de controle sem comunicação. No último, inclusive, figuram entre os métodos comparados três técnicas de máquina síncrona virtual, uma das quais apresenta resultados bastante semelhantes aos obtidos com o *droop* convencional, corroborando a argumentação realizada no início do capítulo sobre a equivalência desses dois métodos.

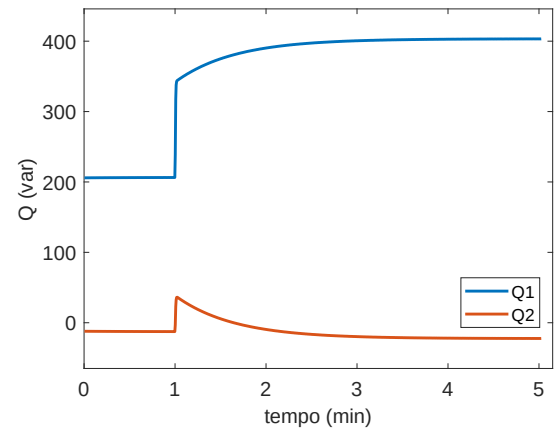
Tabela 1 – Parâmetros do circuito para as simulações exemplo.

Tensão nominal (rms)	220 V
Frequência nominal	377 rad/s
Potência ativa nominal da carga	1kW
Potência reativa nominal da carga	400 var
Impedância de acoplamento (conversor 1)	$\mathbf{Z}_1 = 1,5 + j0,9 \text{ ohm}$; $ \mathbf{Z}_1 = 1,7493 \text{ ohm}$
Impedância de acoplamento (conversor 2)	$\mathbf{Z}_2 = 3,7 + j1,4 \text{ ohm}$; $ \mathbf{Z}_2 = 3,956 \text{ ohm}$
Coeficiente m	2×10^{-6}
Coeficiente n	0,01
P_0	500 W
Q_0	0 var

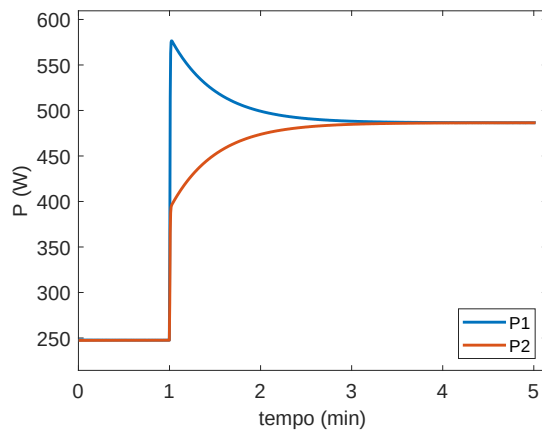
Figura 11 – Resposta de P e Q à adição de carga para o *droop* convencional.



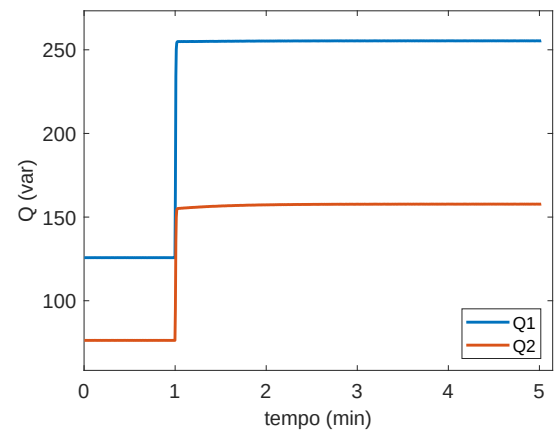
(a) P - Impedância genérica.



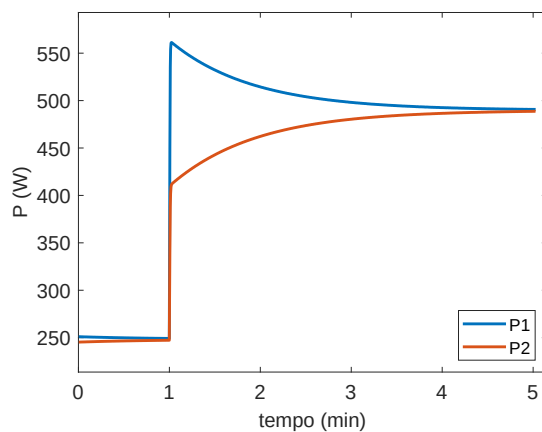
(b) Q - Impedância genérica.



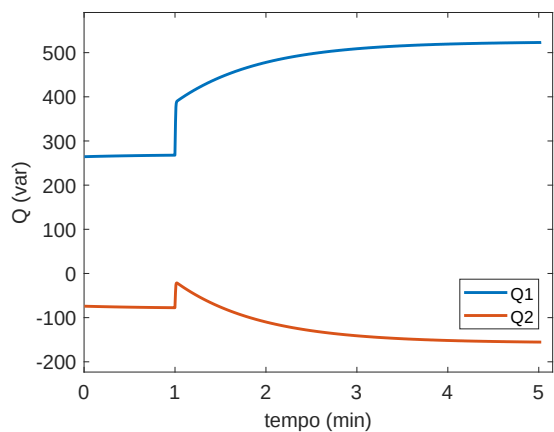
(c) P - Impedância indutiva.



(d) Q - Impedância indutiva.



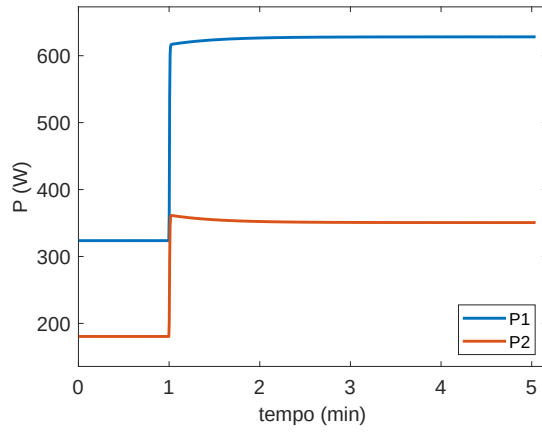
(e) P - Impedância resistiva.



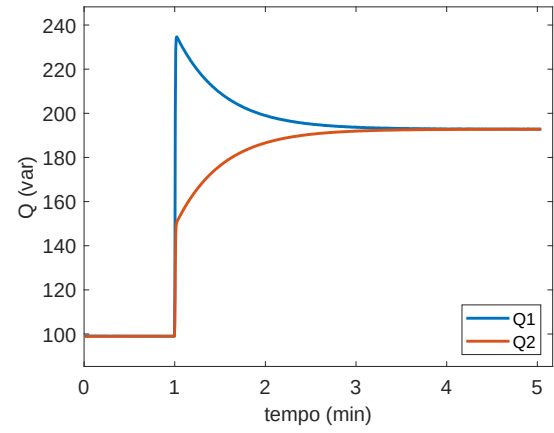
(f) Q - Impedância resistiva.

Fonte: O autor (2024).

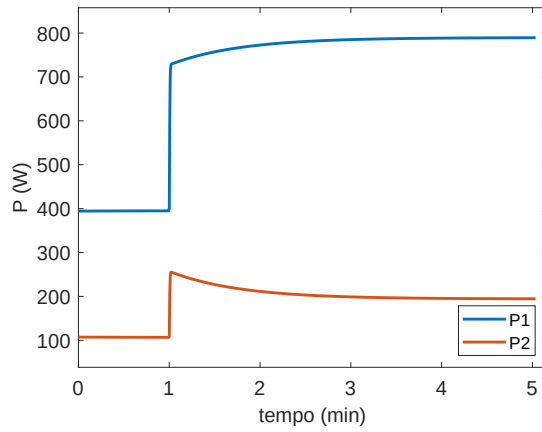
Figura 12 – Resposta de P e Q à adição de carga para o *droop* $Q - \omega$.



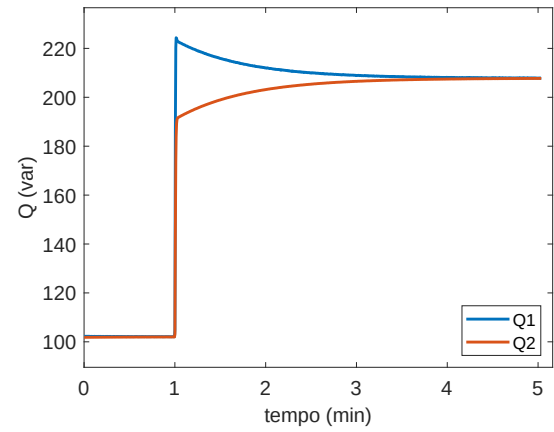
(a) P - Impedância genérica.



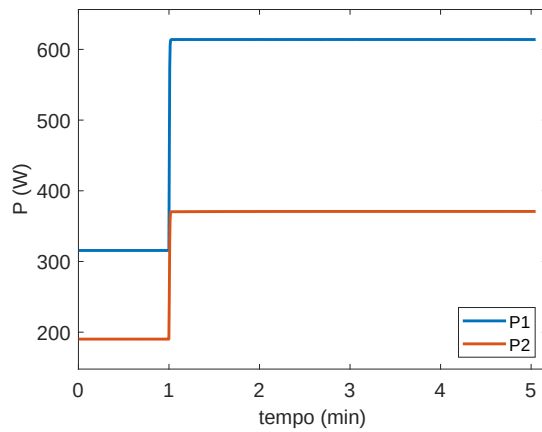
(b) Q - Impedância genérica.



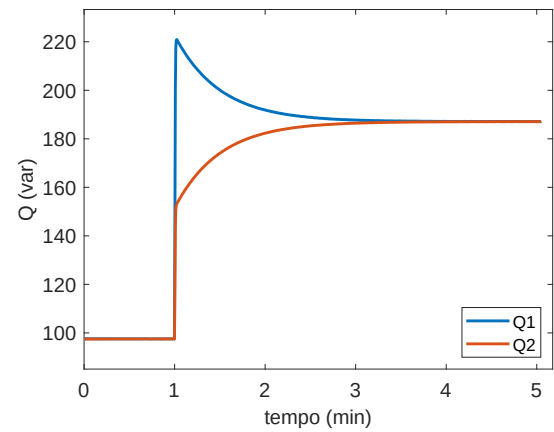
(c) P - Impedância indutiva
($m = 5 \times 10^{-6}$, $n = 5 \times 10^{-3}$).



(d) Q - Impedância indutiva
($m = 5 \times 10^{-6}$, $n = 5 \times 10^{-3}$).



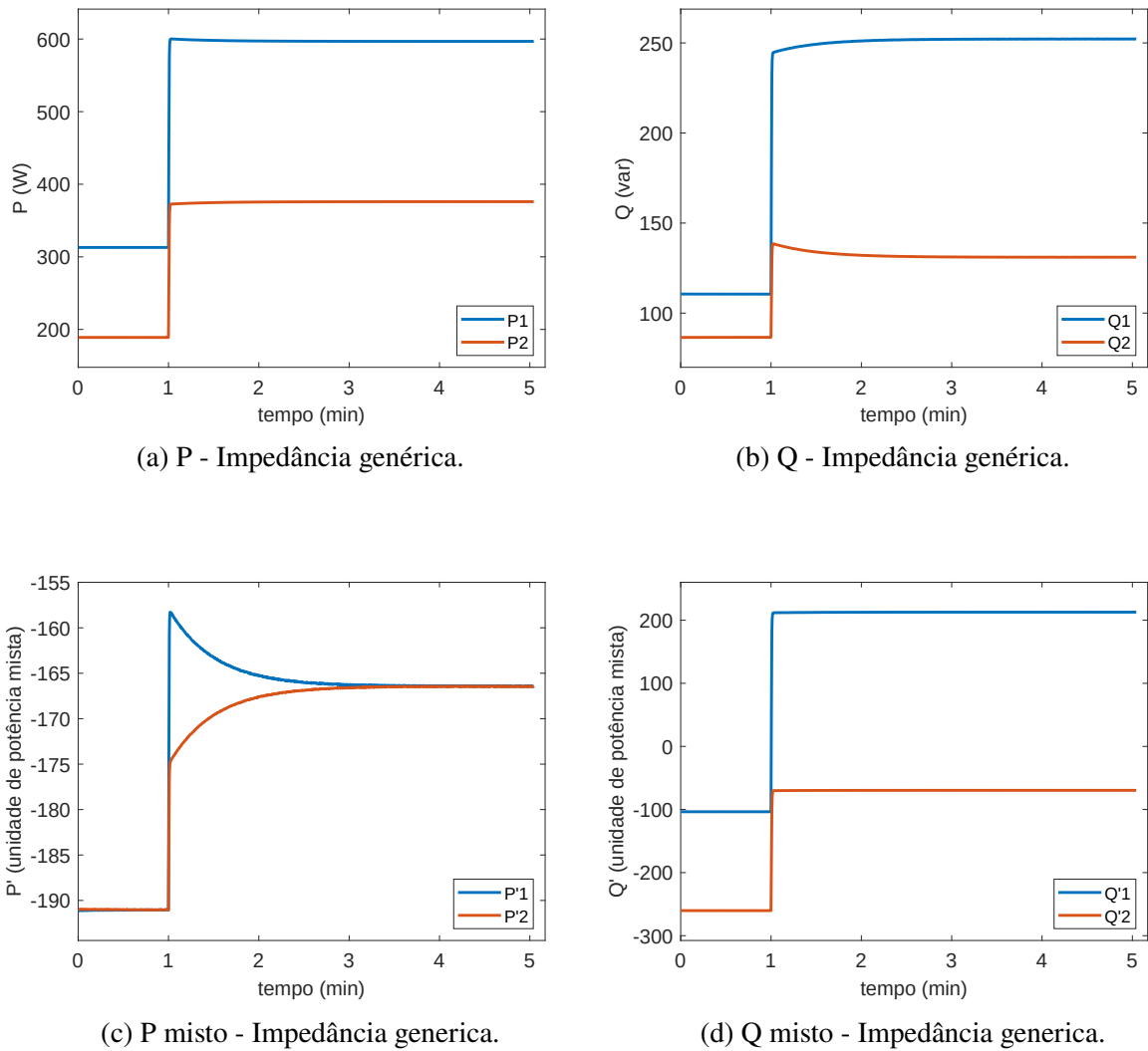
(e) P - Impedância resistiva.



(f) Q - Impedância resistiva.

Fonte: O autor (2024).

Figura 13 – Respostas de potência à adição de carga para o *droop* misto.



Fonte: O autor (2024).

Tabela 2 – Aberturas angulares entre a tensão de cada conversor e a tensão da carga para as simulações com *droop* convencional.

Simulações com <i>droop</i> convencional		
Natureza da linha	δ_1	δ_2
Genérica	$-0,24^\circ$	$0,93^\circ$
Puramente indutiva	$0,95^\circ$	$2,27^\circ$
Puramente resistiva	$-1,11^\circ$	$0,77^\circ$
Simulações com <i>droop</i> $Q - \omega$		
Natureza da linha	δ_1	δ_2
Genérica	$0,33^\circ$	$-0,30^\circ$
Puramente indutiva	$1,58^\circ$	$0,85^\circ$
Puramente resistiva	$-0,36^\circ$	$-0,88^\circ$
Simulação com o <i>droop</i> misto		
Natureza da linha	δ_1	δ_2
Genérica	$0,19^\circ$	$0,04^\circ$

Tabela 3 – Tensões de regime nas saídas dos conversores e no ponto de acoplamento comum (valores rms).

Simulações com <i>droop</i> convencional			
Natureza da linha	V_1	V_2	V_L
Genérica	217,80V	220,82V	212,04V
Puramente indutiva	218,85V	219,54V	216,10V
Puramente resistiva	216,95V	221,76V	212,23V
Simulações com <i>droop</i> $Q - \omega$			
Natureza da linha	V_1	V_2	V_L
Genérica	219,75V	221,72V	213,87V
Puramente indutiva	219,63V	221,74V	217,31V
Puramente resistiva	219,85V	221,57V	214,15V
Simulação com o <i>droop</i> misto			
Natureza da linha	V_1	V_2	V_L
Genérica	219,14V	221,15V	213,24V

2.2 O PROBLEMA DO COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA

O ponto de partida para explicar teoricamente o problema de compartilhamento de potência exemplificado pelas simulações da seção anterior é entender as diferenças inerentes que existem entre o comportamento da frequência e do módulo da tensão de cada conversor quando da operação de uma microrrede com várias unidades geradoras. Semelhantemente ao que ocorre para uma rede à qual estão ligadas várias máquinas síncronas, se o sistema atinge a estabilidade, com suas variáveis de potência fornecida e tensão gerada atingindo um determinado ponto de operação, as frequências das tensões geradas serão todas iguais (TULADHAR et al., 2000). Para entender esse fato, basta ter em mente que o ponto de operação consiste nos valores de tensão gerada (módulo e ângulo) e nas potências ativa e reativa geradas. Se a operação é estável e os valores angulares das tensões de cada conversor estão fixos em relação a uma dada referência de frequência, então cada uma das tensões geradas têm a mesma frequência da referência, do contrário ocorreriam variações nas defasagens entre as ondas de tensão. Em contrapartida, os módulos das tensões geradas por cada conversor não necessariamente serão iguais, o que provoca uma grande diferença de comportamento entre o *droop* realizado com a variável de frequência e o que utiliza a tensão, conforme evidenciado por suas próprias equações.

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 - m (P - P_0) , \\ V = V_0 - n (Q - Q_0) . \end{cases} \quad (19)$$

$$(20)$$

Assumindo uma situação em que os conversores da microrrede são todos idênticos, com mesma potência nominal e configurados com os mesmos parâmetros de controle, a igualdade das frequências de operação garante, pela Equação (19), que as potências ativas fornecidas serão todas iguais; porém, de acordo com a Equação (20), nada se pode afirmar sobre a igualdade das potências reativas, uma vez que as tensões podem não ser iguais, e, muito provavelmente, não serão. Um caso específico em que a igualdade ocorreria seria se houvesse uma simetria perfeita entre as impedâncias de acoplamento de cada conversor à microrrede, o que é uma consideração simplesmente fora da realidade. Os valores dessas impedâncias dependem da localização dos conversores e do projeto da microrrede, conforme já discutido, de forma que não podem ser escolhidos de maneira conveniente.

Note que as potências P_0 e Q_0 são correspondentes ao ponto de operação dos valores de ω_0 e V_0 , para os quais usualmente se escolhem a frequência e tensão nominais de operação, de forma que, a princípio, esses valores de potência estariam relacionados às potências nominais do conversor, denominadas P_R e Q_R . Em uma situação na qual os conversores têm potências nominais distintas, deve-se escolher os coeficientes de inclinação na proporção inversa à proporção entre as potências nominais dos conversores para garantir compartilhamento de potência ativa adequado, ou seja, que cada conversor forneça potência ativa proporcional à sua capacidade. Para demonstrar esse fato, partindo-se do mesmo princípio já utilizado, pode-se escrever, para um conversor qualquer de uma microrrede com um total de N conversores, que, em regime permanente,

$$m_i (P_i - P_{0i}) = \omega_{0i} - \omega_i = K \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (21)$$

As potências P_{0i} devem ser escolhidas de forma que sejam proporcionais às potências nominais de cada conversor, P_{Ri} , tal como a seguir:

$$\frac{P_{01}}{P_{R1}} = \frac{P_{02}}{P_{R2}} = \dots = \frac{P_{0i}}{P_{Ri}} = \dots = \frac{P_{0N}}{P_{RN}} = a. \quad (22)$$

Almeja-se que as potências geradas P_i sejam proporcionais às potências nominais P_R , ou seja, que a escolha dos m_i a ser feita garanta que

$$\frac{P_1}{P_{R1}} = \frac{P_2}{P_{R2}} = \dots = \frac{P_i}{P_{Ri}} = \dots = \frac{P_N}{P_{RN}} = b. \quad (23)$$

As duas equações anteriores implicam que $P_i - P_{0i}$ também deverá ser proporcional a P_R :

$$\Rightarrow P_i - P_{0i} = \underbrace{(b - a)}_c P_{Ri}.$$

Substituindo na Equação (21), obtém-se a relação de proporcionalidade inversa desejada:

$$\Rightarrow m_i c P_{Ri} = K \Rightarrow \boxed{m_i P_{Ri} = K'}. \quad (24)$$

Além disso, é imediato demonstrar, dadas as mesmas condições, que a validade da Equação

(24) é suficiente para que se obtenha a Equação (23). Sendo assim, dado que a Equação (21) seja válida em regime permanente e que os valores de P_0 tenham sido escolhidos proporcionais aos de P_R , conforme a Equação (22), é necessário e suficiente escolher valores de m_i inversamente proporcionais aos de P_R , conforme a Equação (24), para que as potências ativas geradas sejam bem compartilhadas (Equação 23). É importante notar que a mesma argumentação poderia ser utilizada independentemente do tipo de *droop* analisado. Qualquer que fosse a variável relacionada à frequência, seja potência ativa, seja reativa, seja potência mista, haveria bom compartilhamento dessa variável, dado que fosse feita escolha dos coeficientes de inclinação análoga à da Equação (24). Isso explica os comportamentos observados nas simulações da seção anterior para as variáveis relacionadas à frequência em cada caso.

Como não existe um argumento análogo ao da Equação (21) para o caso do *droop* de tensão, uma vez que não se pode garantir em regime que as tensões geradas sejam iguais, não é possível garantir bom compartilhamento de potência reativa apenas com uma escolha adequada dos coeficientes n . Mesmo assim, é usual adotar também para esses parâmetros uma escolha análoga à obtida na Equação (24) :

$$n_i Q_{Ri} = K'' . \quad (25)$$

Uma outra maneira interessante de entender por que a Equação (25) não é suficiente para garantir bom compartilhamento de potência reativa é por meio de uma interpretação gráfica, realizada à semelhança do que costuma desenvolver nos artigos que introduzem o problema de compartilhamento de potência utilizando essa abordagem (LI; KAO, 2009; HE; LI, 2012; KOSARI; HOSSEINIAN, 2017; SMADI; SHEHADEH, 2023). Para tanto, considera-se uma microrrede com a topologia simplificada apresentada na Figura 8 e com impedâncias de acoplamento puramente indutivas. A última consideração, embora bastante idealizada, permite simplificar a análise de fluxo de potência, conforme já discutido, por meio do uso das Equações (6) e (7). Considerando a carga concentrada em um único ponto, essas equações podem ser reescritas substituindo os termos relativos às tensões dos pontos de acoplamento, V_{ic} , simplesmente pela tensão da carga, tal como abaixo:

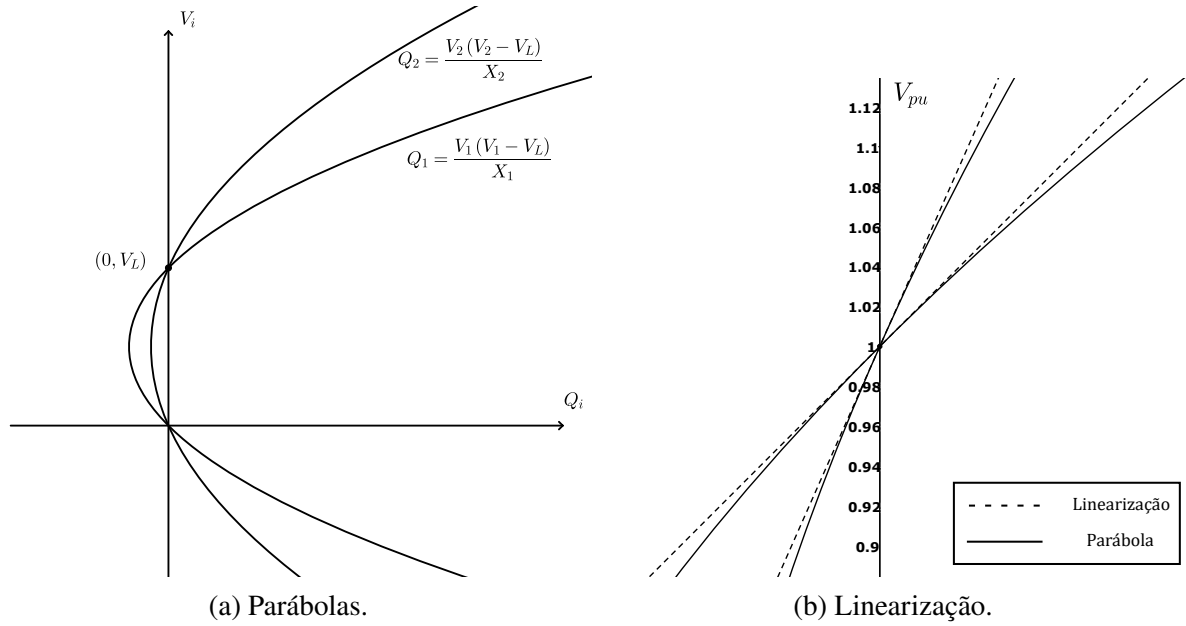
$$\left\{ \begin{array}{l} P_i = \frac{V_i V_L \delta_i}{X_i} , \\ Q_i = \frac{V_i (V_i - V_L)}{X_i} . \end{array} \right. \quad (26)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i = \frac{V_i V_L \delta_i}{X_i} , \\ Q_i = \frac{V_i (V_i - V_L)}{X_i} . \end{array} \right. \quad (27)$$

Note que, nesse caso, $\delta_i = \theta_i - \theta_L$. A Equação (27) descreve a relação entre Q_i e V_i que caracteriza a impedância de acoplamento, X_i , e pode ser utilizada juntamente com a equação do *droop* $Q - V$ para encontrar o ponto de operação (Q, V) de cada conversor. Antes, porém, é necessário realizar uma linearização, tendo em vista que a equação estabelece uma relação quadrática entre a tensão e a potência reativa geradas, de forma que, na verdade, representa uma parábola, tal como mostra a Figura 14a para o caso com 2 conversores da simulação exemplo

da seção anterior (impedância puramente indutiva). Para facilitar a visualização, essa figura foi elaborada considerando valores de V e Q em p.u., sendo as bases $V_b = V_L = 216,10V$, de acordo com a Tabela 3, e $Q_b = \frac{V_L^2}{X_1}$, com $X_1 = 1,7493\Omega$, de acordo com a Tabela 1. Como não há uma grande diferença entre as tensões geradas e a tensão da carga, assumindo operação dentro dos limites máximo e mínimo de tensão, é razoável realizar uma linearização em torno do ponto $(0, V_L)$, mostrada na Figura 14b e desenvolvida a seguir, utilizando a aproximação em série de Taylor de ordem 1.

Figura 14 – Curvas características das impedâncias de acoplamento.



Fonte: O autor (2024).

$$(V_i - V_L) = \left. \frac{\partial V_i}{\partial Q_i} \right|_{V_i=V_L} (Q_i - 0) .$$

Derivando a Equação (27) em relação a Q_i , obtém-se que

$$X_i = 2 V_i \left(\frac{\partial V_i}{\partial Q_i} \right) - V_L \left(\frac{\partial V_i}{\partial Q_i} \right) \Rightarrow \frac{\partial V_i}{\partial Q_i} = \frac{X_i}{2 V_i - V_L} \Rightarrow \left. \frac{\partial V_i}{\partial Q_i} \right|_{V_i=V_L} = \frac{X_i}{V_L} .$$

Portanto,

$$V_i = \left(\frac{X_i}{V_L} \right) Q_i + V_L . \quad (28)$$

A partir da relação devidamente demonstrada, ainda que condicionada a algumas simplificações e aproximações, fica claro que existe uma dependência entre V e Q , inerente ao fluxo de potência, e fortemente influenciada pelo valor da impedância de acoplamento do conversor à microrrede, de modo que a Equação (28) pode ser entendida como uma reta característica dessa impedância. Essas retas podem ser utilizadas para encontrar, aproximadamente, o ponto de

operação de cada conversor, realizando a interseção com o *droop* $Q - V$, tal como exemplificado na Figura 15, na qual se utilizou $V_b = 220 \text{ V}$ como tensão de base. De fato, os valores obtidos teoricamente para o caso analisado são condizentes com os valores simulados, conforme a Tabela 4. Para essa comparação, deve-se atentar para o fato de que a simulação foi realizada utilizando valores de pico de tensão no cálculo do *droop*, enquanto o gráfico teórico utiliza valores rms, sendo necessário para o desenho condizente com a situação simulada, utilizar o coeficiente n da Tabela 1 dividido por $\sqrt{2}$.

É importante salientar que a linearização realizada tem, além de um significado matemático, uma interpretação elétrica. Basta, para enxergar isso, demonstrá-la por outro caminho. A necessidade da linearização veio do fato de que a Equação (27) apresenta uma relação quadrática entre as variáveis de interesse. Porém, referindo-se à Figura 2, se ao invés de calcular a potência total entregue na saída do conversor for calculada a potência entregue à microrrede, ou seja, após a impedância de acoplamento e, portanto, desconsiderando as perdas desse elemento, obtém-se diretamente a relação linear.

$$\mathbf{S}_{iL} = \mathbf{V}_L \left(\frac{\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_L}{\mathbf{Z}_i} \right)^* = \frac{V_i V_L e^{-j\delta_i} - V_L^2}{\mathbf{Z}_i^*} = \frac{(V_i V_L e^{-j\delta_i} - V_L^2) \mathbf{Z}_i}{|\mathbf{Z}_i|^2}. \quad (29)$$

$$\begin{cases} P_{iL} = -R_i \frac{V_L^2}{|\mathbf{Z}_i|^2} + \frac{R_i V_i V_L \cos \delta_i}{|\mathbf{Z}_i|^2} + \frac{X_i V_i V_L \sin \delta_i}{|\mathbf{Z}_i|^2}, \\ Q_{iL} = -X_i \frac{V_L^2}{|\mathbf{Z}_i|^2} - \frac{R_i V_i V_L \sin \delta_i}{|\mathbf{Z}_i|^2} + \frac{X_i V_i V_L \cos \delta_i}{|\mathbf{Z}_i|^2}. \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P_{iL} = R_i \left[\frac{V_L (V_i \cos \delta_i - V_L)}{|\mathbf{Z}_i|^2} \right] + X_i \left[\frac{V_i V_L \sin \delta_i}{|\mathbf{Z}_i|^2} \right], \end{cases} \quad (30)$$

$$\begin{cases} Q_{iL} = X_i \left[\frac{V_L (V_i \cos \delta_i - V_L)}{|\mathbf{Z}_i|^2} \right] - R_i \left[\frac{V_i V_L \sin \delta_i}{|\mathbf{Z}_i|^2} \right]. \end{cases} \quad (31)$$

Realizando as aproximações de linha puramente indutiva e $\delta_i \approx 0$, a Equação (31) torna-se

$$Q_{iL} = \frac{V_L (V_i - V_L)}{X_i} \Rightarrow \boxed{V_i = \left(\frac{X_i}{V_L} \right) Q_{iL} + V_L}. \quad (32)$$

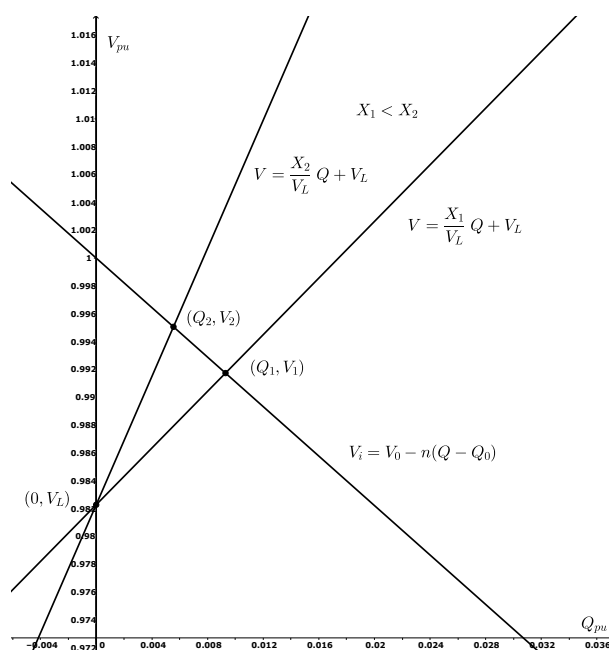
A Equação (32) é idêntica à Equação (28), bastando trocar a variável Q_{iL} por Q_i . Fica claro, então, que a linearização é equivalente a desprezar as perdas na impedância de acoplamento. Seja qual for a argumentação utilizada para demonstração, a representação das retas características das impedâncias de acoplamento permite enxergar graficamente por que a diferença entre as impedâncias produz pontos de operação distintos para cada conversor,

resultando em compartilhamento desigual da potência reativa, ou desproporcional, num caso em que os conversores têm potências nominais diferentes. De outro modo, fica claro que se as impedâncias fossem idênticas, o que não acontece na realidade, o compartilhamento de potência reativa seria perfeito.

Figura 15 – Obtenção gráfica dos pontos de operação.

Tabela 4 – Comparação entre os resultados obtidos a partir da Figura 15 e os resultados de simulação.

Valores obtidos em simulação	
Q1	255,4 var
Q2	157,8 var
V1	218,9 V
V2	219,5 V
Valores Teóricos	
Q1	257,31 var
Q2	154,9 var
V1	218,24 V
V2	218,92 V



Fonte: O autor (2024).

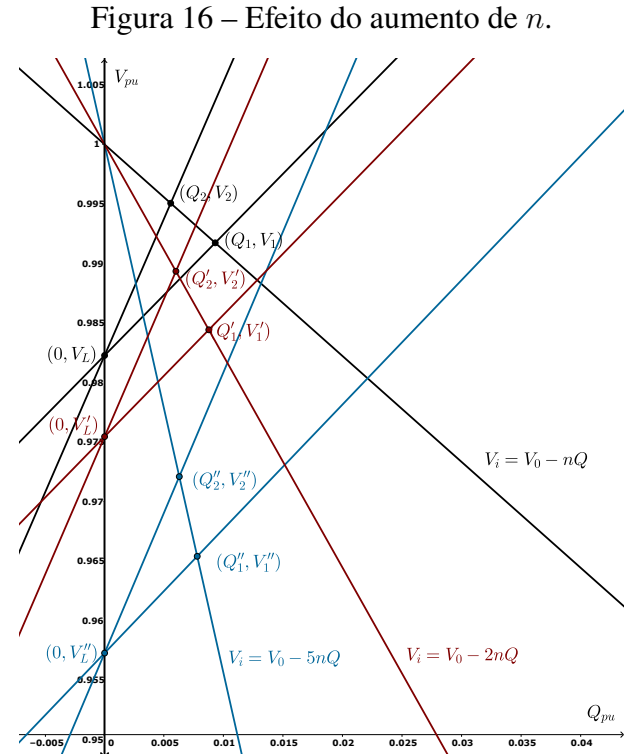
Um primeiro artifício para sanar esse problema do compartilhamento seria o aumento da inclinação da reta *droop* $Q - V$, que provoca aproximação entre os valores de Q e queda dos valores de V dos pontos de operação, ou seja, melhora o compartilhamento de potência reativa ao custo de piorar os níveis de tensão, que podem, eventualmente, ultrapassar os valores limites de operação estabelecidos. A Figura 16 mostra os novos pontos de operação caso o coeficiente previamente utilizado seja aumentado em 2 e 5 vezes e a Tabela 5 faz o comparativo dos valores obtidos em simulação. É preciso ter em mente que no caso específico as impedâncias não provocam grandes quedas de tensão, de modo que a tensão na carga é bastante próxima do 1 p.u., mas em situações mais críticas, nas quais a tensão na carga já estiver próxima do limite inferior de operação, o aumento de n pode não ser viável como opção para melhorar o compartilhamento de potência. Em todo caso, mesmo que possível, é necessário um grande aumento do valor de n para a obtenção de um resultado que ainda deixa a desejar com relação à proximidade dos valores de Q_1 e Q_2 , como mostra a Figura 16.

Outra observação importante é que a queda de tensão na carga diminui a potência demandada por ela, considerando um modelo impedância constante. A rigor isso também modifica a inclinação das retas características, de acordo com a Equação (28), fato praticamente imperceptível na Figura 16. Apesar do resultado obtido nessa simulação específica ser condizente com o comportamento já conhecido para o aumento da inclinação do *droop* (LIU et al., 2019),

apenas uma demonstração teórica pode garantir a generalidade desse comportamento, ou delimitar as condições sob as quais o aumento de n de fato provoca diminuição do erro de compartilhamento de potência. A princípio, as demonstrações serão realizadas para a microrrede exemplo utilizada até então, sendo generalizadas quando necessário.

Tabela 5 – Comparação entre os pontos de operação antes e depois do aumento de n (valores simulados).

Valores originais	
Q1	255.4 var
Q2	157.8 var
V1	218.9 V
V2	219.5 V
Valores para 2xn	
Q'1	239.4 var
Q'2	168.1 var
V'1	217.3 V
V'2	218.3 V
Valores para 5xn	
Q''1	215.7 var
Q''2	176.6 var
V''1	213.0 V
V''2	214.4 V



Fonte: O autor (2024).

A primeira questão levantada pela Figura 16 é se a tensão na carga sempre cai com o aumento de n . Para avaliar isso, basta estudar o sinal da derivada $\frac{\partial V_L}{\partial n}$, obtida a partir de uma expressão para V_L , que, por sua vez, pode ser obtida por meio de uma expressão para a potência da carga, tal como a seguir:

$$S_L = \mathbf{V}_L \mathbf{I}_L^* = \frac{|\mathbf{V}_L|^2}{\mathbf{Z}_L^*} = \frac{V_L^2}{R_L - jX_L} = \left(\frac{V_L^2}{R_L^2 + X_L^2} \right) (R_L + jX_L).$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P_L = V_L^2 \left(\frac{R_L}{R_L^2 + X_L^2} \right), \\ Q_L = V_L^2 \left(\frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} \right). \end{cases} \quad (33)$$

$$(34)$$

Considerando desprezíveis as perdas nas impedâncias de acoplamento, pode-se escrever que

$$Q_L \approx Q_1 + Q_2. \quad (35)$$

Lembrando que essa mesma consideração já havia sido feita antes para a elaboração das Figuras 15 e 16, e possibilita que as potências reativas de cada conversor sejam expressas por

meio da Equação (28). Utilizando também a equação do *droop*, na qual se estabelece $Q_0 = 0$, por simplificação, pode-se escrever Q_i em função de n :

$$\begin{cases} Q_i = \frac{V_L (V_i - V_L)}{X_i} \\ V_i = V_0 - n Q_i \end{cases} \Rightarrow Q_i = \frac{V_L (V_0 - n Q_i - V_L)}{X_i} \Rightarrow Q_i \left(1 + \frac{n V_L}{X_i} \right) = \frac{V_L (V_0 - V_L)}{X_i}$$

$$\Rightarrow Q_i = \frac{V_L (V_0 - V_L)}{X_i + n V_L} . \quad (36)$$

Substituindo para cada Q_i na Equação (35), juntamente com a expressão para Q_L da Equação (34), obtém-se a expressão de V_L como função implícita de n :

$$\begin{aligned} V_L^2 \left(\frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} \right) &= \left[\left(\frac{V_L (V_0 - V_L)}{X_1 + n V_L} \right) + \left(\frac{V_L (V_0 - V_L)}{X_2 + n V_L} \right) \right] \\ \Rightarrow V_L \left(\frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} \right) &= (V_0 - V_L) \left[\left(\frac{1}{X_1 + n V_L} \right) + \left(\frac{1}{X_2 + n V_L} \right) \right] . \end{aligned} \quad (37)$$

Derivando em relação a n , e levando em conta que somente a tensão na carga é função de n , permanecendo fixos os demais parâmetros, tem-se que

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_L}{\partial n} \left(\frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} \right) &= - \frac{\partial V_L}{\partial n} \left[\left(\frac{1}{X_1 + n V_L} \right) + \left(\frac{1}{X_2 + n V_L} \right) \right] \\ &\quad - (V_0 - V_L) \left(V_L + n \frac{\partial V_L}{\partial n} \right) \left[\frac{1}{(X_1 + n V_L)^2} + \frac{1}{(X_2 + n V_L)^2} \right] . \end{aligned}$$

A Equação (36) permite reescrever a expressão em termos das potências reativas:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_L}{\partial n} \left(\frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} \right) &= - \frac{\partial V_L}{\partial n} \left[\left(\frac{Q_1}{V_L (V_0 - V_L)} \right) + \left(\frac{Q_2}{V_L (V_0 - V_L)} \right) \right] \\ &\quad - (V_0 - V_L) \left(V_L + n \frac{\partial V_L}{\partial n} \right) \left[\left(\frac{Q_1}{V_L (V_0 - V_L)} \right)^2 + \left(\frac{Q_2}{V_L (V_0 - V_L)} \right)^2 \right] \\ \Rightarrow \frac{\partial V_L}{\partial n} \left[\left(\frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} \right) + \left(\frac{Q_1 + Q_2}{V_L (V_0 - V_L)} \right) + \left(\frac{n Q_1^2 + n Q_2^2}{V_L^2 (V_0 - V_L)} \right) \right] &= - \left(\frac{Q_1^2 + Q_2^2}{V_L (V_0 - V_L)} \right) . \end{aligned}$$

Para simplificar a expressão, pode-se escrever os termos da impedância da carga em função das potências Q_1 e Q_2 a partir das equações (34) e (35), de modo que

$$\frac{\partial V_L}{\partial n} \left[\underbrace{\left(\frac{Q_1 + Q_2}{V_L^2} \right) + \left(\frac{Q_1 + Q_2}{V_L (V_0 - V_L)} \right)}_{\frac{(Q_1 + Q_2) V_0}{V_L^2 (V_0 - V_L)}} + \left(\frac{n Q_1^2 + n Q_2^2}{V_L^2 (V_0 - V_L)} \right) \right] = - \left(\frac{Q_1^2 + Q_2^2}{V_L (V_0 - V_L)} \right) .$$

Finalmente, obtém-se a expressão desejada:

$$\frac{\partial V_L}{\partial n} = - \left(\frac{V_L (Q_1^2 + Q_2^2)}{V_0 (Q_1 + Q_2) + n (Q_1^2 + Q_2^2)} \right). \quad (38)$$

Uma vez que $Q_1^2 > 0$, $Q_2^2 > 0$ e $Q_1 + Q_2 = Q_L > 0$, independentemente do sinal individual de Q_1 ou Q_2 , todos os termos dentro do parêntese no segundo membro da equação anterior são positivos, de modo que a taxa de variação de V_L em relação a n é sempre negativa. Ou seja, sempre que n aumenta, V_L cai, conforme acontece no exemplo mostrado. Resta avaliar se o erro entre as potências reativas também diminui. Para saber quando duas grandezas se aproximam entre si bastaria avaliar o módulo da diferença entre elas. Entretanto, tendo em vista as futuras generalizações das demonstrações ora realizadas, convém pensar em uma maneira de verificar a aproximação entre mais de duas grandezas. Para isso basta verificar se a média entre essas grandezas é próxima ao valor assumido por cada uma delas. Para o caso com 2 conversores, a expressão do erro toma a seguinte forma:

$$\varepsilon(Q_i) = \left| Q_i - \left(\frac{Q_1 + Q_2}{2} \right) \right|. \quad (39)$$

Não à toa, o termo entre parênteses corresponde exatamente à potência reativa da carga dividida igualmente entre os dois conversores, uma vez que $Q_1 + Q_2 = Q_L$, situação que corresponderia a um compartilhamento perfeito para um caso em que os conversores têm potências nominais iguais. Caso os conversores tenham potências nominais distintas, as proporções entre essas potências devem ser levadas em conta. Voltando ao exemplo simplificado, para cada conversor, a Equação (39) torna-se

$$\Rightarrow \begin{cases} \varepsilon(Q_1) = \left| \left(\frac{Q_1 - Q_2}{2} \right) \right|, \\ \varepsilon(Q_2) = \left| \left(\frac{Q_2 - Q_1}{2} \right) \right|. \end{cases}$$

A diferença entre as potências reativas acaba surgindo nas expressões, que são basicamente as mesmas levando em conta o módulo. Supondo, sem perda de generalidade, que $Q_1 > Q_2$, assim como acontece no exemplo, as expressões tornam-se iguais, o que só ocorre para um caso com dois conversores, por motivos óbvios.

$$\varepsilon(Q_1) = \varepsilon(Q_2) = \frac{Q_1 - Q_2}{2}. \quad (40)$$

Para calcular a variação do erro acima com n basta conhecer as taxas de variação de cada potência reativa em relação a essa variável, o que pode ser obtido por meio da expressão 36:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial n} = \frac{(V_0 \frac{\partial V_L}{\partial n} - 2 V_L \frac{\partial V_L}{\partial n}) (X_i + n V_L) - V_L (V_0 - V_L) (V_L + n \frac{\partial V_L}{\partial n})}{(X_i + n V_L)^2}.$$

Utilizando novamente a própria expressão 36, pode-se reescrever a equação anterior em termos de potências reativas:

$$\begin{aligned}\Rightarrow \frac{\partial Q_i}{\partial n} &= \left(V_0 \frac{\partial V_L}{\partial n} - 2 V_L \frac{\partial V_L}{\partial n} \right) \frac{Q_i}{V_L (V_0 - V_L)} - \left(V_L + n \frac{\partial V_L}{\partial n} \right) \frac{Q_i^2}{V_L (V_0 - V_L)} \\ \Rightarrow \frac{\partial Q_i}{\partial n} &= -\frac{V_L Q_i^2}{V_L (V_0 - V_L)} + \left[\frac{(V_0 - 2 V_L) Q_i - n Q_i^2}{V_L (V_0 - V_L)} \right] \frac{\partial V_L}{\partial n}.\end{aligned}$$

Utilizando a Equação (38):

$$\begin{aligned}\Rightarrow \frac{\partial Q_i}{\partial n} &= -\frac{Q_i^2}{(V_0 - V_L)} - \left[\frac{(V_0 - 2 V_L) Q_i - n Q_i^2}{V_L (V_0 - V_L)} \right] \left[\frac{V_L (Q_1^2 + Q_2^2)}{V_0 (Q_1 + Q_2) + n (Q_1^2 + Q_2^2)} \right] \\ \Rightarrow \frac{\partial Q_i}{\partial n} &= \frac{-Q_i^2 V_0 (Q_1 + Q_2) - n Q_i^2 (Q_1^2 + Q_2^2) + (2 V_L - V_0) Q_i (Q_1^2 + Q_2^2) + n Q_i^2 (Q_1^2 + Q_2^2)}{(V_0 - V_L) [V_0 (Q_1 + Q_2) + n (Q_1^2 + Q_2^2)]} \\ \Rightarrow \frac{\partial Q_i}{\partial n} &= \frac{(2 V_L - V_0) Q_i (Q_1^2 + Q_2^2) - Q_i^2 V_0 (Q_1 + Q_2)}{(V_0 - V_L) [V_0 (Q_1 + Q_2) + n (Q_1^2 + Q_2^2)]}.\end{aligned}\quad (41)$$

Aplicando a equação encontrada para cada conversor, é possível obter a diferença entre as derivadas:

$$\begin{aligned}\Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial Q_1}{\partial n} = \frac{2 V_L Q_1 (Q_1^2 + Q_2^2) - V_0 (2 Q_1^3 + Q_1^2 Q_2 + Q_1 Q_2^2)}{(V_0 - V_L) [V_0 (Q_1 + Q_2) + n (Q_1^2 + Q_2^2)]} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial n} = \frac{2 V_L Q_2 (Q_1^2 + Q_2^2) - V_0 (2 Q_2^3 + Q_2^2 Q_1 + Q_2 Q_1^2)}{(V_0 - V_L) [V_0 (Q_1 + Q_2) + n (Q_1^2 + Q_2^2)]} \end{cases} \\ \Rightarrow \frac{\partial Q_1}{\partial n} - \frac{\partial Q_2}{\partial n} = \frac{2 V_L (Q_1 - Q_2) (Q_1^2 + Q_2^2) - V_0 (2 Q_1^3 - 2 Q_2^3)}{(V_0 - V_L) [V_0 (Q_1 + Q_2) + n (Q_1^2 + Q_2^2)]} \\ \Rightarrow \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{Q_1 - Q_2}{2} \right) = \frac{(V_L - V_0) (Q_1^3 - Q_2^3) + V_L Q_1 Q_2 (Q_2 - Q_1)}{(V_0 - V_L) [V_0 (Q_1 + Q_2) + n (Q_1^2 + Q_2^2)]}.\end{aligned}\quad (42)$$

Levando em conta que $V_0 > V_L$, o denominador da expressão encontrada é sempre positivo e, além disso, como se tomou a hipótese de que $Q_1 > Q_2$, os dois termos do numerador são negativos, de forma que fica demonstrado que

$$\boxed{\frac{\partial \varepsilon(Q_2)}{\partial n} = \frac{\partial \varepsilon(Q_1)}{\partial n} < 0}.\quad (43)$$

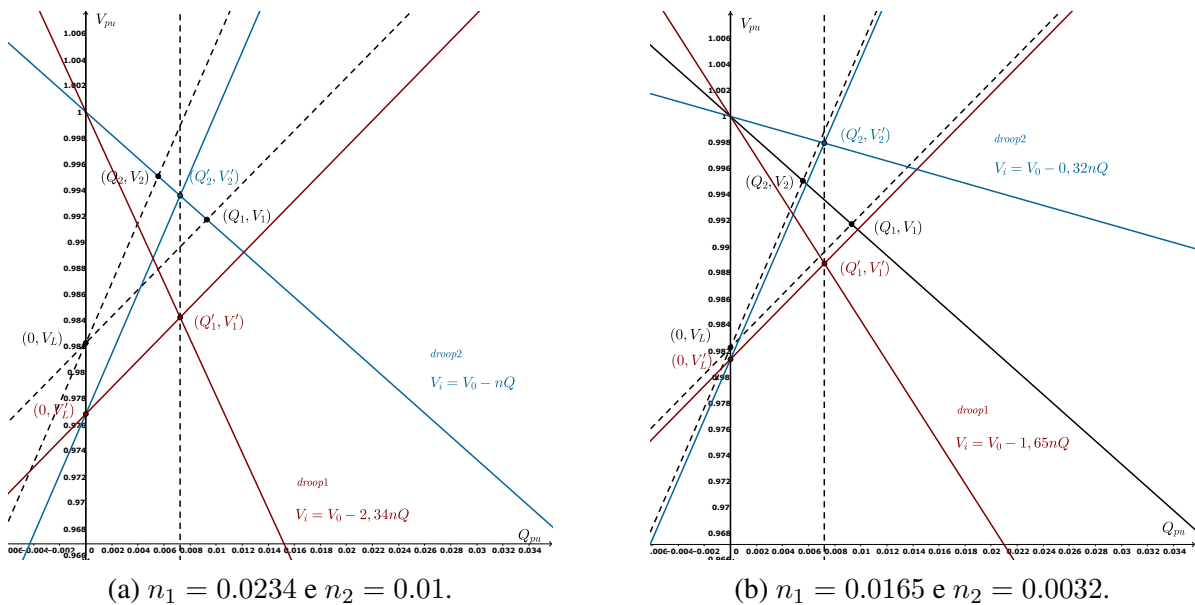
Ou seja, quando n aumenta os valores de potência reativa se aproximam entre si, tendendo para a média entre eles. Essa conclusão mostra que o comportamento observado em simulação de fato é genérico, pelo menos para sistemas com as simplificações adotadas.

Uma observação sobre a escolha proporcional dos coeficientes do *droop* $Q - V$

A interpretação gráfica dos pontos de operação realizada nas Figuras 15 e 16, embora limitada a situações em que as impedâncias de acoplamento são puramente indutivas, abre espaço para um questionamento acerca da escolha dos coeficientes de inclinação do *droop* $Q - V$. Conforme já discutido quando da apresentação da Equação (25), a escolha proporcional dos coeficientes de inclinação do *droop* não garante, especificamente para o *droop* de tensão, bom compartilhamento de potência, por conta das diferenças entre as tensões de operação dos conversores, de forma que não há nenhum prejuízo em quebrar esse preceito. Sendo assim, por que não utilizar valores distintos (ou desproporcionais) para as inclinações *droop* de cada conversor?

Esse questionamento permite uma liberdade muito maior no que diz respeito a alcançar um bom compartilhamento de potência reativa sem necessariamente comprometer o nível de tensão. Por exemplo, ao desvencilhar as retas de controle de cada conversor na Figura 16 seria mais fácil obter uma situação de regime permanente em que os pontos de operação se encontrem praticamente na mesma vertical (mesmo Q) sem que seja necessário aumentar os valores de n excessivamente, como ocorreu no caso previamente simulado. A Figura 17 mostra duas das inúmeras possibilidades de pares de valores de n que resultam em bom compartilhamento de potência reativa. Na Figura 17a apenas o coeficiente do conversor 1 foi alterado, bastando aumentá-lo para um valor 2,34 vezes maior que original, enquanto o coeficiente do *droop* do outro conversor permaneceu fixo. Já na Figura 17b ambos os coeficientes foram alterados, porém o do primeiro para um valor maior que original e o segundo para um valor menor, possibilitando uma queda de tensão significativamente menor que no exemplo anterior.

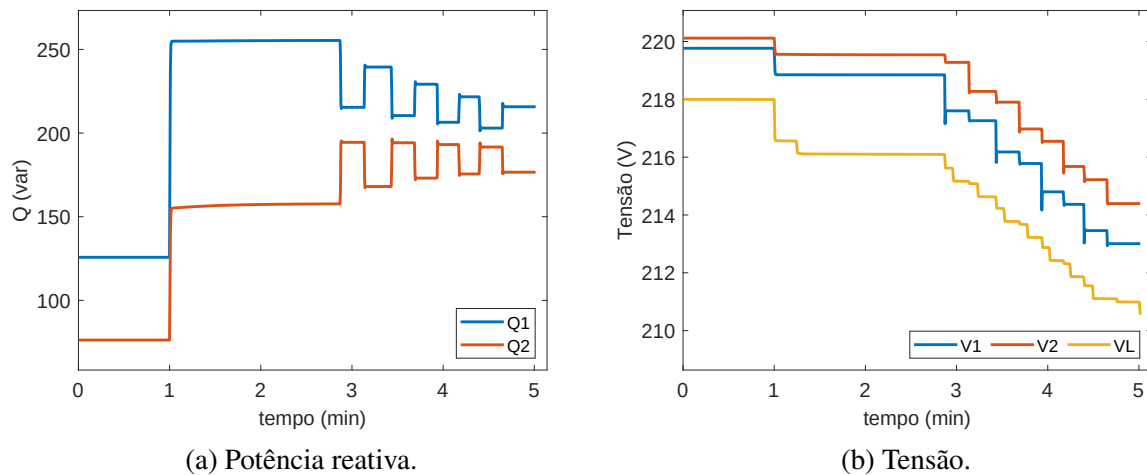
Figura 17 – Exemplos de pontos de operação com n s distintos.



Fonte: O autor (2024).

A independência entre os valores de n de cada *droop* abre espaço para investigações sobre o efeito da variação de cada um desses valores, individualmente, na operação da microrrede. Não é difícil perceber empiricamente, para o sistema simplificado em análise, que há um comportamento consistente quando se aumenta o n de qualquer dos dois conversores: ocorre uma queda no valor da tensão da carga; diminuição da potência reativa do conversor cujo parâmetro foi aumentado; e aumento da potência reativa do outro conversor. A Figura 18, obtida submetendo o circuito a aumentos sucessivos e alternados dos n s de cada conversor, começando pelo conversor 1, mostra exatamente esses efeitos. Fica claro, então, que o aumento simultâneo dos dois coeficientes na realidade retarda a obtenção de bom compartilhamento de potência se comparado ao efeito de aumentar somente um desses coeficientes. Na Figura 18a, o progresso obtido ao aumentar n_1 é parcialmente desfeito quando se aumenta n_2 . Ao longo do processo, o primeiro efeito acaba prevalecendo, mas, para obtenção de uma dada aproximação entre as potências reativas se aumentados os dois coeficientes, seriam necessários aumentos muito maiores que no caso em que o segundo coeficiente permanece em seu valor original.

Figura 18 – Efeitos dos aumentos individuais e alternados dos n s (passos de 0,01).



Fonte: O autor (2024).

Conforme já comentado, o aumento do n de um dado conversor, provoca diminuição na sua própria potência reativa e aumento na do outro, de forma que, a fim de aproximar os valores das potências reativas, é necessário aumentar o n do conversor que está entregando mais potência e diminuir o do que está entregando menos, que foi justamente o que se realizou no exemplo da Figura 17b. É importante pontuar, entretanto, que esses comportamentos valem para quando o valor de potência reativa de referência da equação do *droop*, Q_0 , é nulo e todas as tensões forem menores que a referência de tensão V_0 , o que acontece, nesse caso, se as potências reativas forem todas positivas. Do contrário, esses comportamentos de variação de potência reativa com aumento de n podem se inverter. Sendo assim, faz-se necessário novamente o entendimento matemático desses comportamentos, a fim de prever se de fato o que se observa é genérico e sob quais condições acontece como descrito.

Antes de iniciar a demonstração, convém apenas salientar que, assim como nas demais demonstrações já realizadas, considera-se, a título de simplificação, a equação do *droop* com $Q_0 = 0$, o que não fere a generalidade dessas análises, uma vez que dado um ponto (Q_0, V_0) sempre é possível expressar a mesma reta *droop* por meio de um ponto $(0, V'_0)$, tal como mostrado abaixo:

$$V = V_0 - n(Q - Q_0) \Rightarrow V = \underbrace{V_0 + nQ_0}_{V'_0} - nQ. \quad (44)$$

Sendo assim, quaisquer conclusões ou restrições sobre o valor V_0 decorrentes das demonstrações a serem realizadas podem ser utilizadas uma vez que se expresse a equação da reta como acima. Analogamente ao desenvolvimento para o caso em que os n s permanecem iguais, a primeira questão que precisa ser comprovada teoricamente é o comportamento da tensão na carga com a variação de n , porém agora analisando a mudança de cada conversor separadamente. No intuito de oferecer uma argumentação mais genérica, inclusive expandindo o que já foi realizado, as deduções serão feitas para um caso com N conversores, ainda utilizando a topologia simplificada com as impedâncias de acoplamento puramente indutivas. Mais uma vez, considerando desprezíveis as perdas nessas impedâncias, pode-se escrever, em analogia à Equação (35) que

$$V_L^2 \left(\frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} \right) \stackrel{(34)}{=} Q_L \approx \sum_{i=1}^N Q_i. \quad (45)$$

Por sua vez, cada um dos Q_i pode ser expresso como na Equação (36), mas agora denominando por n_i o coeficiente referente ao i -ésimo conversor:

$$\Rightarrow \boxed{Q_i = \frac{V_L(V_0 - V_L)}{X_i + n_i V_L}}. \quad (46)$$

Convém derivar a equação acima em relação a n_i e também em relação a n_j , com $j \neq i$, para posterior aplicação.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial n_i} = \frac{\left(V_0 \frac{\partial V_L}{\partial n_i} - 2 V_L \frac{\partial V_L}{\partial n_i} \right) (X_i + n_i V_L) - V_L (V_0 - V_L) \left(V_L + n_i \frac{\partial V_L}{\partial n_i} \right)}{(X_i + n_i V_L)^2}.$$

Da mesma forma como na demonstração anterior, pode-se expressar a última equação em termos de Q_i utilizando a própria Equação (46):

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{\partial Q_i}{\partial n_i} &= (V_0 - 2V_L) \left(\frac{Q_i}{V_L(V_0 - V_L)} \right) \frac{\partial V_L}{\partial n_i} - \left(\frac{Q_i^2}{V_L(V_0 - V_L)} \right) \left(V_L + n_i \frac{\partial V_L}{\partial n_i} \right) \\ \Rightarrow \frac{\partial Q_i}{\partial n_i} &= -\frac{V_L Q_i^2}{V_L(V_0 - V_L)} + \left[\frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n_i Q_i^2}{V_L(V_0 - V_L)} \right] \frac{\partial V_L}{\partial n_i}. \end{aligned} \quad (47)$$

A equação obtida é idêntica à da demonstração anterior, apenas trocando n por n_i . Em contrapartida, ao derivar Q_i em relação ao coeficiente de outro conversor, n_j , não aparece mais o

primeiro termo do segundo membro da Equação (47).

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial Q_i}{\partial n_j} &= \frac{\left(V_0 \frac{\partial V_L}{\partial n_j} - 2 V_L \frac{\partial V_L}{\partial n_j} \right) (X_i + n_i V_L) - V_L (V_0 - V_L) \left(n_i \frac{\partial V_L}{\partial n_j} \right)}{(X_i + n_i V_L)^2} \\
 \xrightarrow{(46)} \frac{\partial Q_i}{\partial n_j} &= (V_0 - 2V_L) \left(\frac{Q_i}{V_L (V_0 - V_L)} \right) \frac{\partial V_L}{\partial n_j} - \left(\frac{Q_i^2}{V_L (V_0 - V_L)} \right) \left(n_i \frac{\partial V_L}{\partial n_j} \right) \\
 \Rightarrow \frac{\partial Q_i}{\partial n_j} &= \left[\frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n_i Q_i^2}{V_L (V_0 - V_L)} \right] \frac{\partial V_L}{\partial n_j} \quad (i \neq j). \quad (48)
 \end{aligned}$$

De posse das Equações (47) e (48), pode-se derivar a Equação (45) em relação a um dado n_j e substituir as derivadas das potências reativas para encontrar a derivada da tensão da carga com relação a n_j .

$$\begin{aligned}
 2 V_L \frac{\partial V_L}{\partial n_j} \left(\frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} \right) &= \sum_{i=1}^N \frac{\partial Q_i}{\partial n_j} = \frac{\partial Q_j}{\partial n_j} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \frac{\partial Q_i}{\partial n_j} \\
 \Rightarrow 2 V_L \frac{\partial V_L}{\partial n_j} \left(\frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} \right) &= -\frac{V_L Q_j^2}{V_L (V_0 - V_L)} + \left[\frac{(V_0 - 2V_L) Q_j - n_j Q_j^2}{V_L (V_0 - V_L)} \right] \frac{\partial V_L}{\partial n_j} \\
 &\quad + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \left[\frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n_i Q_i^2}{V_L (V_0 - V_L)} \right] \frac{\partial V_L}{\partial n_j} \\
 \Rightarrow 2 V_L \frac{\partial V_L}{\partial n_j} \left(\frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} \right) &= -\frac{V_L Q_j^2}{V_L (V_0 - V_L)} + \sum_{i=1}^N \left[\frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n_i Q_i^2}{V_L (V_0 - V_L)} \right] \frac{\partial V_L}{\partial n_j}. \quad (49)
 \end{aligned}$$

Pode-se utilizar a Equação (45) para substituir o termo relacionado à impedância da carga e isolar o termo da derivada:

$$\begin{aligned}
 \Rightarrow \frac{2}{V_L} \frac{\partial V_L}{\partial n_j} \sum_{i=1}^N Q_i &= -\frac{V_L Q_j^2}{V_L (V_0 - V_L)} + \sum_{i=1}^N \left[\frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n_i Q_i^2}{V_L (V_0 - V_L)} \right] \frac{\partial V_L}{\partial n_j} \\
 \Rightarrow \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{2 Q_i (V_0 - V_L)}{V_L (V_0 - V_L)} - \sum_{i=1}^N \left[\frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n_i Q_i^2}{V_L (V_0 - V_L)} \right] \right\} \frac{\partial V_L}{\partial n_j} &= -\frac{V_L Q_j^2}{V_L (V_0 - V_L)} \\
 \Rightarrow \left\{ \sum_{i=1}^N \left[\frac{V_0 Q_i + n_i Q_i^2}{V_L (V_0 - V_L)} \right] \right\} \frac{\partial V_L}{\partial n_j} &= -\frac{V_L Q_j^2}{V_L (V_0 - V_L)} \\
 \Rightarrow \boxed{\frac{\partial V_L}{\partial n_j} = -\frac{V_L Q_j^2}{\sum_{i=1}^N (V_0 Q_i + n_i Q_i^2)}}. \quad (50)
 \end{aligned}$$

De forma semelhante à demonstração realizada anteriormente, tanto o numerador quanto o denominador da fração expressa acima são positivos, uma vez que, para todo i , $Q_i^2 > 0$, $\sum_{i=1}^N Q_i = Q_L > 0$ e $n_i > 0$. Sendo assim, o sinal na Equação (50) deixa explícito que o aumento individual de qualquer dos coeficientes de inclinação resultará em queda de tensão. Para avaliar o aumento conjunto de todos os n s caso tenham valores iguais, obtendo-se uma versão generalizada da Equação (38), basta considerar a diferencial total da variável V_L , com $dn_j = dn$:

$$dV_L = \sum_{j=1}^N \frac{\partial V_L}{\partial n_j} dn_j = dn \sum_{i=j}^N \frac{\partial V_L}{\partial n_j}$$

$$\xrightarrow{(50)} \frac{dV_L}{dn} = - \frac{V_L \sum_{j=1}^N Q_j^2}{\sum_{i=1}^N (V_0 Q_i + n Q_i^2)} . \quad (51)$$

Uma vez demonstrado teoricamente o comportamento observado para a tensão, segue-se à dedução das fórmulas para as derivadas da potência reativa, substituindo a Equação (50) nas Equações (47) e (48), com o cuidado de renomear a notação dos somatórios de forma que não haja conflitos com os índices das demais variáveis.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial n_i} = - \frac{V_L Q_i^2}{V_L (V_0 - V_L)} - \left[\frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n_i Q_i^2}{V_L (V_0 - V_L)} \right] \left[\frac{V_L Q_i^2}{\sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n_k Q_k^2)} \right]$$

$$\Rightarrow \frac{\partial Q_i}{\partial n_i} = - \frac{Q_i^2}{(V_0 - V_L)} \left[1 + \frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n_i Q_i^2}{\sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n_k Q_k^2)} \right] . \quad (52)$$

Para facilitar a análise dessa equação, convém reescrevê-la como abaixo:

$$\Rightarrow \frac{\partial Q_i}{\partial n_i} = - \frac{Q_i^2}{(V_0 - V_L)} \left[\frac{2(V_0 - V_L) Q_i + \sum_{k \neq i}^N (V_0 Q_k + n_k Q_k^2)}{\sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n_k Q_k^2)} \right] . \quad (53)$$

Nota-se que $\sum_{k \neq i}^N Q_k = Q_L - Q_i$, de forma que basta considerar que $V_0 > V_L$ e que $0 < Q_i < Q_L$, o que sempre ocorre, considerando todos os Q_k positivos, para que todos os termos do segundo membro da equação sejam positivos. Portanto, o sinal explicita que a taxa de variação calculada é negativa, confirmando o comportamento observado de que se o n de um conversor aumenta, sua potência reativa diminui. A avaliação do outro caso segue analogamente.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial n_j} = \left[\frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n_i Q_i^2}{V_L (V_0 - V_L)} \right] \left[- \frac{V_L Q_j^2}{\sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n_k Q_k^2)} \right]$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial n_j} = - \frac{Q_j^2}{(V_0 - V_L)} \left[\frac{\overbrace{(V_0 - 2V_L) Q_i}^{(V_0 - 2V_L) Q_i} - n_i Q_i^2}{\sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n_k Q_k^2)} \right] \quad (i \neq j) . \quad (54)$$

Conforme mostrado, o numerador do termo entre colchetes pode ser reescrito em função de V_i utilizando a própria equação do *droop*. É plausível considerar que $V_L < V_0$ e que $V_i < 2 V_L$. Com essas condições, e levando em conta que Q_i é positivo, o numerador do termo entre colchetes é negativo, com os demais termos sendo positivos, de forma que o sinal que está explícito torna a expressão positiva. Ou seja, o aumento de n de um dado conversor provoca aumento da potência reativa dos demais conversores, o que confirma o comportamento observado em simulação na Figura 18a. É importante salientar que, tanto nessa argumentação como na anterior, uma condição crucial para que se pudesse chegar às conclusões sobre os sinais das derivadas é a de que $Q_i > 0$. Como as demonstrações estão sendo realizadas para um caso com impedâncias de acoplamento puramente indutivas, essa condição sempre é verdadeira, para todos os conversores, dado que $V_L < V_0$, o que se pode verificar facilmente analisando a Figura 15 e a Equação (46). Em outras situações, em que as impedâncias têm parcela resistiva, a figura e a equação citadas já não valem mais e pode ser que ocorra de um conversor consumir potência reativa, caracterizando uma situação de circulação de potência entre conversores, como ocorreu no exemplo com rede puramente resistiva mostrado na Figura 11f.

Aproveitando as expressões já desenvolvidas, pode-se deduzir também uma generalização da Equação (43), para o caso em que todos os n s variam de maneira conjunta. Mais uma vez, utiliza-se o conceito de diferencial total considerando $dn_j = dn$.

$$dQ_i = \sum_{j=1}^N \frac{\partial Q_i}{\partial n_j} dn_j = dn \left(\frac{\partial Q_i}{\partial n_i} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{\partial Q_i}{\partial n_j} \right). \quad (55)$$

Utilizando as Equações (52) e (54), com $n_i = n_k = n$, deduz-se a expressão que representa a totalização do efeito das contribuições de cada variação de n :

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{dQ_i}{dn} &= -\frac{Q_i^2}{(V_0 - V_L)} \left[1 + \frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n Q_i^2}{\sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n Q_k^2)} \right] \\ &\quad + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N -\frac{Q_j^2}{(V_0 - V_L)} \left[\frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n Q_i^2}{\sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n Q_k^2)} \right] \\ \Rightarrow \frac{dQ_i}{dn} &= -\frac{Q_i^2}{(V_0 - V_L)} + \sum_{j=1}^N -\frac{Q_j^2}{(V_0 - V_L)} \left[\frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n Q_i^2}{\sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n Q_k^2)} \right]. \end{aligned}$$

Na equação acima, $(V_0 - V_L)$ é constante assim como os termos entre colchetes, de modo que se pode escrever uma equação análoga à forma inicial da Equação (41):

$$\Rightarrow \frac{dQ_i}{dn} = -\frac{Q_i^2}{(V_0 - V_L)} - \frac{\sum_{k=1}^N Q_k^2}{(V_0 - V_L)} \left[\frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n Q_i^2}{\sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n Q_k^2)} \right], \quad (56)$$

com a notação dos somatórios padronizada para o índice k .

Para avaliar a diminuição do erro no compartilhamento de potência com o aumento de n nesse caso com N conversores, pode-se fazer uma analogia ao conceito de precisão de um conjunto de dados. Na estatística, a precisão significa proximidade entre os valores de um determinado conjunto e é quantificada por meio da variância e do desvio padrão, grandezas que indicam o grau de espalhamento daquele conjunto de dados em torno de sua média. Essa ideia pode ser utilizada, ao invés de avaliar somente a distância em relação à média, como foi feito no caso com 2 conversores, para verificar se o aumento de n diminui esse espalhamento dos valores de Q em torno do valor médio, ou seja, se melhora o compartilhamento de potência, uma vez que a média dos Q s, expressa pela equação

$$Q_m = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Q_k \stackrel{(45)}{=} \frac{Q_L}{N}, \quad (57)$$

também pode ser interpretada como a potência reativa fornecida pelos conversores quando o compartilhamento é perfeito, caso os conversores tenham potências nominais iguais. Para tanto, é definido o erro de compartilhamento e a variância dos valores de Q , conforme as seguintes equações:

$$\varepsilon(Q_i) = \left| Q_i - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Q_k \right| \stackrel{(57)}{\Rightarrow} \varepsilon(Q_i) = \left| Q_i - \frac{Q_L}{N} \right|. \quad (58)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(Q_i)^2 \stackrel{(58)}{\Rightarrow} \sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(Q_i - \frac{Q_L}{N} \right)^2. \quad (59)$$

Derivando a expressão do somatório em relação a n , obtém-se que

$$\frac{\partial}{\partial n} \left(Q_i - \frac{Q_L}{N} \right)^2 = 2 \left(Q_i - \frac{Q_L}{N} \right) \left(\frac{\partial Q_i}{\partial n} - \frac{1}{N} \frac{\partial Q_L}{\partial n} \right). \quad (60)$$

De forma que a derivada da variância é dada por

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial n} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \left(Q_i - \frac{Q_L}{N} \right) \left(\frac{\partial Q_i}{\partial n} - \frac{1}{N} \frac{\partial Q_L}{\partial n} \right). \quad (61)$$

A derivada da potência da carga pode ser obtida por meio da derivada da tensão na carga, já deduzida na Equação (51).

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_L}{\partial n} &\stackrel{(34)}{=} 2 V_L \left(\frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} \right) \frac{\partial V_L}{\partial n} \\ &\stackrel{(45)}{\Rightarrow} \frac{\partial Q_L}{\partial n} = 2 \frac{\sum_{k=1}^N Q_k}{V_L} \frac{\partial V_L}{\partial n} \stackrel{(51)}{=} \frac{2 \sum_{k=1}^N Q_k}{V_L} \left[-\frac{V_L \sum_{k=1}^N Q_k^2}{\sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n Q_k^2)} \right]. \end{aligned} \quad (62)$$

Substituindo as Equações (56) e (62) no último termo da Equação (60), tem-se que

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\partial Q_i}{\partial n} - \frac{1}{N} \frac{\partial Q_L}{\partial n} \right) &= -\frac{Q_i^2}{(V_0 - V_L)} - \frac{\sum_{k=1}^N Q_k^2}{(V_0 - V_L)} \left[\frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n Q_i^2}{\sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n Q_k^2)} \right] \\
&\quad - \frac{2 \sum_{k=1}^N Q_k}{N} \left[-\frac{\sum_{k=1}^N Q_k^2}{\sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n Q_k^2)} \right] \\
&\stackrel{(57)}{\Rightarrow} \left(\frac{\partial Q_i}{\partial n} - \frac{1}{N} \frac{\partial Q_L}{\partial n} \right) = -\frac{Q_i^2}{(V_0 - V_L)} - \left[\frac{\sum_{k=1}^N Q_k^2}{\sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n Q_k^2)} \right] \\
&\quad \cdot \left[\frac{(V_0 - 2V_L) Q_i - n Q_i^2}{(V_0 - V_L)} - 2 Q_m \right] \\
\Rightarrow \left(\frac{\partial Q_i}{\partial n} - \frac{1}{N} \frac{\partial Q_L}{\partial n} \right) &= \frac{1}{(V_0 - V_L) \sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n Q_k^2)} \left\{ -Q_i^2 \sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n Q_k^2) \right. \\
&\quad \left. - \left[\sum_{k=1}^N Q_k^2 \right] [(V_0 - 2V_L) Q_i - n Q_i^2 - 2 Q_m (V_0 - V_L)] \right\}.
\end{aligned}$$

O numerador da equação acima pode ser simplificado desenvolvendo as expressões conforme a seguir:

$$\begin{aligned}
&-V_0 Q_i^2 \sum_{k=1}^N Q_k - n Q_i^2 \sum_{k=1}^N Q_k^2 - Q_i (V_0 - 2V_L) \sum_{k=1}^N Q_k^2 + \\
&\quad + n Q_i^2 \sum_{k=1}^N Q_k^2 + 2 Q_m (V_0 - V_L) \sum_{k=1}^N Q_k^2 \\
&= V_0 Q_i \sum_{k=1}^N Q_k^2 - V_0 Q_i^2 \sum_{k=1}^N Q_k - 2 (V_0 - V_L) (Q_i - Q_m) \sum_{k=1}^N Q_k^2 \\
&= V_0 Q_i \left(\sum_{k=1}^N Q_k^2 - Q_i \sum_{k=1}^N Q_k \right) - 2 (V_0 - V_L) (Q_i - Q_m) \sum_{k=1}^N Q_k^2.
\end{aligned}$$

Portanto, pode-se escrever que:

$$\left(\frac{\partial Q_i}{\partial n} - \frac{1}{N} \frac{\partial Q_L}{\partial n} \right) = \frac{V_0 Q_i \left(\sum_{k=1}^N Q_k^2 - Q_i \sum_{k=1}^N Q_k \right) - 2 (V_0 - V_L) (Q_i - Q_m) \sum_{k=1}^N Q_k^2}{(V_0 - V_L) \sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n Q_k^2)} \quad (63)$$

Para obter a expressão (60), basta multiplicar a Equação (63) por $(Q_i - Q_m)$:

$$(Q_i - Q_m) \left(\frac{\partial Q_i}{\partial n} - \frac{1}{N} \frac{\partial Q_L}{\partial n} \right) = \frac{V_0 Q_i (Q_i - Q_m) \left(\sum_{k=1}^N Q_k^2 - Q_i \sum_{k=1}^N Q_k \right) - 2 (V_0 - V_L) (Q_i - Q_m)^2 \sum_{k=1}^N Q_k^2}{(V_0 - V_L) \sum_{k=1}^N (V_0 Q_k + n Q_k^2)} \quad (64)$$

Para a obtenção da expressão (61) basta somar os termos da expressão acima, com o índice i variando de 1 a N . O denominador desses termos é constante em relação a i , de modo que pode ser colocado em evidência, aplicando-se o somatório somente ao numerador. Além disso, o denominador é sempre positivo, uma vez que $V_0 > V_L$ e o seu termo de somatório também é sempre positivo, conforme já discutido. Dessa forma, a análise do sinal da Equação (61) pode ser realizada somente avaliando o sinal de seu numerador. Para representação deste último, adota-se a notação $Num[\]$, conforme o desenvolvimento a seguir:

$$\begin{aligned} Num \left[\sum_{i=1}^N (Q_i - Q_m) \left(\frac{\partial Q_i}{\partial n} - \frac{1}{N} \frac{\partial Q_L}{\partial n} \right) \right] &= \\ &\stackrel{(57)}{=} \sum_{i=1}^N \left[V_0 Q_i (Q_i - Q_m) \sum_{k=1}^N Q_k^2 \right] - \sum_{i=1}^N [V_0 N Q_m Q_i^2 (Q_i - Q_m)] \\ &\quad - \sum_{i=1}^N \left[2 (V_0 - V_L) (Q_i - Q_m)^2 \sum_{k=1}^N Q_k^2 \right]. \end{aligned}$$

Colocando em evidência os termos constantes com relação a i , tem-se que:

$$\begin{aligned} Num \left[\sum_{i=1}^N (Q_i - Q_m) \left(\frac{\partial Q_i}{\partial n} - \frac{1}{N} \frac{\partial Q_L}{\partial n} \right) \right] &= \\ &= V_0 \left[\sum_{k=1}^N Q_k^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N Q_i (Q_i - Q_m) \right] - V_0 N Q_m \left[\sum_{i=1}^N Q_i^2 (Q_i - Q_m) \right] \\ &\quad - 2 (V_0 - V_L) \left[\sum_{k=1}^N Q_k^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N (Q_i - Q_m)^2 \right]. \end{aligned}$$

Os somatórios envolvendo i de cada um dos 3 termos dessa equação podem ser desenvolvidos conforme abaixo, de onde se nota que o primeiro e o terceiro são iguais.

$$\bullet \sum_{i=1}^N Q_i (Q_i - Q_m) = \sum_{i=1}^N Q_i^2 - \underbrace{Q_m \sum_{i=1}^N Q_i}_{NQ_m} = \sum_{i=1}^N Q_i^2 - N Q_m^2 ;$$

$$\begin{aligned}
& \bullet \sum_{i=1}^N Q_i^2 (Q_i - Q_m) = \sum_{i=1}^N Q_i^3 - Q_m \sum_{i=1}^N Q_i^2 ; \\
& \bullet \sum_{i=1}^N (Q_i - Q_m)^2 = \sum_{i=1}^N Q_i^2 - 2 Q_m \underbrace{\sum_{i=1}^N Q_i}_{N Q_m} + \underbrace{\sum_{i=1}^N Q_m^2}_{N Q_m^2} = \sum_{i=1}^N Q_i^2 - N Q_m^2 .
\end{aligned}$$

Substituindo as expressões encontradas na equação do numerador, tem-se que

$$\begin{aligned}
Num \left[\sum_{i=1}^N (Q_i - Q_m) \left(\frac{\partial Q_i}{\partial n} - \frac{1}{N} \frac{\partial Q_L}{\partial n} \right) \right] = \\
= V_0 \left[\sum_{k=1}^N Q_k^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N Q_i^2 - N Q_m^2 \right] - V_0 N Q_m \left[\sum_{i=1}^N Q_i^3 - Q_m \sum_{i=1}^N Q_i^2 \right] \\
- 2 (V_0 - V_L) \left[\sum_{k=1}^N Q_k^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N Q_i^2 - N Q_m^2 \right] .
\end{aligned}$$

Na expressão simplificada acima, os termos dos somatórios envolvem apenas a variável de seu próprio índice, de forma que o nome da letra é irrelevante e se pode padronizar todos os índices para a letra k , ou seja

$$\sum_{i=1}^N Q_i^2 = \sum_{k=1}^N Q_k^2 \quad ; \text{ e } \quad \sum_{i=1}^N Q_i^3 = \sum_{k=1}^N Q_k^3 . \quad (65)$$

Desse modo, pode-se continuar o desenvolvimento da expressão do numerador

$$\begin{aligned}
Num \left[\sum_{i=1}^N (Q_i - Q_m) \left(\frac{\partial Q_i}{\partial n} - \frac{1}{N} \frac{\partial Q_L}{\partial n} \right) \right] = \\
= V_0 \left[\sum_{k=1}^N Q_k^2 \right]^2 - V_0 N Q_m^2 \sum_{k=1}^N Q_k^2 - V_0 N Q_m \sum_{k=1}^N Q_k^3 + V_0 N Q_m^2 \sum_{k=1}^N Q_k^2 \\
- 2 (V_0 - V_L) \left[\sum_{k=1}^N Q_k^2 \right] \left[\sum_{k=1}^N Q_k^2 - N Q_m^2 \right] \\
\Rightarrow Num \left[\sum_{i=1}^N (Q_i - Q_m) \left(\frac{\partial Q_i}{\partial n} - \frac{1}{N} \frac{\partial Q_L}{\partial n} \right) \right] = \\
= 2 (V_0 - V_L) \left(\sum_{k=1}^N Q_k^2 \right) \left[N Q_m^2 - \sum_{k=1}^N Q_k^2 \right] + V_0 \left[\left(\sum_{k=1}^N Q_k^2 \right)^2 - N Q_m \sum_{k=1}^N Q_k^3 \right] . \quad (66)
\end{aligned}$$

Para analisar o sinal da equação obtida, bastará analisar o sinal das expressões entre colchetes, uma vez que $V_0 > 0$, $V_0 - V_L > 0$ e $\sum_{k=1}^N Q_k^2 > 0$. Como demonstrado a seguir, ambas as expressões destacadas são negativas.

$$(i) \quad N Q_m^2 - \sum_{k=1}^N Q_k^2 \stackrel{(57)}{=} \frac{\left(\sum_{k=1}^N Q_k\right)^2}{N} - \sum_{k=1}^N Q_k^2 = \frac{\left(\sum_{k=1}^N Q_k\right)^2 - N \sum_{k=1}^N Q_k^2}{N} \quad (67)$$

A desigualdade de Cauchy - Schwarz, expressa em termos vetoriais, garante para dois vetores $\mathbf{u}$ e $\mathbf{v}$ quaisquer de um espaço vetorial dotado de produto interno que

$$\langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle^2 \leq \langle \mathbf{u}, \mathbf{u} \rangle \langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle. \quad (68)$$

Escolhendo os vetores: $\begin{cases} \mathbf{u} = (Q_1, Q_2, \dots, Q_k, \dots, Q_N) \\ \mathbf{v} = (1, 1, \dots, 1, \dots, 1) \end{cases}$ tem-se que

$$\left(\sum_{k=1}^N Q_k\right)^2 \leq \left(\sum_{k=1}^N Q_k^2\right) \left(\sum_{k=1}^N 1^2\right) \Rightarrow \left(\sum_{k=1}^N Q_k\right)^2 \leq N \sum_{k=1}^N Q_k^2.$$

Como $\mathbf{u}$ e $\mathbf{v}$ são linearmente independentes, vale a desigualdade, de modo que

$$\left(\sum_{k=1}^N Q_k\right)^2 - N \sum_{k=1}^N Q_k^2 < 0.$$

Voltando à expressão (67), conclui-se que o primeiro dos termos da Equação (66) é negativo. Basta agora analisar o outro termo, dessa vez por meio do desenvolvimento de produtos de somatórios, expressando-os como somatórios duplos.

$$\begin{aligned} (ii) \quad \left(\sum_{k=1}^N Q_k^2\right)^2 - \underbrace{N Q_m}_{\sum_{k=1}^N Q_k} \sum_{k=1}^N Q_k^3 &= \left(\sum_{k=1}^N Q_k^2\right) \left(\sum_{k=1}^N Q_k^2\right) - \left(\sum_{k=1}^N Q_k\right) \left(\sum_{k=1}^N Q_k^3\right) = \\ &= \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N Q_k^2 Q_j^2 - \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N Q_k Q_j^3 = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N Q_k Q_j^2 (Q_k - Q_j) \quad (69) \end{aligned}$$

É evidente que os termos para os quais $k = j$ são nulos, restando como termos não nulos do somatório aqueles em que $k \neq j$, que perfazem um total de $N^2 - N$ termos. Esses elementos não nulos podem ser agrupados aos pares, tendo entre si complementaridade de índices. Sejam a e b dois inteiros pertencentes ao conjunto $\{1, 2, \dots, N\}$, com $a \neq b$. Para cada termo do somatório com $k = a$ e $j = b$ existe um termo com $k = b$ e $j = a$. A soma desses dois termos é

$$\begin{aligned} Q_a Q_b^2 (Q_a - Q_b) + Q_b Q_a^2 (Q_b - Q_a) &= Q_a Q_b (Q_a Q_b - Q_b^2 + Q_a Q_b - Q_a^2) = \\ &= -Q_a Q_b (Q_a^2 - 2 Q_a Q_b + Q_b^2) = -Q_a Q_b (Q_a - Q_b)^2 < 0. \quad (70) \end{aligned}$$

Existem ao total $\frac{N(N-1)}{2}$ possibilidades de pares (a, b) que correspondem a pares de termos tal como expressos acima, perfazendo o total de elementos não nulos do somatório. Dessa forma, como cada par tem soma negativa, pode-se concluir que

$$\left(\sum_{k=1}^N Q_k^2 \right)^2 - \sum_{k=1}^N Q_k \sum_{k=1}^N Q_k^3 < 0. \quad (71)$$

Demonstra-se, portanto, que a expressão (66) tem sempre sinal negativo, e que, voltando à Equação (61), o aumento de n provoca aproximação dos valores de Q em relação à sua média.

$$\boxed{\frac{\partial \sigma^2}{\partial n} < 0}. \quad (72)$$

Com isso, fica demonstrada a generalidade dos comportamentos observados em simulação para uma microrrede de topologia simplificada, com impedâncias de acoplamento puramente indutivas, e N conversores cujas retas *droop* estejam expressas no formato preconizado pela Equação (44). Embora não garantam que o mesmo aconteça para situações mais genéricas, cujo desenvolvimento analítico pode ser demasiado complexo, essas demonstrações pelo menos indicam que possa existir algo inerente à matemática dos sistemas analisados que provoque esses comportamentos de variação de potência reativa em relação a n de maneira consistente. Isso corrobora o que já se conhece sobre os efeitos do aumento de n , considerando coeficientes iguais entre si (ou proporcionais), que provoca melhora no compartilhamento de potência reativa ao custo de piorar os níveis de tensão.

Em contrapartida, a possibilidade de utilização de inclinações *droop* distintas (ou desproporcionais) abre espaço para novas discussões a respeito do problema de compartilhamento de potência, uma vez que é possível realizar uma escolha adequada dos coeficientes de inclinação que, de certa forma, compense as assimetrias entre as impedâncias de acoplamento, atingindo-se, idealmente, um compartilhamento perfeito. Encontrar essa solução para um sistema simples, com apenas dois conversores, é uma tarefa relativamente fácil, bastando para isso realizar perturbações nos coeficientes de cada conversor, separadamente, buscando o ponto de igualdade (ou proporcionalidade) entre as potências reativas. A questão que remanesce é como realizar esse processo para uma microrrede qualquer, com uma topologia genérica, vários conversores e ainda, de preferência, prescindindo de qualquer sistema de comunicação entre eles.

Embora não seja mérito deste trabalho responder diretamente essa pergunta, mas apenas tê-la formulado, a questão fomentou a busca por metodologias baseadas na perturbação de parâmetros, as quais pudessem orientar, simultaneamente à operação do sistema, alguma mudança paramétrica que o encaminhasse para uma melhora no compartilhamento de potência reativa. Pelo menos um método como esse já existia e é à discussão dele, sob o novo olhar teórico desenvolvido, que se dedica a próxima seção, bem como o restante do trabalho, propondo-se ao longo do caminho extensões e variantes dessa metodologia.

2.3 O MÉTODO DE CORREÇÃO DO COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA A PARTIR DA PERTURBAÇÃO DE n

Conforme discutido na seção anterior, a variação dos coeficientes de inclinação provoca mudanças bastante características no compartilhamento de potência, de forma que é possível utilizar as medições de potência locais de cada conversor para, a partir da perturbação de n , realizar modificações no controle *droop* visando melhorar o compartilhamento de potência sem grandes prejuízos para os níveis de tensão. Essa ideia, originalmente proposta por Wu, Zhang e Zhan (2023), permite que seja atingido um bom compartilhamento de potência sem que seja necessário alterar permanentemente o valor de n , ao custo de adicionar um termo na equação do controle por inclinação. A obtenção desse termo de correção envolve o cálculo de uma impedância virtual, a cada passo da perturbação paramétrica, a qual multiplica a corrente entregue pelo conversor para produzir um termo de tensão virtual, responsável pelo ajuste do compartilhamento. Embora essa ideia funcione bem, conforme apresentado pelos próprios autores e conforme se verifica no próximo capítulo, alguns aspectos da formulação original carecem de melhorias; certos conceitos podem ser reinterpretados; e algumas extensões precisam ser feitas a fim de que se possa generalizar a ideia original, inclusive propondo variações dela.

O princípio de funcionamento dessa metodologia reside no fato de que o aumento simultâneo dos coeficientes n provoca aproximação entre os valores de potência reativa entregue pelos conversores, e vice-versa. Pensando em termos de variação em relação à média das potências, para os conversores cuja potência reativa é maior que a potência média, ocorre diminuição de Q , e para os que têm potência menor que a média, ocorre aumento. Armazenando-se os valores medidos antes e depois do aumento de n , cada conversor detecta se houve diminuição ou aumento em sua potência reativa. Caso ocorra diminuição, isso significa que o conversor entrega potência em excesso, de modo que a tensão produzida pelo seu *droop* deverá ser diminuída, subtraindo-se um termo de tensão virtual; caso contrário, deve-se aumentar a tensão produzida, adicionando-se tensão virtual. Inerentemente a esse processo, ocorrerá uma queda de tensão, por conta do aumento de n , de forma que faz-se uso de um segundo passo, que visa restaurar as tensões do sistema a um estado próximo do original, desfazendo o aumento de n . Nessa etapa, a situação se inverte, ocorrendo afastamento entre os valores de Q , de forma que a lógica para decidir sobre o sinal da tensão virtual a ser adicionada à equação *droop* é inversa à do passo anterior. Dessa forma, em ambas as etapas, dos *droops* dos conversores que estão entregando potência acima da média será subtraída tensão virtual e aos *droops* dos que estão entregando abaixo da média, será adicionada tensão virtual.

Essa sequência de duas etapas, uma de aumento de n e outra de restauração do valor inicial, pode ser repetida um número arbitrário de vezes até que se alcance bom compartilhamento de potência reativa. Originalmente, esse número de repetições do método foi tomado como um número fixo, de forma que, uma vez iniciado o processo, haveria uma repetição das perturbações, acumulando-se os efeitos dos ajustes sobre a impedância virtual apenas pela quantidade de passos

predeterminada, o que não garante que se atinja, de maneira genérica, o bom compartilhamento de potência, uma vez que microrredes distintas, ou até mesmo uma mesma microrrede operando sob condições distintas, necessitariam de uma quantidade diferente de passos. Uma das propostas deste trabalho é estender a aplicação desse método a uma situação genérica, em que não há um número definido de passos, de forma que a execução continua até que se identifique que a potência reativa está bem compartilhada. Dessa e de outras extensões trata o Capítulo 3. Antes, porém, é importante compreender melhor o funcionamento do método de correção do compartilhamento de potência reativa a partir da perturbação de n , utilizando mais uma vez como exemplo didático a microrrede com dois conversores introduzida no final da Seção 2.1.

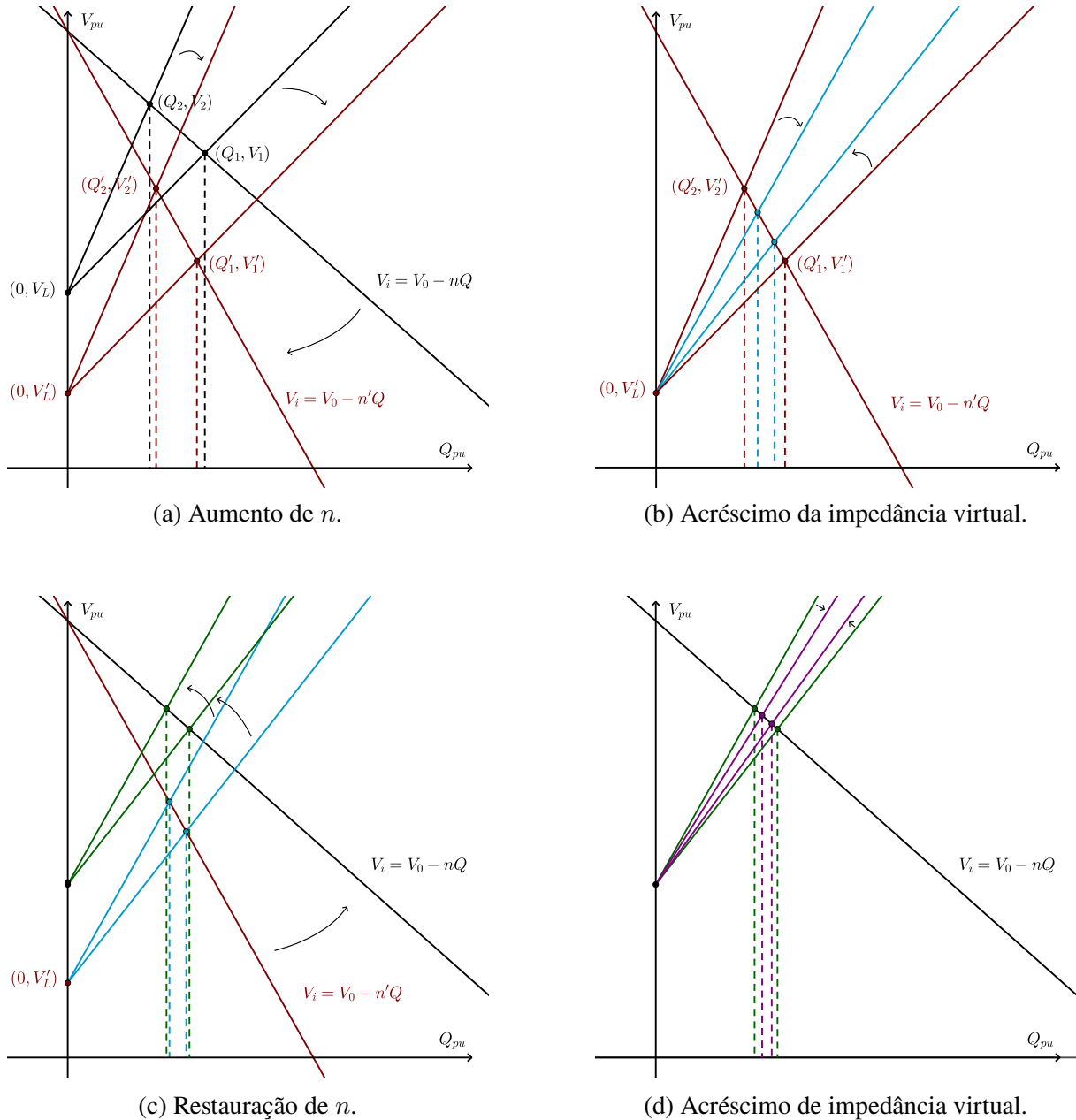
A Figura 19 ilustra as etapas do método para esse caso simples, sendo cada etapa dividida em duas sub-etapas: o efeito da perturbação de n , a partir do qual se calcula a impedância virtual a ser adicionada; e o efeito da adição dessa impedância virtual. Graficamente é interessante discutir esses efeitos em termos da adição de impedância virtual, ao invés da tensão virtual, utilizada no início da argumentação, uma vez que o valor dela está sujeito à variação da corrente entregue pelo conversor. Originalmente, em Wu, Zhang e Zhan (2023), foi utilizado somente o conceito de impedância virtual, interpretando seu efeito como o da adição de uma reatância pura. Na verdade, o termo virtual calculado a partir da variação de n tem a característica de uma impedância com resistência e reatância, conforme ficará claro posteriormente. A despeito disso, as figuras mostradas são suficientes para a compreensão do princípio de funcionamento dessa metodologia e auxiliam no entendimento da equação do *droop* modificada e das equações de cálculo da impedância virtual, enunciadas a seguir.

$$\left\{ \begin{array}{l} V = V_0 - n Q - Z_v I , \\ Z_v = \sum_{s=1}^{2C} \Delta Z_{v,s} , \\ \Delta Z_{v,s} = k h \Delta Q_{n,s} . \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (73) \\ (74) \\ (75) \end{array}$$

O índice s indica o passo de perturbação de n correspondente ao termo calculado. Considerando que se inicia o processo com um aumento dessa variável a partir de seu valor original, os passos com valor de s ímpar são sempre referentes a aumentos de n e os com valor par, referentes a diminuições de n . Esse processo de aumento e restauração de n pode ser repetido arbitrariamente, assumindo-se na Equação (74) um número C de ciclos completos de perturbação de n . No contexto do exemplo didático, pode-se dizer que o conversor 1 está eletricamente mais próximo da carga que o 2, uma vez que tem impedância de acoplamento menor, conforme os dados da Tabela 1, já utilizados anteriormente. Isso se reflete no fato de que o conversor 1 contribui com mais potência reativa para suprir a carga, constituindo justamente o desequilíbrio que se objetiva resolver. Após o aumento de ambos os coeficientes n , conforme mostra a Figura 19a, o valor de Q_1 diminui e o de Q_2 aumenta, tal como já discutido na seção anterior. Essas variações de potência reativa devidas à variação de n são utilizadas na Equação

(75) para o cálculo do acréscimo de impedância virtual a ser adicionado a cada conversor. Na dita equação, o valor h corresponde a uma constante de proporcionalidade e o valor de k , a um valor que se alterna, valendo -1 quando n está no estado aumentado, e 1 quando está no estado original.

Figura 19 – Ilustração do princípio de funcionamento do método de correção do compartilhamento de potência reativa a partir da perturbação de n .



Fonte: O autor (2024).

Esse valor é, portanto, imprescindível para que se garanta que sempre haja adição de impedância para o conversor com impedância menor e diminuição da impedância equivalente para o conversor com impedância originalmente maior. Por exemplo, ainda na situação da Figura 19a, a variação negativa de Q para o conversor 1 implica em um resultado positivo na Equação (75), uma vez que $k = -1$, o que se reflete em uma queda de tensão na Equação (73), a qual pode ser interpretada como um acréscimo de impedância. Analogamente, para o conversor

2, ocorre o contrário, de modo que se tem um decréscimo de impedância e, portanto, um ganho de tensão na equação do *droop*.

Lembrando que as retas características mostradas nas figuras têm coeficiente de inclinação proporcional à reatância da linha, conforme a Equação (28), e interpretando as impedâncias virtuais como se fossem reatâncias puras, pode-se dizer que há uma aproximação entre as retas características, decorrente dos termos de impedância virtual, conforme mostra a Figura 19b, o que se traduz numa aproximação dos valores de Q . Explicada a etapa de aumento de n , a etapa de restauração, ilustrada nas Figuras 19c e 19d pode ser entendida analogamente e, de fato, produz, para cada conversor, variações de impedância virtual de mesmo sinal, bastando atentar para o fato de que a inversão dos sinais das variações de Q é compensada pela inversão do sinal de k , que agora passa a valer 1.

Uma vez entendido o princípio básico da metodologia estudada, é importante atentar para alguns pormenores não explicitados por Wu, Zhang e Zhan (2023). Por exemplo, não foi explicitado qual a natureza do valor de corrente do conversor utilizado na Equação (73). Como a equação *droop* envolve amplitudes de tensão e o próprio Q também não é um valor instantâneo, admite-se que essa corrente seja também uma amplitude, ou um valor *rms*. Em outras palavras, se está dizendo que a equação do *droop* tem um sentido de regime permanente, relacionando informações sobre os pontos de operação do sistema e não sobre o caminho transitório entre esses pontos, embora também seja válida e utilizada durante esses transitórios. Sob esse ponto de vista, a equação adquire uma conotação um tanto estranha, uma vez que não se pode simplesmente somar as amplitudes de fasores sem a devida atenção a suas aberturas angulares. Analisando a equação em regime permanente, se o valor absoluto do termo $Z_v I_{rms}$ representa o módulo de um fasor, a magnitude de uma tensão virtual, a única possibilidade de a Equação (73) ser válida é se o argumento do termo de tensão virtual for idêntico ao argumento da tensão $V' = V_0 - nQ$, e, por consequência, igual ao argumento de V resultante. Esse fato impõe uma restrição sobre a natureza da impedância virtual, não podendo ser arbitrada como puramente indutiva ou resistiva, uma vez que seu número complexo deverá ter um argumento específico, conforme mostra a equação abaixo, escrita para o i -ésimo conversor de uma dada microrrede.

$$\arg(\mathbf{V}_i) = \arg(\mathbf{Z}_{v,i} \mathbf{I}_i) \Rightarrow \arg(\mathbf{Z}_{v,i}) = \arg(\mathbf{V}_i) - \arg(\mathbf{I}_i) . \quad (76)$$

Ora, o ângulo expresso nessa equação é justamente o mesmo ângulo que relaciona as potências ativa e reativa entregues pelo conversor, o que decorre da própria definição da potência complexa.

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_i = \mathbf{V}_i \mathbf{I}_i^* &\Rightarrow \arg(\mathbf{S}_i) = \arg(\mathbf{V}_i) + \arg(\mathbf{I}_i^*) = \arg(\mathbf{V}_i) - \arg(\mathbf{I}_i) \\ &\stackrel{(76)}{\Rightarrow} \boxed{\arg(\mathbf{Z}_{v,i}) = \arg(\mathbf{S}_i)} . \end{aligned} \quad (77)$$

Sendo assim, claramente a impedância virtual deverá ter um parcela resistiva e outra

indutiva, uma vez que os conversores entregam tanto potência ativa quanto reativa. Além disso, supondo que se atinja, como resultado da aplicação do método, compartilhamento de potência ativa e reativa perfeitos, os fatores das potências entregues pelos conversores serão todos iguais, mesmo no caso em que eles tenham potências nominais distintas, de modo que os argumentos das impedâncias virtuais deverão ser todos iguais. A conclusão a que se chegou sobre a natureza da impedância virtual praticamente invalida a interpretação gráfica da Figura 19, mesmo para o caso em que as impedâncias de acoplamento são puramente indutivas, pois não se poderia interpretar a adição da impedância virtual somente como uma mudança de inclinação nas retas, e, uma vez presente uma parcela resistiva, virtual ou não, o equacionamento das retas características em função somente de Q e V fica comprometido. Por isso foi dito anteriormente que as figuras têm uma qualidade de ilustração, não representando de fato o que acontece no circuito.

Outro detalhe que precisa ser abordado é o da escolha da constante de proporcionalidade h , que é de importância crítica para o correto funcionamento da metodologia. Se escolhido um valor muito pequeno, as variações de impedância virtual serão pequenas, de modo que seria necessário um grande número de passos para que se atingisse bom compartilhamento de potência. Em contrapartida, se escolhido grande demais, há o risco de que uma dada adição de impedância virtual acabe sendo excessiva, e inverta a situação de desbalanceamento de potência entre os conversores, com o conversor que estava entregando potência em excesso passando a entregar em falta e vice-versa. Isso poderia ser interpretado, a título de ilustração, como uma inversão da posição original das retas características na Figura 19b.

Além disso, sobre aspectos transitórios da aplicação da metodologia, é importante deixar claro que, embora esse método não necessite de comunicação entre conversores, uma vez que cada um é capaz de identificar, a partir de suas medições de potência, a variação de impedância virtual a ser calculada, é necessário que todos os coeficientes *droop* oscilem em conjunto. Isso implica a necessidade de sincronizar os relógios dos conversores, estabelecendo também um igual tempo de permanência tanto no valor original de n quanto no valor aumentado. Esses tempos entre oscilações de n devem ser suficientes para que o sistema entre em regime permanente e possa haver o registro correto dos valores de Q para cálculo das impedâncias. Conforme já discutido na Seção 2.1, os tempos transitórios podem ser ajustados para essa finalidade com uma escolha adequada dos valores de m e n , respeitando os limites de estabilidade.

Essas questões ora levantadas precisam ser investigadas em mais detalhes, a princípio em um contexto de simulação, para que se possa estabelecer, dada uma microrrede qualquer, práticas de implementação e de escolha adequada de parâmetros, ainda que de maneira empírica, para o método de correção de compartilhamento de potência estudado. Na ausência de uma nomenclatura previamente designada por seus autores originais, esse método será doravante denominado por método QZ, em referência à correção do compartilhamento de potência reativa a partir da adição dos termos de Z virtual à equação *droop*. Para a realização das discussões levantadas bem como para a proposição de extensões e variações do método QZ, se destina o Capítulo 3.

3 INVESTIGAÇÕES E PROPOSIÇÕES PARA O MÉTODO DE CORREÇÃO DE COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA E SUAS VARIANTES

Conforme já discutido na Seção 2.3, o artigo de Wu, Zhang e Zhan (2023) propõe uma ideia bastante valiosa para a solução do problema de compartilhamento de potência a partir da perturbação de n , inclusive porque a estratégia utilizada para o cálculo da impedância virtual pode ser adaptada em ideias análogas à desenvolvida, o que é um dos objetos de discussão deste capítulo. Mesmo assim, alguns aspectos da implementação e funcionamento desse método precisam ser melhor investigados para que se possa averiguar se é aplicável também a situações mais genéricas que a mostrada originalmente pelos autores, que é a de uma microrrede com apenas dois conversores, topologia com carga concentrada e impedâncias de acoplamento puramente indutivas. Cada uma dessas considerações simplificadoras pode ser avaliada separadamente, culminando em uma situação genérica, a ser investigada no Capítulo 4.

Inicialmente, à semelhança do que já se realizou na Seção 2.1, serão apresentadas simulações com linhas puramente resistivas, puramente indutivas e com impedância genérica; ainda em um caso simplificado com dois conversores. Em outro momento, avalia-se o funcionamento do método em uma microrrede com mais de dois conversores, ainda considerando a carga concentrada. Por fim, o método é testado em uma microrrede com topologia genérica, cargas distribuídas e impedâncias de acoplamento genéricas. Além dessas verificações, é necessário investigar quais cuidados devem ser tomados para que se possa executar a metodologia de forma contínua, sem que isso provoque maiores alterações na operação normal da microrrede quando uma situação de compartilhamento de potência satisfatória tiver sido atingida. Essa extensão metodológica elimina a necessidade de determinar a quantidade de perturbações necessárias para que se atinja o objetivo de compartilhamento de potência, a qual, conforme já comentado, seria diferente para cada microrrede analisada.

Em contrapartida, a aplicação contínua do método traz uma preocupação ainda não levantada no que diz respeito à possibilidade de mudança de carga durante os eventos de perturbação, especialmente se consideradas respostas transitórias mais lentas, da ordem de minutos. Por hora, a questão da mudança de carga para esse método foi tratada considerando a sua ocorrência após o término de todos os ciclos de perturbação e recuperação (WU; ZHANG; ZHAN, 2023). Entretanto, assim como em qualquer outra aplicação de engenharia elétrica, é preciso considerar os demais cenários possíveis de um dado evento, especialmente quando se trata de algo imprevisível, como uma mudança de carga ou uma falta, por exemplo. Nesse caso a modificação do nível de carga durante o transitório decorrente da perturbação de n , antes que o valor de Q no estado perturbado seja aquisitado para realização do cálculo da impedância equivalente, pode resultar em uma operação incorreta do método, uma vez que a diferença entre valores de potência reativa incluirá também a diferença decorrente da mudança de carga.

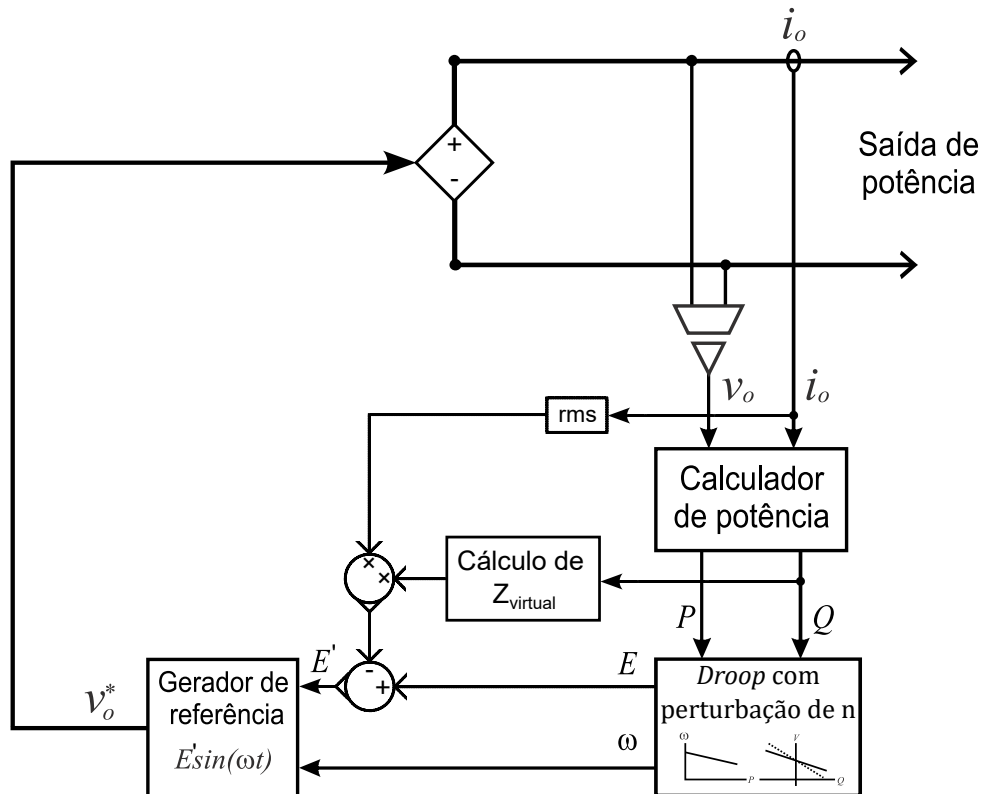
Ao longo do desenvolvimento deste capítulo, as problemáticas levantadas ficam mais

claras à medida em que os resultados de simulação são apresentados, juntamente com as estratégias de implementação metodológica, o que possibilita a proposição de melhorias que visem contornar os problemas encontrados.

3.1 IMPLEMENTAÇÃO E INVESTIGAÇÕES EM SIMULAÇÃO

O circuito utilizado para a simulação do método QZ é derivado do mesmo utilizado nas simulações exemplo da Seção 2.1, adicionando-se somente a modificação no controle *droop* $Q - V$ e o cálculo dos termos de impedância virtual. Os modelos dos conversores continuam simplificados, sendo representados por fontes de tensão controladas. Embora a aplicação do controle por inclinação convencional seja bastante conhecida e de simples elaboração, ainda mais com as simplificações consideradas, é importante que se explicita a maneira como o método foi implementado, dando especial atenção ao cálculo da impedância virtual e à nova definição do coeficiente de inclinação. A Figura 20 ilustra, a partir do diagrama já utilizado na Figura 10, as modificações realizadas no controle dos conversores, as quais consistem, basicamente da adição do termo de tensão virtual no *droop* $Q - V$ e da perturbação de n .

Figura 20 – Controle do conversor com as modificações do método QZ.



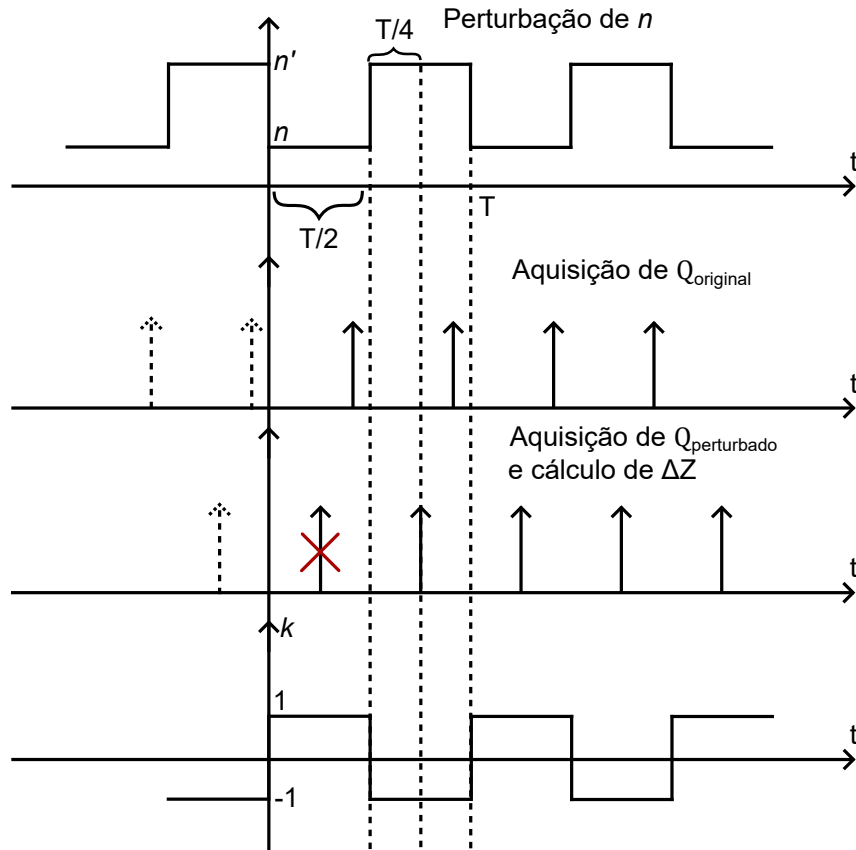
Fonte: O autor (2024).

Para a implementação das perturbações, o coeficiente n , ao invés de possuir um valor fixo, deverá oscilar periodicamente, podendo ser representado como uma onda quadrada com ciclo de trabalho de 50 % e que oscile entre os valores original e aumentado que o coeficiente assume. A essa onda quadrada estão associadas duas outras, cruciais ao processo de cálculo

da impedância virtual e cujos degraus indicarão os instantes em que devem ser armazenados os valores de Q : a primeira deve vir ligeiramente adiantada da onda de n , a fim de indicar os momentos, sejam de subida, sejam de descida, em que se deve armazenar o valor de potência anterior à perturbação; e a segunda deve vir atrasada da onda de n o suficiente para que, quando de suas subidas e descidas, o transitório originado da perturbação já tenha cessado, indicando os momentos em que se deve armazenar os valores de potência pós perturbação. Esta última onda também indica o momento em que se calcula a parcela de impedância virtual a ser adicionada em determinada etapa do método.

Para facilitar a interpretação, uma vez que dessas ondas quadradas auxiliares só interessam os momentos das transições de nível, pode-se representá-las como trens de pulso lógicos, posicionados de acordo com o explicado. A Figura 21 ilustra a onda de perturbação de n , os trens de pulso, e, além disso, a onda que representa o valor da constante k da Equação (75), que, conforme já explicado, deve assumir um valor negativo quando n está no valor aumentado e positivo quando está no valor normal.

Figura 21 – Onda de perturbação de n e lógicas de aquisição de Q .



Fonte: O autor (2024).

Levando em conta que a adição das impedâncias virtuais também causa transitórios na microrrede, os quais devem cessar antes que a próxima mudança de n aconteça, convencionou-se que os pulsos de cálculo de impedância virtual deveriam estar atrasados de $\pi/2$ rad das mudanças de n , permitindo tempos de um quarto do período da onda de perturbação para que os transitórios

cessem. Sendo assim, o projeto desse item do controle, o período da onda de perturbação, tem um compromisso com a escolha dos coeficientes de inclinação das retas *droop*, os quais, conforme argumentado no Capítulo 2, possuem grande influência sobre as características transitórias de resposta da microrrede a uma perturbação. Dessa forma, deve-se escolher um período pelo menos 4 vezes maior que o tempo necessário para que se atinja o regime permanente após uma perturbação de n . É claro que numa situação real pode não ser imediata a simulação das perturbações para obtenção desse tempo, além do que, em geral, não se pode chegar a um "tempo transitório máximo", uma vez que esses fenômenos estão sujeitos a diversos fatores que podem modificar as características da resposta a uma perturbação. O que se pode afirmar, então, como boa prática de implementação, é que o quarto de período da onda de n seja suficientemente maior que o tempo esperado de resposta transitória da microrrede àquela variação específica de n utilizada.

Ao longo deste capítulo, como se trata de uma situação mais idealizada, optou-se por utilizar um período de 4 minutos para a onda de perturbação, ajustando-se o coeficiente m do *droop* $P - \omega$ para que os transitórios sejam menores que 1 minuto. Essa abordagem facilita a interpretação sistemática dos resultados de simulação, uma vez que a cada minuto ocorrerá alguma etapa do processo desenvolvido:

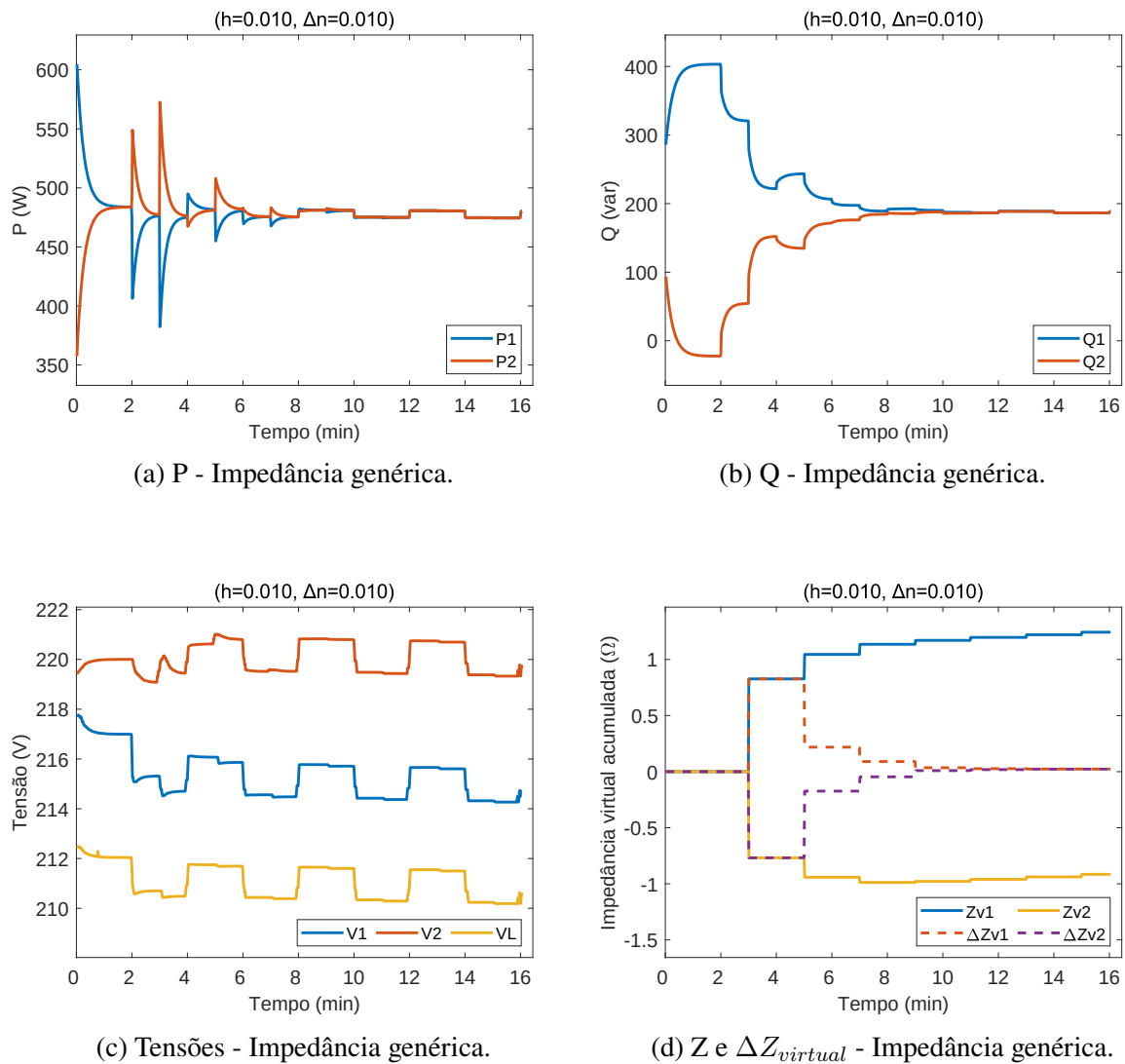
- nos minutos **pares** ocorre registro do valor de Q anterior à perturbação e:
 - ▷ aumento no valor de n , se o minuto deixa resto 2 na divisão por 4;
 - ▷ diminuição no valor de n se o minuto deixa resto 0 na divisão por 4.
- nos minutos **ímpares** ocorre registro do valor de Q posterior ao transitório de perturbação (aumento ou diminuição) e cálculo de $\Delta Z_{virtual}$.

Com essas considerações, foram realizadas simulações com os mesmos parâmetros da Tabela 1, modificando-se apenas o coeficiente m para o valor de 5×10^{-6} , visando a adequação dos tempos transitórios. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 22 a 24. É notável que, independentemente da natureza da impedância da rede, os valores de potência reativa entregues por cada conversor tendem a se igualar, o que significa excelente compartilhamento de potência reativa para uma situação em que os conversores têm potências nominais iguais. No estágio inicial do processo de correção de compartilhamento, é possível notar que a cada minuto, exceto nos múltiplos de 4, que correspondem à etapa de restauração de n , ocorre aproximação entre os valores de Q , seja por conta do aumento de n , seja por conta da adição das impedâncias virtuais. Após a convergência desses valores, as pequenas oscilações que permanecem são somente devidas à perturbação de n , uma vez que as variações de impedância virtual adicionadas passam a ser cada vez menores com o tempo, conforme mostram as Figuras 22d a 24d.

A magnitude dos valores de ΔZ calculados depende também da escolha da constante h e influencia o número de iterações necessárias para que se atinja bom compartilhamento de potência. Por isso, esse valor deve ser ajustado para cada caso a fim de evitar que sejam

necessárias muitas iterações do método. É interessante pontuar que, caso se estivesse aplicando a metodologia na forma original, com um número fixo de iterações a serem realizadas, seria necessário escolher esse número levando em consideração também a escolha de h para que se obtivesse um bom resultado de compartilhamento. Por exemplo, caso fosse escolhido um valor de h relativamente pequeno, seria necessário aumentar o número de iterações. Com a aplicação contínua do método, elimina-se a necessidade de escolha de dois parâmetros, restando apenas a preocupação com o tempo necessário para a conclusão do processo, o que pode ser um critério para o ajuste de h .

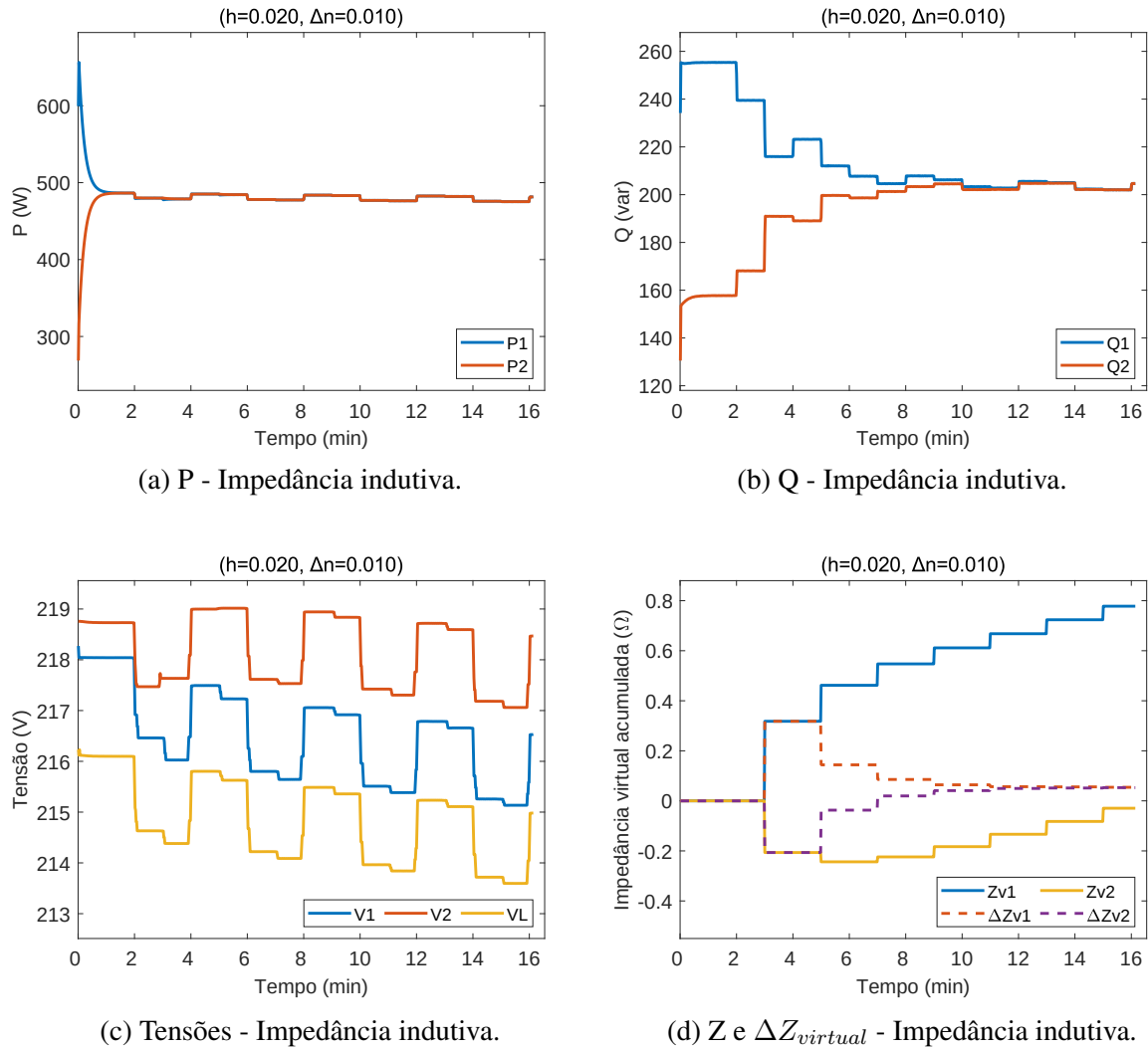
Figura 22 – Resultados da aplicação do método QZ para rede com impedâncias genéricas.



Fonte: O autor (2024).

Sobre os transitórios de P e Q decorrentes das perturbações, nota-se características bastante diferentes para cada caso. Para a rede genérica e para a resistiva, cada modificação resulta em picos transitórios no valor de P enquanto o valor de Q se ajusta ao novo patamar de forma suave, característica que se acentua no caso resistivo. Em contrapartida, para o caso puramente indutivo não ocorrem picos em P e as transições em Q são praticamente instantâneas.

Figura 23 – Resultados da aplicação do método QZ para rede com impedâncias puramente indutivas.



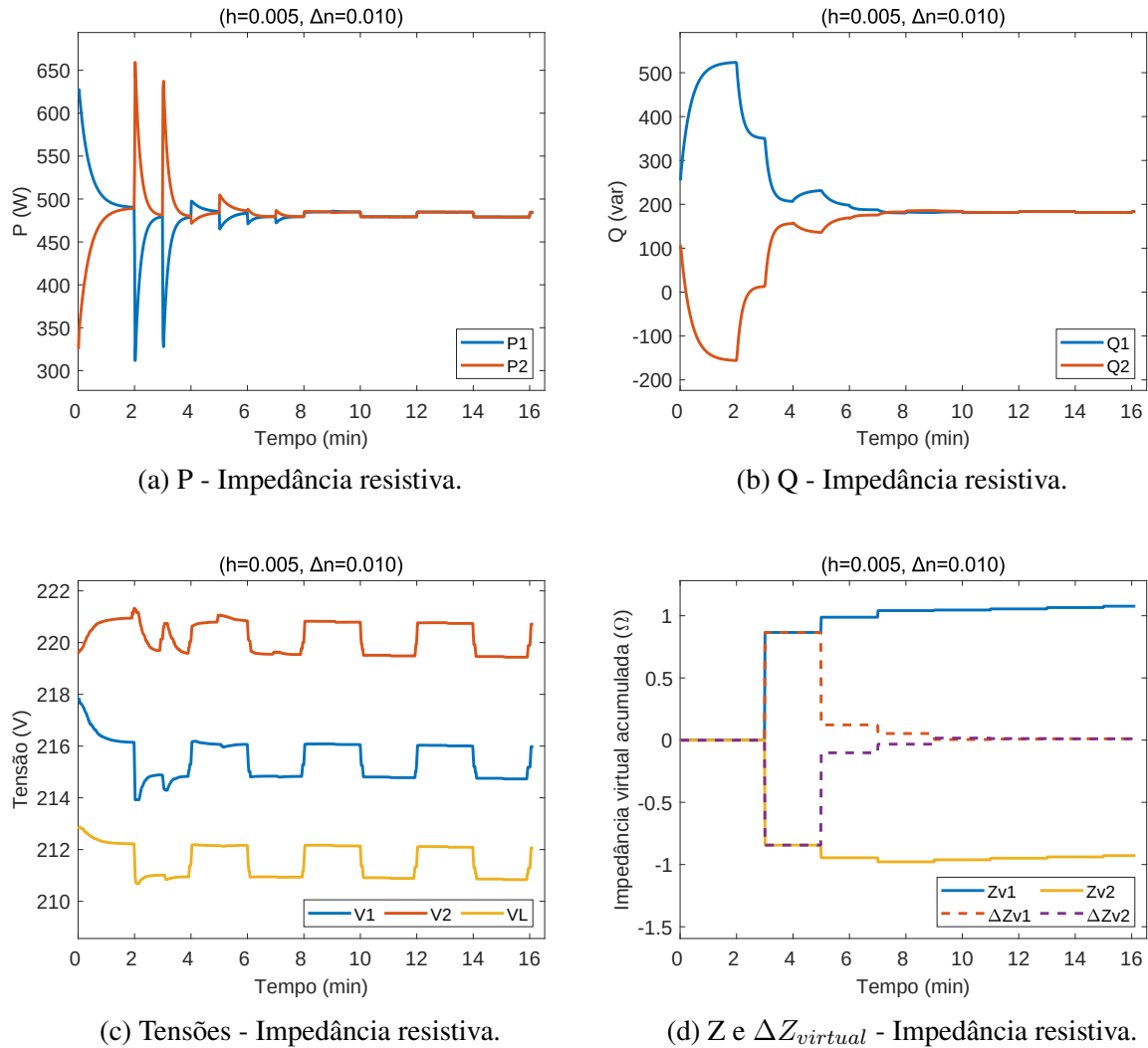
Fonte: O autor (2024).

Na verdade ocorrem transitórios, mas que não são capturados na simulação com o *Typhoon HIL*, uma vez que são menores que o tempo mínimo de atualização dos gráficos, de $250ms$. Esse comportamento pode ser entendido levando em conta que na rede puramente indutiva há desacoplamento entre as variáveis de potência condizente com as características de inclinação $P - \omega$ e $Q - V$ utilizadas, o que não ocorre nos outros casos.

Sobre as características de tensão, já se pode notar que ao longo do processo, após sucessivas perturbações, ocorre queda dos níveis de tensão tanto nos conversores como na carga. Esse fato já havia sido identificado originalmente por Wu, Zhang e Zhan (2023), sendo proposta mais uma modificação ao *droop* $Q - V$ para compensar essas quedas de tensão, algo que não será explorado neste trabalho. Se a metodologia continuar sendo aplicada indefinidamente, essa queda de tensão se tornará severa, de modo que se faz necessário estabelecer um critério de parada para o método, conforme melhor explorado na Seção 3.1.1.

Outra questão a ser levantada é a da adequação da tensão aos padrões de atendimento à

Figura 24 – Resultados da aplicação do método QZ para rede com impedâncias puramente resistivas.



Fonte: O autor (2024).

carga. Como se trata de um método que envolve perturbações, as quais, inerentemente, causam oscilações de tensão, é necessário ter cuidado para que se escolha o valor máximo de n de tal forma que a tensão na carga não fique abaixo de algum limite de operação. Por exemplo, para uma tensão nominal de 220 V, os valores mínimos obtidos nos gráficos, mesmo para os casos em que as quedas de tensão são mais severas, notadamente nos que têm a presença da resistência, são maiores que 210 V, estando ainda acima de 0,95 p.u. da tensão nominal, conforme as Figuras 22c e 24c. Sob o aspecto do conteúdo harmônico das ondas de tensão, as perturbações de n , se realizadas com períodos grandes como os mostrados nas figuras, não devem provocar impactos significativos, sendo esse mais um motivo para não se utilizar períodos de perturbação muito curtos, que implicariam em oscilações mais rápidas na tensão.

Embora a situação simulada seja bastante simples, é suficiente para evidenciar a grande valia desse método para a solução do problema de compartilhamento de potência, uma vez que se consegue atingir praticamente a igualdade entre as potências reativas dos conversores sem

afetar tanto o nível de tensão. No caso mostrado, inclusive, a aplicação de um artifício mais singelo, como o aumento de n provocaria quedas de tensão que certamente violariam limites de operação da carga ainda assim não conseguindo a precisão alcançada com o método baseado na perturbação de n . Resta ainda verificar a validade da metodologia em situações mais genéricas, por exemplo quando há mais de dois conversores e quando as potências nominais deles são distintas. Antes, porém, é importante comentar sobre mais dois aspectos relacionados à escolha de parâmetros, se não para determinar seus valores ótimos, pelo menos para estabelecer boas praticas de dimensionamento: a escolha da variação de n e a escolha de h .

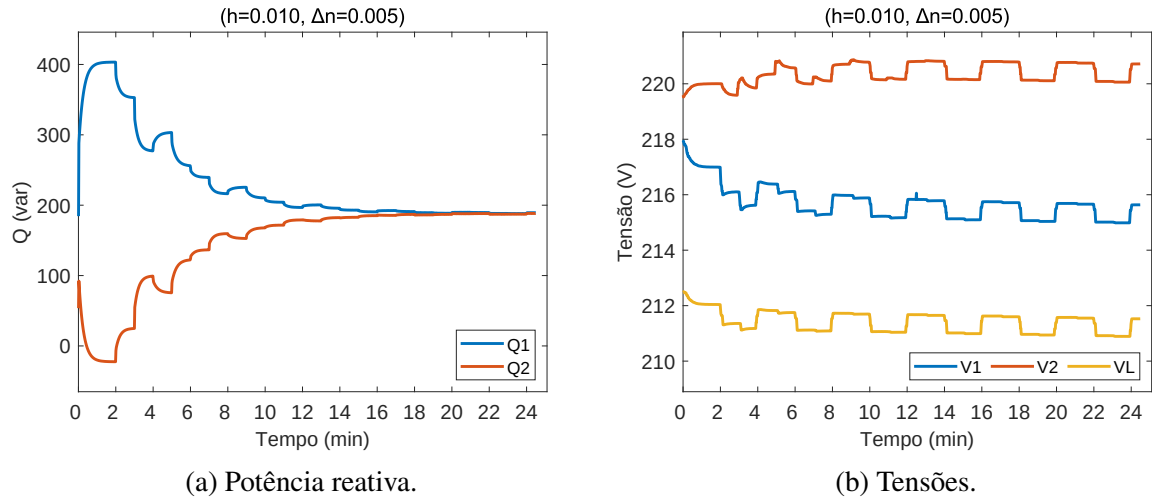
Uma vez escolhido o valor normal de n , existe uma certa liberdade para a escolha do valor aumentado. Quanto maior for esse valor, mais severas serão as perturbações e, de acordo com a Equação (75), maiores serão as diferenças de Q utilizadas no cálculo da impedância virtual. Em geral, é mais adequado ajustar a magnitude desses valores calculados por meio da constante h , uma vez que perturbações maiores provocam maiores quedas de tensão no estado de n aumentado, o que é desnecessário. Sendo assim, pode-se definir o valor de variação de n como o menor possível que ainda permita que as variações de potência sejam detectáveis, sem sofrer prejuízos por ruídos de medição. Com essa prática garante-se que as oscilações de tensão sejam mais brandas, sem comprometer o tempo de resposta da metodologia, uma vez que se pode aumentar o h para compensar a diminuição de Δn .

As Figuras 25 e 26 mostram os efeitos na simulação exemplo com as impedâncias genéricas quando se diminui o valor de Δn pela metade e quando, com esse nova situação de perturbação, o h é dobrado. Conforme explicado, na primeira situação, as oscilações de tensão diminuem, mas o tempo para alcançar o final do processo aumenta consideravelmente, o que é corrigido na segunda situação com o aumento de h . É importante dizer que essa relação entre Δn e h não é, de forma alguma, linear, tanto que no segundo caso a operação foi bem mais rápida que no caso original mostrado na Figura 22.

É importante também observar o efeito na simulação quando se utiliza o valor dobrado de h sem diminuir o Δn , caso analisado na Figura 27. Nessa situação o valor de h é excessivo, fazendo com que as variações de impedância virtual sejam grandes a ponto de ocorrer inversão entre os papéis dos conversores. O que estava entregando potência reativa em excesso passa a entregar menos que o outro e vice-versa. Embora também se chegue ao final do processo, com bom compartilhamento de potência, inclusive em um tempo semelhante ao do caso original mostrado na Figura 22b, a situação submete as variáveis a oscilações desnecessárias, que podem ser evitadas somente utilizando um valor de h mais adequado. Em suma, esse valor não deve ser nem tão pequeno, tal que sejam necessárias muitas etapas do método para que as potências se aproximem, nem tão grande tal que provoque oscilações desnecessárias no sistema.

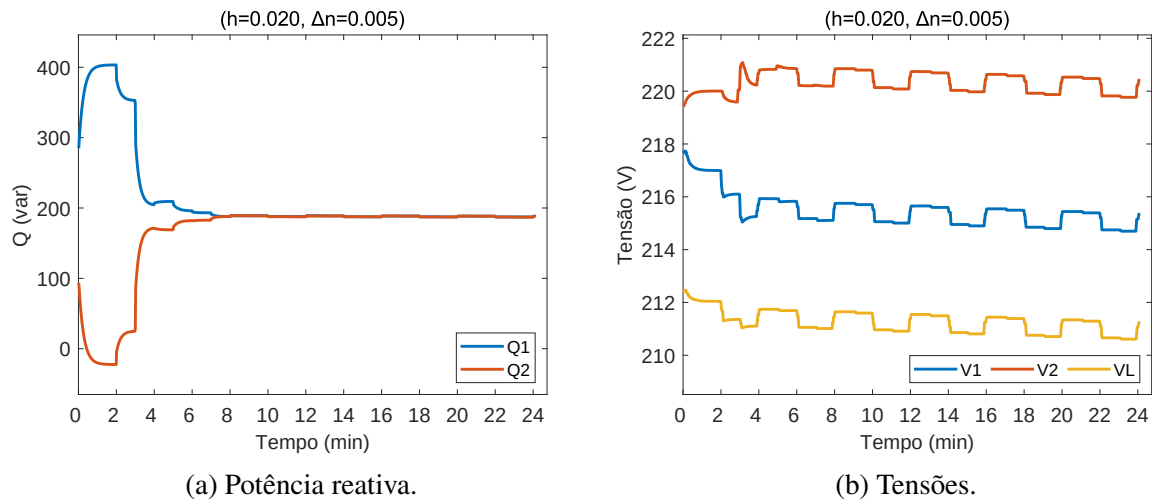
Para a simulação com três conversores, adicionou-se ao circuito utilizado anteriormente uma terceira fonte controlada ligada à carga por uma impedância de acoplamento de valor distinto das demais anteriormente utilizadas. Por conveniência, os parâmetros utilizados são resumidos na Tabela 6. A Figura 28 apresenta os resultados de simulação, mais uma vez atestando o sucesso

Figura 25 – Resultados de Q e V para um caso com menor Δn .



Fonte: O autor (2024).

Figura 26 – Resultados de Q e V para um caso com menor Δn compensado pelo aumento de h .

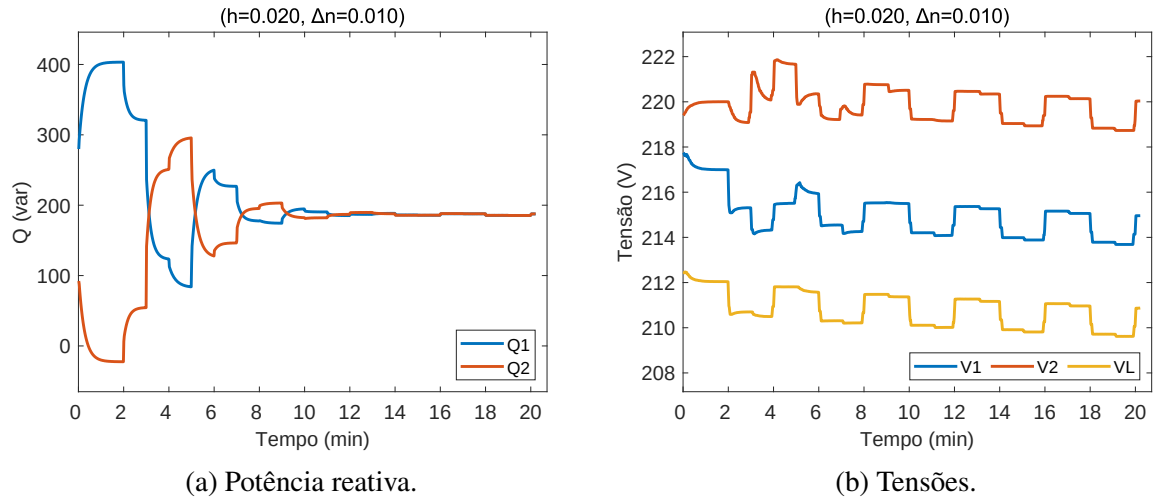


Fonte: O autor (2024).

do método nesse novo caso, já que se pode sair de uma situação de desbalanceamento severo entre as potências reativas, com o conversor 1, que é mais próximo da carga, responsável por grande parte do fornecimento reativo, para uma situação em que os três entregam igual potência, isso sem comprometer demasiadamente o nível de tensão. A potência ativa, conforme esperado, continua sendo bem compartilhada a despeito de quaisquer assimetrias entre as impedâncias da rede.

Finalmente, pode-se também simular um caso em que os conversores tenham potências nominais distintas. Para que se atinja compartilhamento de potência proporcional a essas potências nominais, é necessário atenção ao modificar os parâmetros de controle dos conversores, de acordo com o que foi discutido na Seção 2.2. Por simplicidade didática, na simulação que exemplifica essa situação, o conversor 1 passará a entregar o dobro das potências dos demais conversores, de

Figura 27 – Resultados de Q e V para um caso Δn original e h dobrado.



Fonte: O autor (2024).

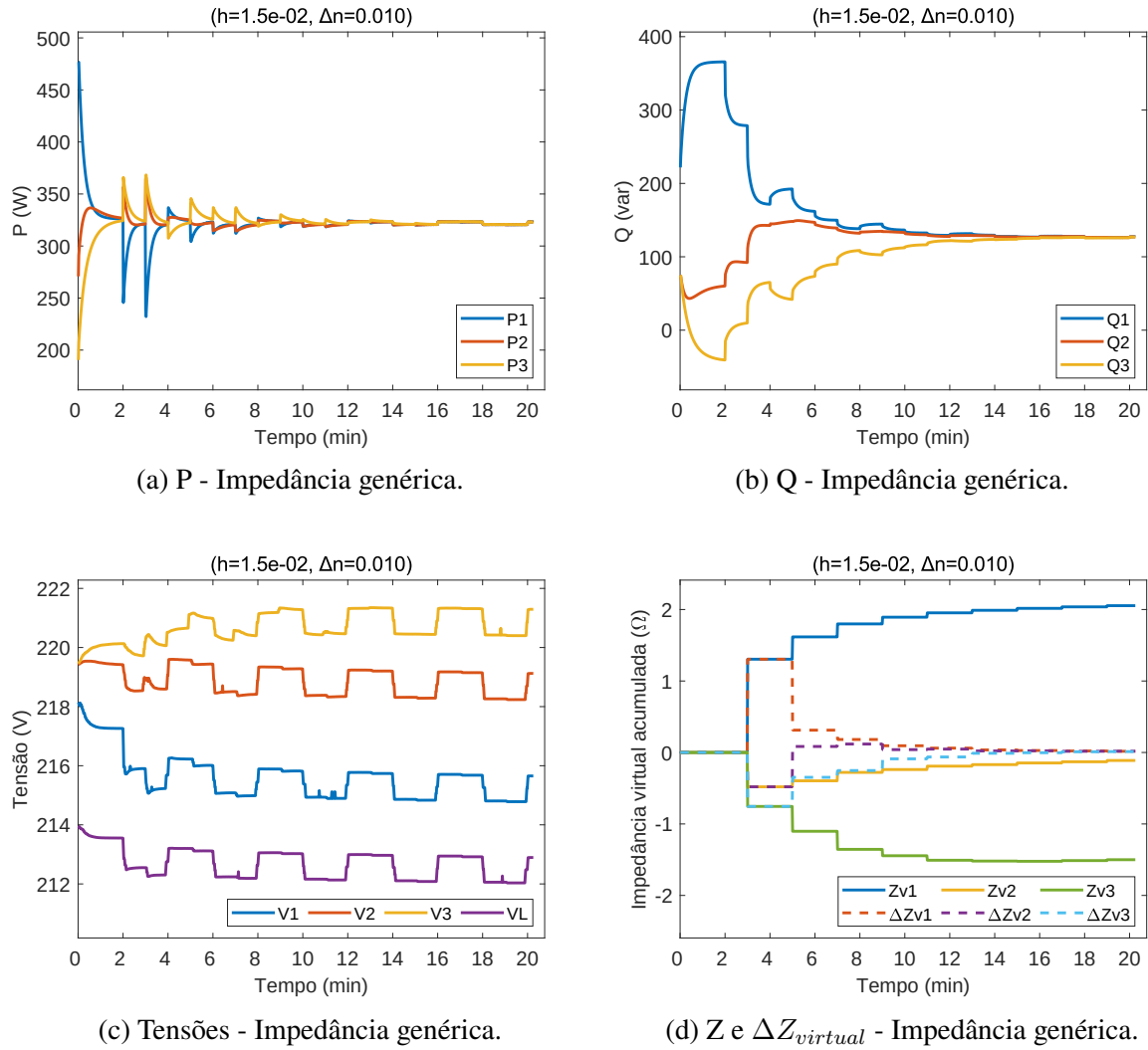
Tabela 6 – Parâmetros do circuito para a simulação com 3 conversores.

Tensão nominal (rms)	220V
Frequência nominal	377rad/s
Potência ativa nominal da carga	1kW
Potência reativa nominal da carga	400var
Impedância de acoplamento (conversor 1)	$\mathbf{Z}_1 = 1,5 + j0,9 \Omega$; $ \mathbf{Z}_1 = 1,7493 \Omega$
Impedância de acoplamento (conversor 2)	$\mathbf{Z}_2 = 3,7 + j1,4 \Omega$; $ \mathbf{Z}_2 = 3,956 \Omega$
Impedância de acoplamento (conversor 3)	$\mathbf{Z}_3 = 4,8 + j2,5 \Omega$; $ \mathbf{Z}_3 = 5,412 \Omega$
Coefficiente de inclinação do <i>droop</i> de frequência (m)	$5 \times 10^{-6} \text{ rad/s.W}$
Coefficiente de inclinação do <i>droop</i> de tensão (n) (valor normal)	0,01 V/var
Coefficiente de inclinação do <i>droop</i> de tensão (n) (valor aumentado)	0,02 V/var
Coefficiente h	0.015
P_0	500W
Q_0	0var

modo que somente ele terá seus parâmetros alterados. De acordo com a Equação (24), para que sua potência seja o dobro, o coeficiente de inclinação deve ser a metade do valor dos demais, adotando-se, portanto, o valor de $m = 2,5 \times 10^{-6}$. Em contrapartida, o valor de P_0 deve ser dobrado, de acordo com a Equação (22), assumindo o valor de 1000W.

Com relação à modificação necessária para os valores de n , é preciso ter em mente que o método em questão corrige o compartilhamento de potência reativa a partir de uma situação em que se adota a Equação (25), a qual, conforme já explicado, não garante, por si

Figura 28 – Resultados da aplicação do método QZ para um caso com 3 conversores.

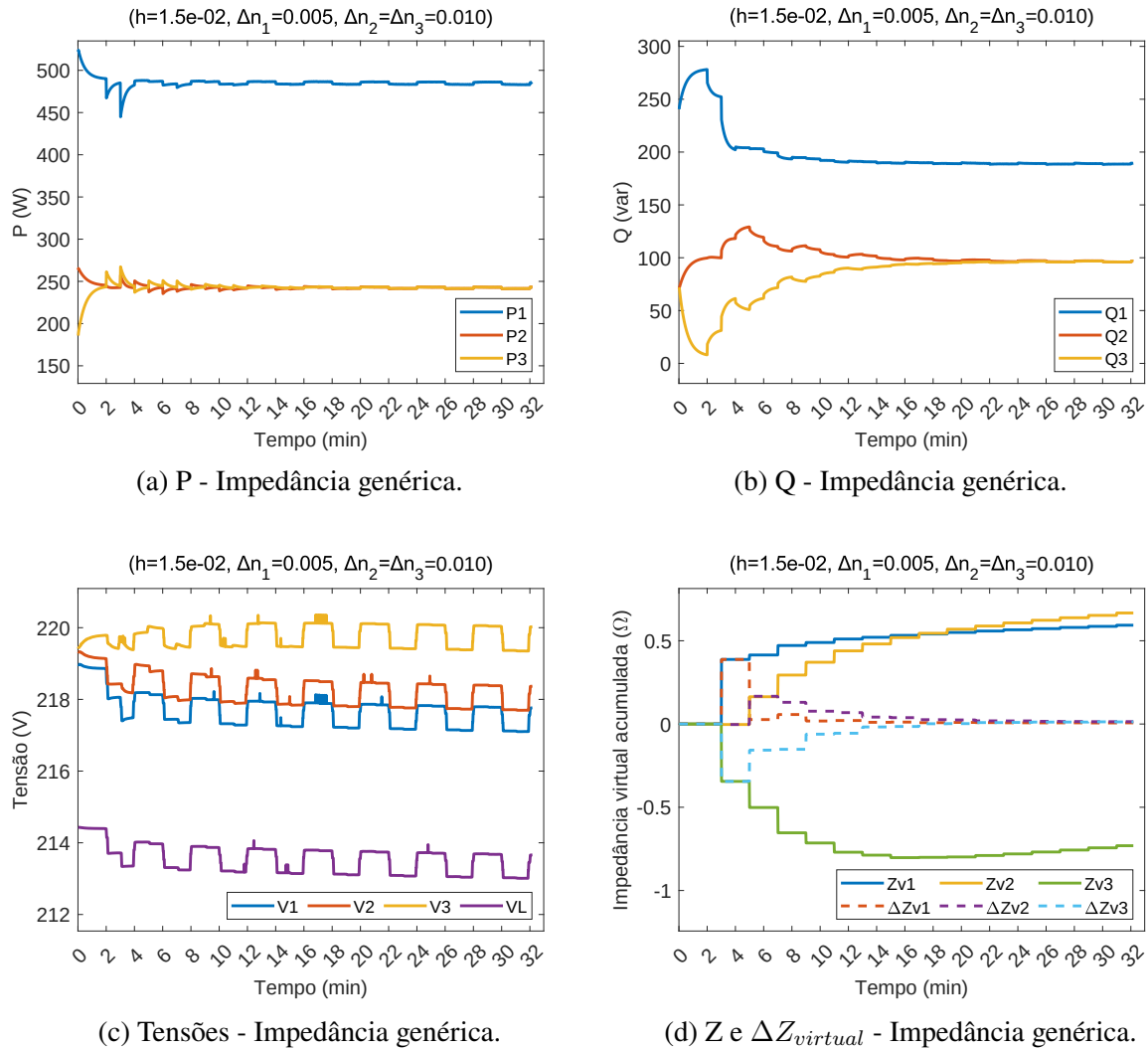


Fonte: O autor (2024).

mesma, compartilhamento proporcional das potências reativas. Ou seja, na situação em que os conversores tinham potência nominais iguais, os seus coeficientes n eram todos iguais e oscilavam em conjunto, entre os mesmos valores máximo e mínimo. Nessa nova situação, para que ao final do processo se tenha o resultado pretendido, com $Q_1 = 2 Q_2 = 2 Q_3$, é necessário também que seja diminuído pela metade o coeficiente n_1 , tanto em seu valor normal como no aumentado.

É interessante observar que essa modificação implica que Δn também será diminuído pela metade, levantando questões sobre se seria necessário compensar esse efeito com um aumento de h . Conforme já discutido, a relação entre esses dois parâmetros não é linear, uma vez que uma variação de Δn não se traduz, necessariamente, em uma variação de igual proporção no ΔQ referente à perturbação de n , de forma que optou-se por deixar os coeficientes h iguais. A Figura 29 mostra que as considerações realizadas foram suficientes para que se obtivesse o resultado pretendido, com as potências do conversor 1 sendo aproximadamente o dobro das potências dos demais conversores.

Figura 29 – Resultados da aplicação do método QZ para um caso com 3 conversores com potências nominais distintas.



Fonte: O autor (2024).

Uma vez finalizadas as verificações iniciais sobre o método QZ e discutidas as boas práticas para dimensionamento dos parâmetros, é necessário investigar melhor o funcionamento desse método durante longos tempos, tendo em mente o objetivo de tornar essa abordagem flexível a modificações no sistema que possam alterar a solução do problema de compartilhamento de potência. Da maneira como originalmente proposto, ainda mais se considerado um número fixo de iterações, se houvesse algum impacto na rede após o término da execução do método que provocasse novamente um desbalanceamento de potências reativas, seria necessário que um operador reiniciasse o processo, manualmente, para corrigir o problema para a nova situação.

Convém, portanto, pensar em alguma maneira de tornar essa reativação do método automática, de forma que o próprio sistema de controle consiga identificar a necessidade de atuação da correção do compartilhamento. Ao mesmo tempo, é preciso que, quando desnecessário, a correção cesse, para evitar quedas excessivas de tensão. Claramente essas preocupações se aproximam dos desafios da operação de uma microrrede real, algo que está fora do escopo deste

trabalho. Mesmo assim, o simples fato de eliminar o número fixo de iterações suscita a questão sobre o comportamento do sistema caso a metodologia seja aplicada de forma contínua.

3.1.1 A necessidade de um critério de parada e de uma limitação da variação de impedância virtual

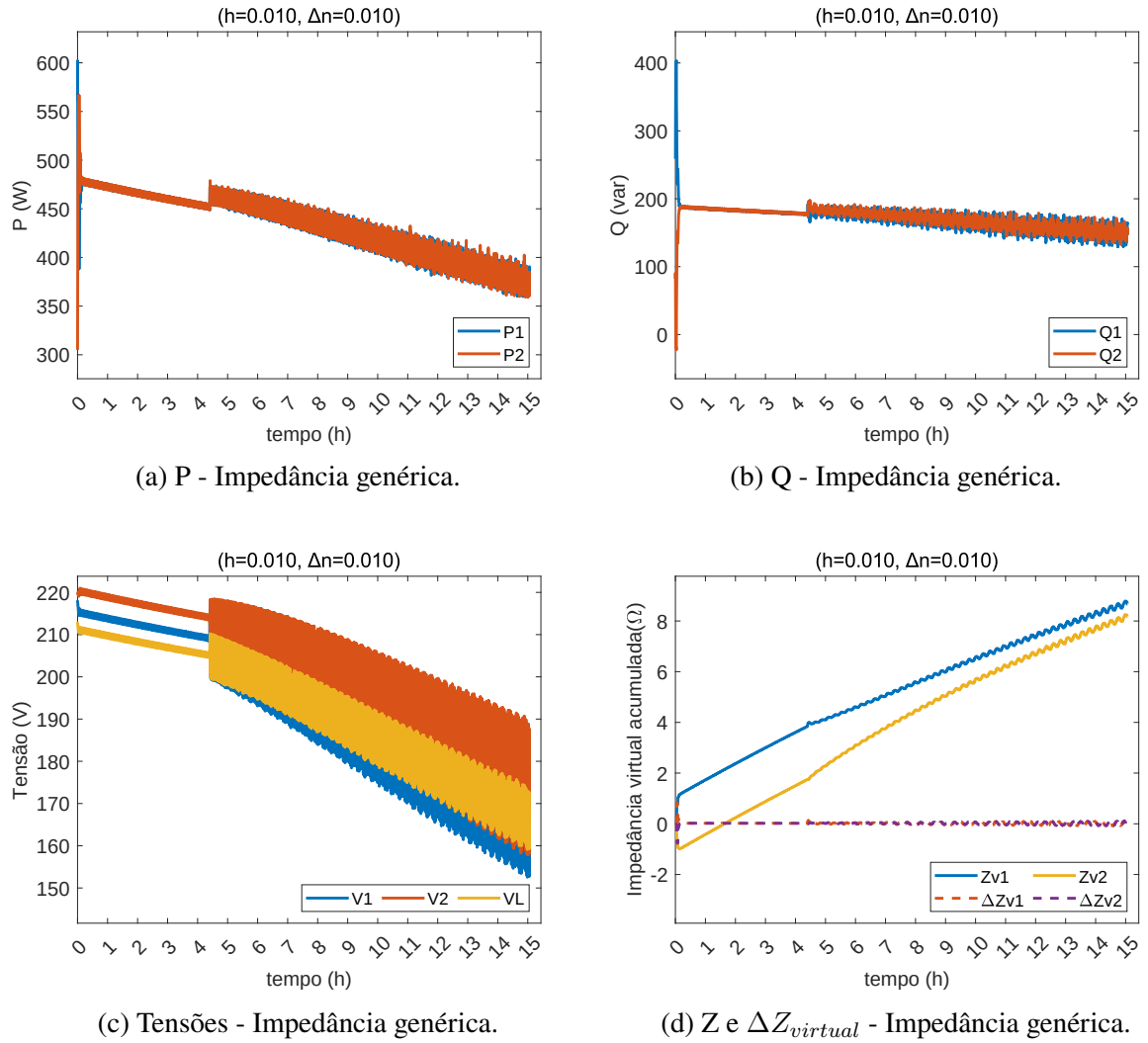
A primeira investigação a ser realizada sobre o funcionamento contínuo da metodologia é, simplesmente, permitir mais tempo de simulação ao caso mostrado na Figura 22, sem realizar quaisquer modificações nos modelos utilizados. Os resultados apresentados na Figura 30 mostram, até aproximadamente 5 horas de operação, o comportamento que já se estava prevendo. Após atingir bom compartilhamento de potência, logo no início da simulação, pequenos valores de impedância virtual continuam sendo adicionados ao circuito, o que provoca diminuição dos níveis de tensão e dos valores de potência ao longo das horas. A partir de certo ponto, entretanto, um comportamento estranho toma forma, levando o sistema inesperadamente à instabilidade, denotada pelas severas oscilações.

A princípio, cogitou-se que esse comportamento poderia ser devido à própria modelagem do sistema e, possivelmente, associado ao longo tempo de simulação. Porém, não é esse o caso. Um outro exercício que pode ajudar a entender que de fato se trata de um problema inerente à aplicação desse método é realizar uma mudança de carga cuidadosamente colocada para que ocorra entre um minuto par e um minuto ímpar, ou seja, entre a aquisição do valor de Q anterior à perturbação e a aquisição do valor perturbado. Esse evento provocará uma diferença de potência artificialmente grande no cálculo realizado por meio da Equação (75), o que se refletirá em uma impedância virtual também artificialmente grande. A Figura 31 mostra que esse acontecimento provocará também instabilidades no sistema, apontando que a causa dessas instabilidades é, na verdade, o valor excessivo de impedância virtual, que também é alcançado, com o tempo, na simulação mais longa.

É interessante observar o comportamento instantâneo das correntes entregues pelos conversores durante a instabilidade, apresentado na Figura 32. Ocorre algo como uma alternância brusca e frequente entre os valores de pico dessas correntes, reflexo das oscilações que ocorrem nas variáveis de potência e tensão. De fato, a modificação introduzida no *droop* $Q - V$ relaciona de uma maneira bastante peculiar essas variáveis com a impedância virtual, que é multiplicada pela corrente eficaz. Teoricamente, não era possível discernir sobre o correto funcionamento, mas apenas observar a estranheza desse artifício, que, inclusive, restringe a natureza da impedância virtual adicionada, conforme já se havia discutido. Ao que tudo indica, apesar de funcionar bem para poucas iterações, a aplicação contínua do método fica comprometida, inerentemente, pela sua própria formulação. Se o valor da impedância virtual for alto o suficiente, ocorrem instabilidades severas no sistema.

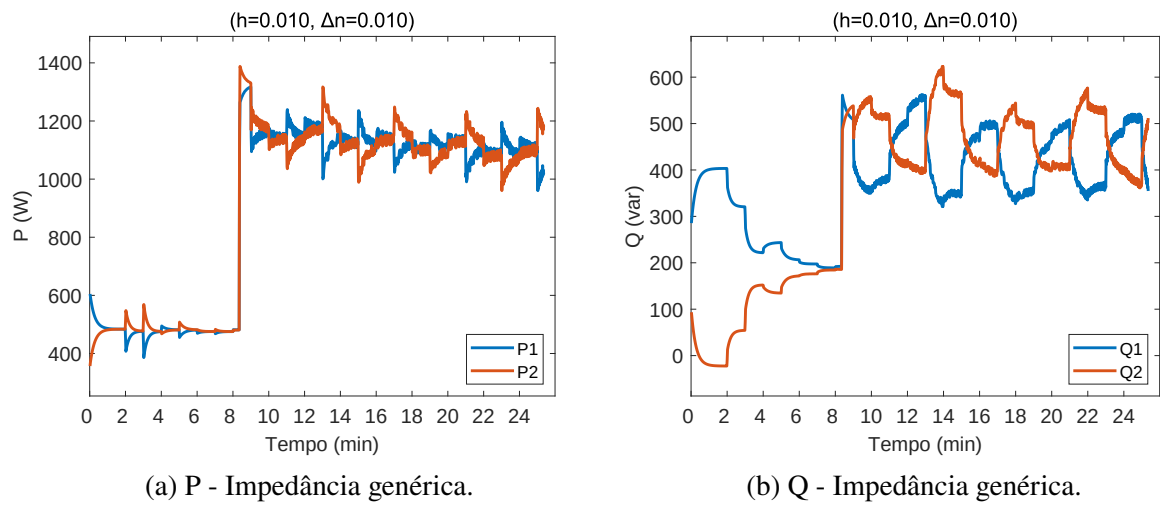
É importante frisar que esse ponto a partir do qual a instabilidade ocorre varia de acordo com o sistema simulado e, não há, a princípio, um valor de impedância virtual, ou um valor

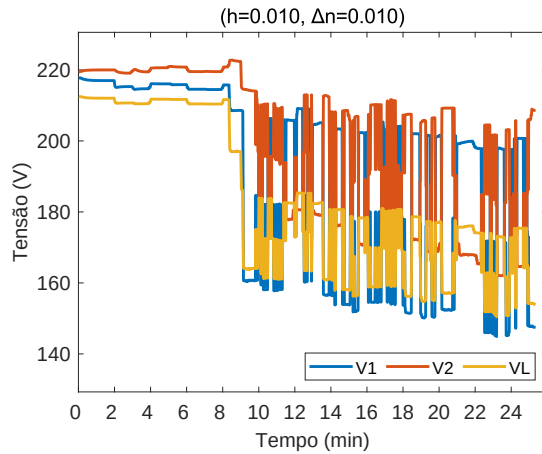
Figura 30 – Resultados de uma simulação longa com aplicação contínua da metodologia.



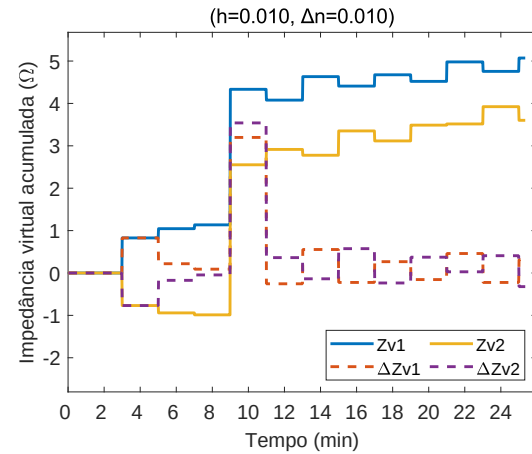
Fonte: O autor (2024).

Figura 31 – Efeitos da mudança de carga entre 8 e 9 minutos.



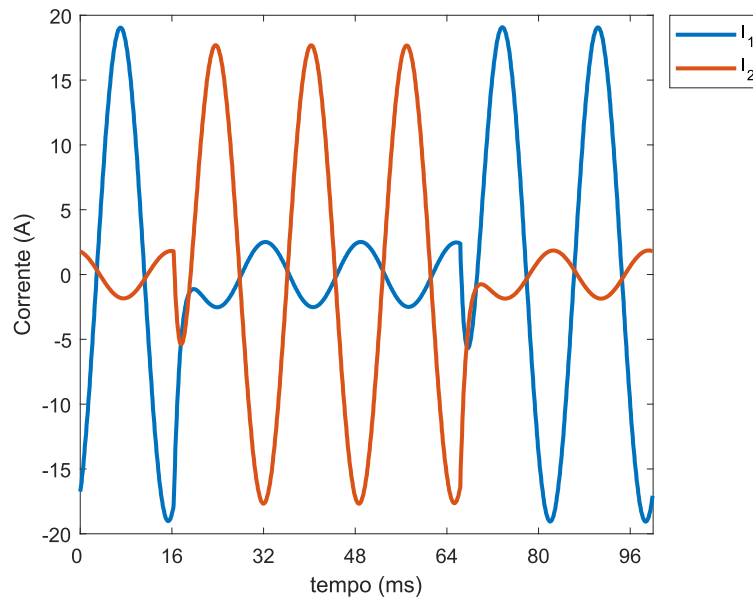


(c) Tensões - Impedância genérica.

(d) Z e $\Delta Z_{virtual}$ - Impedância genérica.

Fonte: O autor (2024).

Figura 32 – Corrente instantânea durante a situação de instabilidade.



Fonte: O autor (2024).

temporal, a partir do qual se pode dizer que as instabilidades ocorrerão. Essa discussão denota a necessidade de aperfeiçoar a metodologia estudada para que se possa aplicá-la de maneira contínua. É preciso estabelecer um critério de parada, para evitar quedas de tensão desnecessárias e uma limitação no valor acumulado da impedância virtual, para evitar as instabilidades verificadas. Além disso, a simulação com a mudança de carga mostra também a necessidade de desenvolver alguma maneira de detectar esse evento e desconsiderar o cálculo do ΔZ dele decorrente, evitando a adição de uma impedância virtual excessiva e que nada tem a ver com o processo de correção de compartilhamento de potência.

Tendo em vista o objetivo de desenvolver uma estratégia de controle que não necessite de comunicação entre os conversores, nenhuma das citadas melhorias pode depender desse

recurso, o que é um desafio especialmente para a idealização do critério de parada. Como discernir o momento a partir do qual o compartilhamento de potência já foi alcançado, ou seja, o momento em que as potências se aproximam suficientemente, sem comparar essas potências? Essa pergunta já deixa subjacente o fato de que, qualquer que seja o critério utilizado, ele deve indicar o momento da parada para todos os conversores da microrrede simultaneamente. Do contrário, alguns cessarão a adição das impedâncias virtuais e outros não, ocasionando piora no compartilhamento. Este é o ponto mais crítico da definição desses critérios, sendo o que permitirá discernir, dentre as alternativas a serem propostas, aquelas mais adequadas.

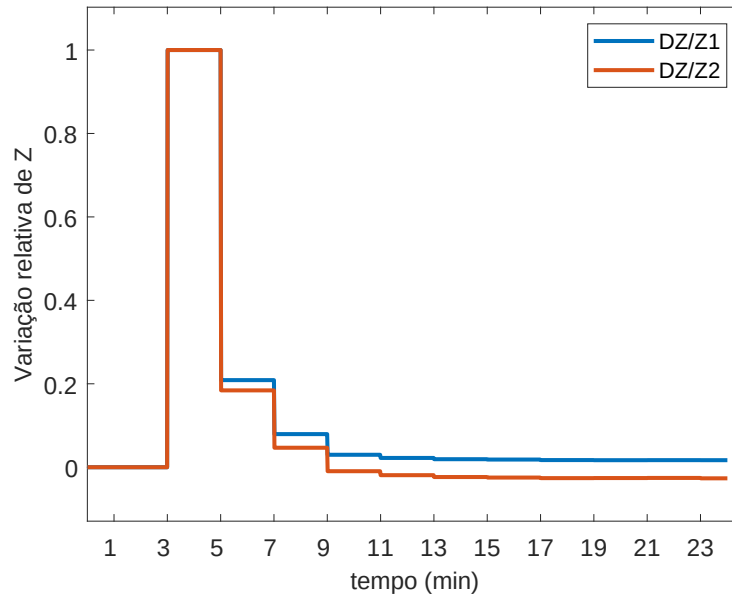
Apesar de não poder utilizar, para a tomada de decisão de parada de um dado conversor, as informações dos outros, existe um padrão bem definido para o comportamento das parcelas de impedância virtual adicionadas ao sistema. Conforme se observa na Figura 22d e demais figuras análogas deste capítulo, os valores absolutos das variações de impedância virtual vão diminuindo ao longo do tempo até praticamente convergirem em um valor próximo de zero. Uma primeira ideia seria estabelecer um critério que levasse em conta o próprio valor absoluto dessas variações, estabelecendo que, se menor que um dado limite, o método cessaria. Entretanto, essa abordagem seria muito dependente do caso específico estudado, já que os valores de impedância variam dependendo de vários fatores, inclusive da escolha da constante h .

Para a proposição de uma técnica mais genérica, convém avaliar essa grandeza de forma relativa, o que poderia ser feito, a princípio, dividindo o valor da variação adicionada pelo próprio valor da impedância. A Figura 33 mostra o comportamento de $\Delta Z/Z$ para cada conversor na mesma simulação realizada anteriormente no caso com impedância genérica. Uma visão mais ampla a partir da execução de mais tempo de simulação deixa claro que mesmo após a aproximação das potências reativas, com a continuidade do processo, ambas as variações de impedância virtual tornam-se positivas, de acordo com a Figura 34. Como nesse caso a impedância virtual do conversor 2 inicialmente era negativa, isso provoca para ele o comportamento mostrado na Figura 34b, com a inversão de sinal da sua variação relativa ocorrendo no momento em que a impedância acumulada finalmente troca de sinal, momento este que pode ser identificado também na própria Figura 34a. É importante que se diga que o que se entende por parada do método, é quando cessam as adições de impedância virtual, sem interromper os ciclos de perturbações de n , os quais devem continuar acontecendo para possibilitar a reativação do método caso haja algum impacto mais severo na rede. Dessa forma, não é interessante que ocorram oscilações do critério estabelecido em torno do seu valor do limite de parada, a fim de evitar que o método entre em operação novamente sem necessidade.

Como esse critério é bem comportado somente para os conversores que têm maior potência, ou seja, cujos valores de impedância virtual e sua variação permanecem positivos ao longo de todo o processo, isso dificulta o estabelecimento de um valor absoluto de $\Delta Z/Z$ abaixo do qual se definirá a parada do método simultaneamente para todos os conversores. É claro que, caso se estabelecesse o critério de parada com base nessa estratégia, considerando somente a parte inicial dos gráficos mostrados, o método cessaria antes que ocorresse a mudança de sinal,

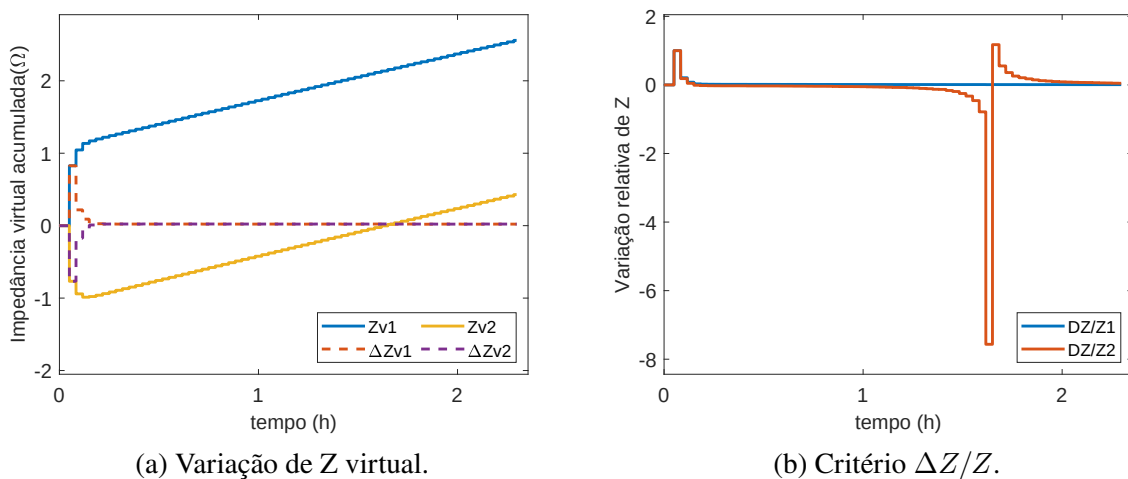
para esse caso específico estudado. Nada impede, entretanto, que para um outro caso, como por exemplo o de três conversores mostrado na Figura 28d, esse efeito da inversão de sinal ocorresse muito mais rapidamente para um dado conversor.

Figura 33 – Comportamento do critério $\Delta Z/Z$.



Fonte: O autor (2024).

Figura 34 – Variação de Z virtual e critério $\Delta Z/Z$ para uma simulação mais longa.



(a) Variação de Z virtual.

(b) Critério $\Delta Z/Z$.

Fonte: O autor (2024).

Sendo assim, faz-se necessário refinar a abordagem para esse critério de parada com base na avaliação do acréscimo de impedância virtual. Ao invés de analisar qual a relação entre a variação de impedância e a impedância total acumulada, se pode também calcular qual a diferença relativa entre variações sucessivas de impedância. Ou seja, à medida em que a execução do método avança, não só os valores dos acréscimos de impedância vão diminuindo, mas, além disso,

tornam-se cada vez mais próximos entre si. De início, esse novo critério foi pensado realizando uma diferença relativa entre duas variações de impedância consecutivas, expressa pela equação

$$\Delta(\Delta Z)_{rel} = \left| \frac{\Delta Z_{atual} - \Delta Z_{anterior}}{\Delta Z_{anterior}} \right|. \quad (78)$$

Entretanto, observou-se, ao longo das execuções das simulações, que as variações de impedância calculadas nas etapas de aumento de n tinham valores mais altos que as calculadas nas etapas de diminuição, talvez porque nessas etapas o sistema já havia sofrido o efeito da adição das impedâncias da etapa anterior, o que, conforme já dito, vai diminuindo as magnitudes das variações de potência. Esse fato provocava uma não monotonicidade dos gráficos obtidos para esse critério, os quais por vezes apresentavam comportamentos de subida e descida à medida em que a função decrescia.

Para sanar essa dificuldade, bastou realizar a comparação relativa sempre entre variações de impedância calculadas em um mesmo estágio do processo: entre duas variações calculadas durante a subida de n ou duas calculadas durante a descida, o que se pode expressar por meio da equação

$$\Delta(\Delta Z)_{rel} = \begin{cases} \left| \frac{\Delta Z_{atual, subida} - \Delta Z_{anterior, subida}}{\Delta Z_{anterior, subida}} \right| \\ \left| \frac{\Delta Z_{atual, descida} - \Delta Z_{anterior, descida}}{\Delta Z_{anterior, descida}} \right| \end{cases}. \quad (79)$$

Ora, como as etapas de subida e descida de n são consecutivas, a etapa anterior de mesmo tipo da última etapa, seja ela de subida, seja de descida, será a antepenúltima etapa ocorrida, de forma que se pode expressar de modo mais sucinto esse novo critério por meio da equação

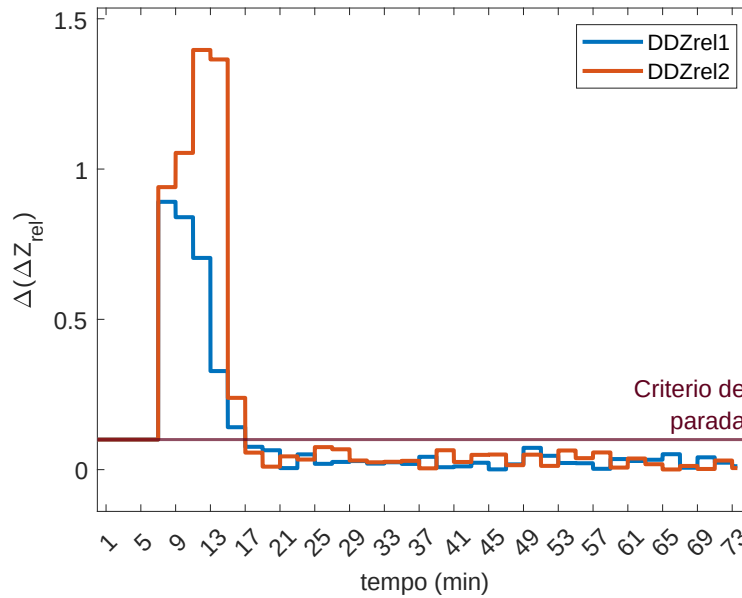
$$\Delta(\Delta Z)_{rel} = \left| \frac{\Delta Z_{atual} - \Delta Z_{antepenúltimo}}{\Delta Z_{antepenúltimo}} \right|. \quad (80)$$

Com essa abordagem, as variações de impedância ocorridas em etapas de subida de n são sempre comparadas com variações referentes a etapas do mesmo tipo, assim como as variações ocorridas em etapas de descida de n .

O gráfico desse critério é apresentado na Figura 35, na qual ficou destacado também o valor limite adotado para a parada do método. Quando os valores calculados são menores que 0, 1, o que acontece para ambos os conversores da simulação exemplo a partir dos 17 minutos, as variações de impedância deixam de ser adicionadas e o método cessa, o que se traduz nos resultados observados na Figura 36. Apesar do sucesso evidente da técnica utilizada, em virtude do critério em questão ter um comportamento mais previsível que o critério anterior, pode-se observar ainda, na Figura 35, que abaixo da linha do critério ainda ocorrem oscilações nos valores calculados, algumas delas chegando bem próximas ao limite estabelecido. É importante lembrar que as variações de impedância e, portanto, os valores do critério, continuam sendo calculadas

após a parada, embora não sejam efetivamente acumuladas ao valor de impedância total, de modo que, eventualmente, a depender do valor limite escolhido para o critério, podem ocorrer ativações e desativações, inclusive parciais, da metodologia, o que prejudica o bom funcionamento do processo e deve ser evitado.

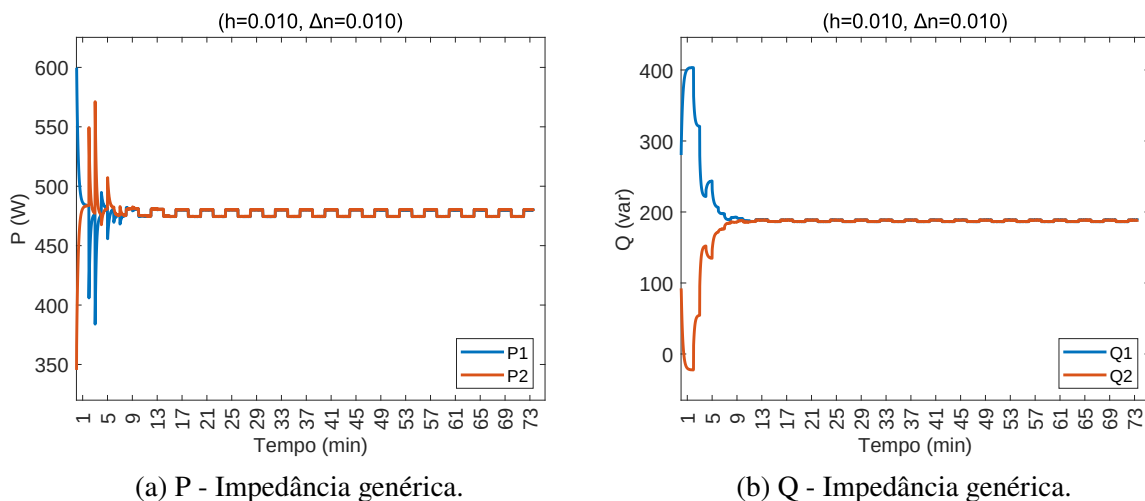
Figura 35 – Comportamento do critério $\Delta(\Delta Z_{rel})$.

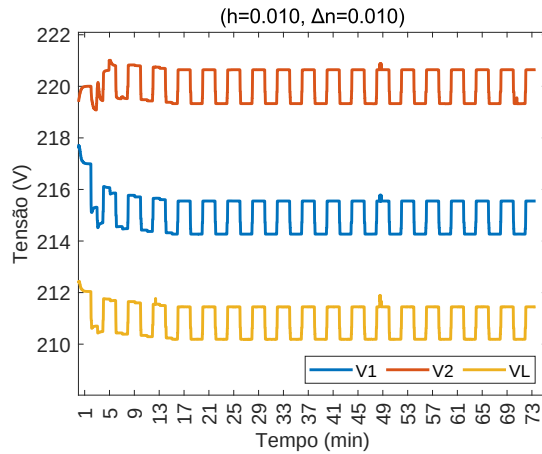


Fonte: O autor (2024).

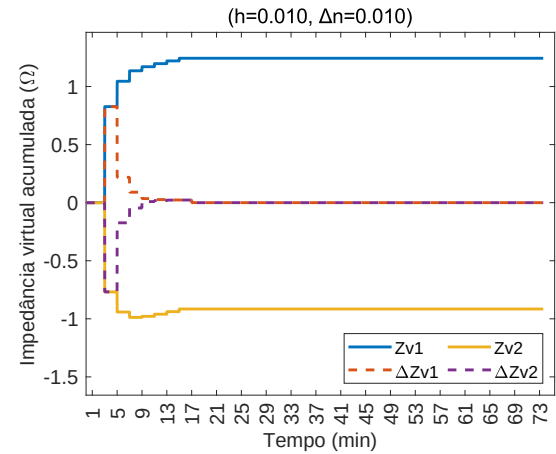
Um exemplo dessa possibilidade é a aplicação da mesma metodologia na microrrede com 3 conversores, cujos parâmetros foram introduzidos na Tabela 6, adotando-se o mesmo valor para o limite do critério de parada. Nessa situação, não é possível atingir a parada simultânea dos três conversores, em dados momentos ocorrendo a nulidade do acréscimo de impedância

Figura 36 – Aplicação do método de correção de compartilhamento de Q aliado a critério de parada.





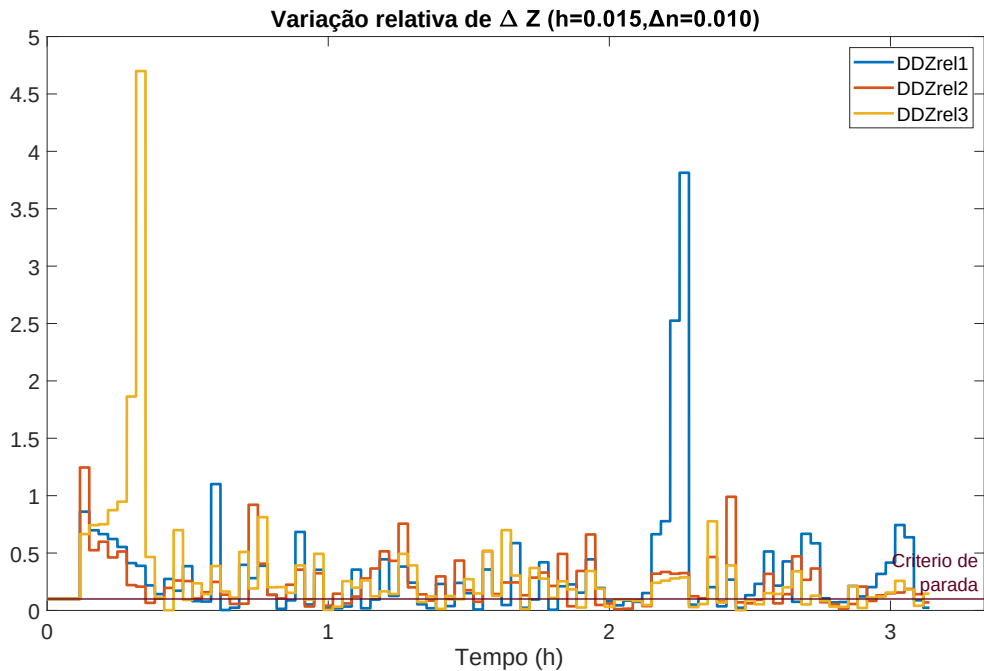
(c) Tensões - Impedância genérica.

(d) Z e $\Delta Z_{virtual}$ - Impedância genérica.

Fonte: O autor (2024).

somente para um ou para dois deles. Mesmo após 3 horas de simulação, não foi possível atingir a parada correta, ocorrendo um breve intervalo em torno das 2 horas no qual todas as impedâncias virtuais permanecem constantes, mas, posteriormente, voltam a aumentar, conforme mostram as Figuras 37 e 38.

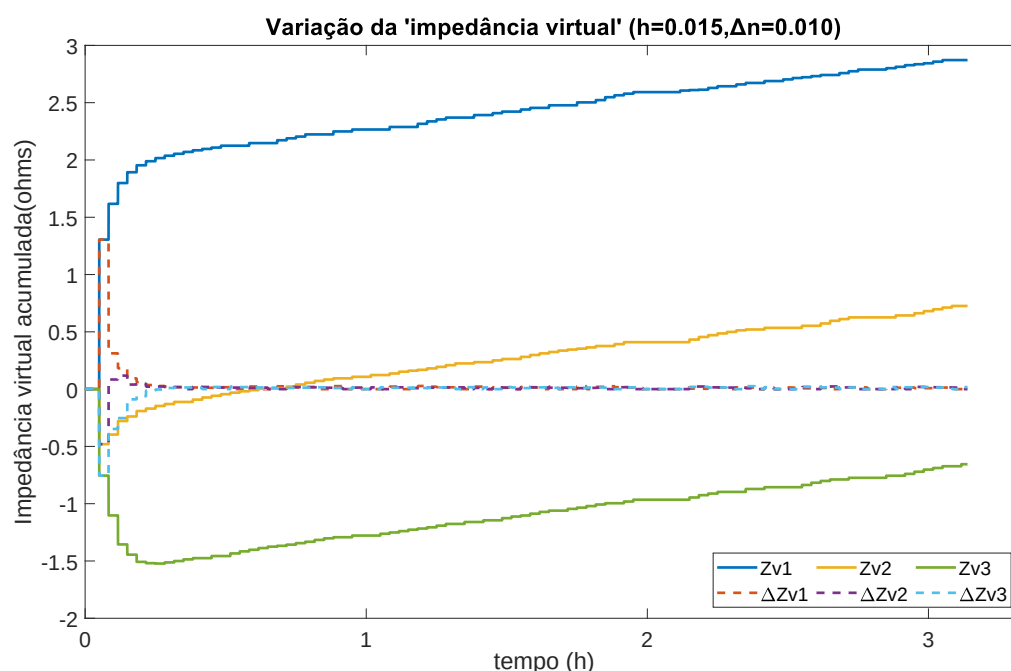
Figura 37 – Comportamento do critério $\Delta(\Delta Z_{rel})$ em um caso com três conversores e limite de parada de 0,1.



Fonte: O autor (2024).

Ainda é possível ajustar os valores de h e do critério de parada para obter um desempenho consideravelmente melhor, conforme a Figura 39, simulada para $h = 0,018$ e um limite de parada de 0,5. A esse ponto, há indícios de que existe uma relação entre os valores de h e do critério de parada utilizado, o que afeta sobremaneira o desempenho do resultado de compartilhamento

Figura 38 – Comportamento das variações de impedância e da impedância acumulada em um caso com 3 conversores e limite de parada de 0,1.

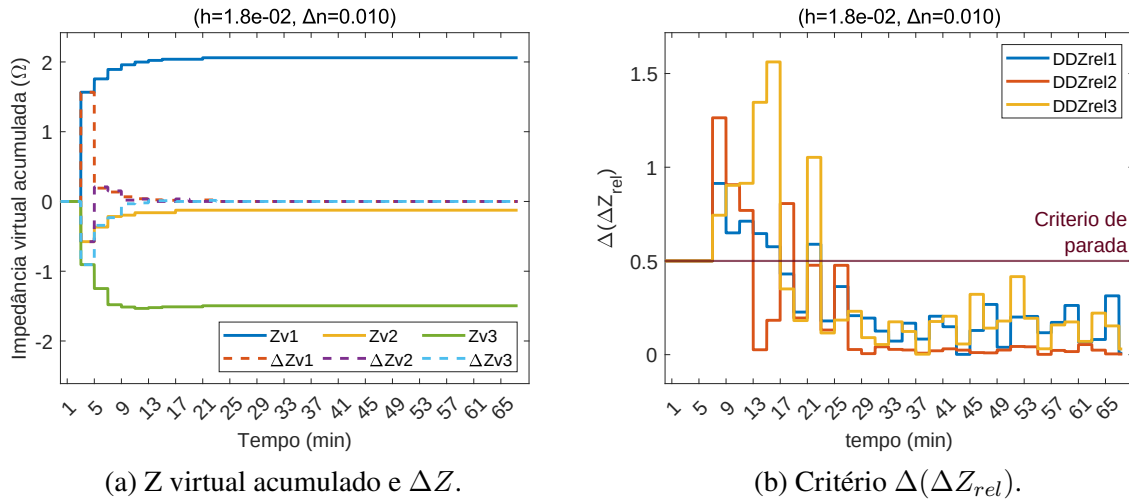


Fonte: O autor (2024).

de potência e do critério de parada. Apesar das dificuldades encontradas para o caso com 3 conversores, o critério pode ainda ser aperfeiçoado adicionando-se uma dupla condição ao seu valor limite, de modo que, uma vez que a aplicação do método cesse, seria necessário que se atingisse um valor de variação relativa de ΔZ maior que o de parada para que ele voltasse a funcionar. Ou seja, definir-se-ia um valor limite para parada e outro para retomada. Ainda assim, permanece a questão da escolha desses valores limite como um problema, especialmente em se tratando de um contexto de uma microrrede real, no qual pode não ser trivial realizar simulações a partir de um modelo suficientemente acurado da rede ou mesmo testar de maneira consistente os valores do critério. Em simulação e com a ajuda dos gráficos é possível discernir um valor adequado para o caso específico estudado, mas, a priori, não há como estabelecer de maneira bem definida um processo genérico de escolha desses valores. Sendo assim, a solução desse aspecto, que muito depende do caso estudado e das ferramentas disponíveis é explorada aqui para oferecer pelo menos um mínimo de consciência sobre os problemas inerentes à aplicação da metodologia da forma como se está propondo.

É evidente que se pode propor muitas maneiras de evitar que a execução desenfreada da metodologia resulte em quedas de tensão severas e prejuízos à operação, inclusive adotando um número fixo de iterações, a depender do nível de perfeição do compartilhamento de potência desejado e da complexidade de que se pode dispor para a adição desses critérios extras. Outra possibilidade avaliada é de se calcular, ao invés de uma variação relativa dos acréscimos de impedância, uma variação relativa da própria potência reativa entregue pelo conversor. Os gráficos

Figura 39 – Comportamento do critério $\Delta(\Delta Z_{rel})$ e de ΔZ em um caso com três conversores e limite de parada de 0,5.



Fonte: O autor (2024).

dessa grandeza que já foram apresentados mostram que, após atingir bom compartilhamento de potência, as variações de Q que se seguem são praticamente devidas à perturbação de n , o que é condizente com os próprios gráficos das variações de impedância, já que elas se tornam cada vez menores e os efeitos de seus acréscimos cada vez mais desprezíveis, conforme as Figuras 22b e 22d, por exemplo.

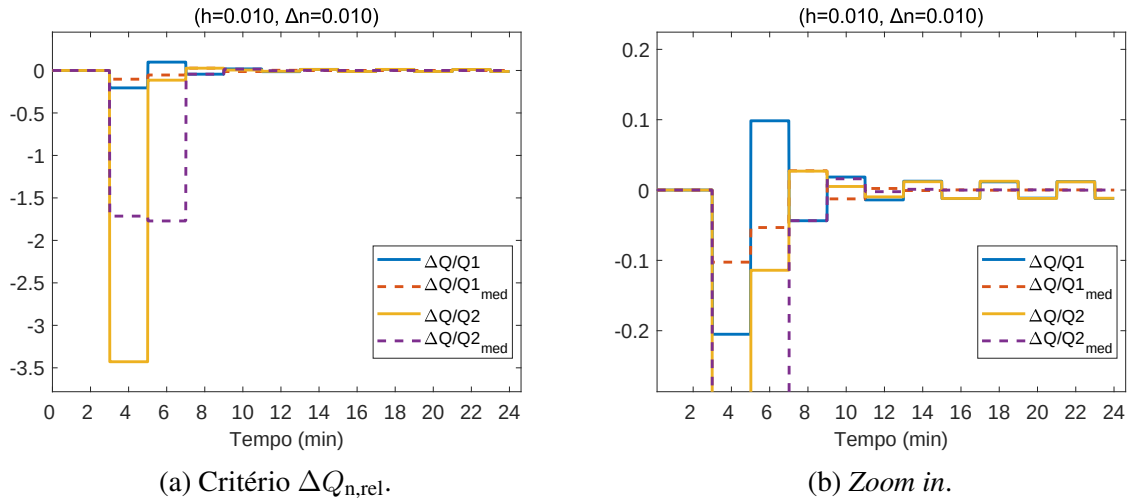
A ideia seria, então, calcular a variação de Q devida à perturbação de n , a partir dos valores aquisitados imediatamente antes da perturbação e após o fim de seu transitório, ou seja, os mesmos valores utilizados para o cálculo de ΔZ . Para evitar que se estabeleça critérios com base nos valores de potência específicos da simulação, essa variação é dividida pelo valor de potência anterior à perturbação, constituindo também um critério de variação relativa, tal como mostra a equação

$$\Delta Q_{n,rel} = \frac{Q_{perturbado} - Q_{anterior}}{Q_{anterior}}. \quad (81)$$

Como é de se esperar, esse cálculo resultará em uma forma de onda oscilante, conforme mostra a Figura 40, mas que tem algumas características peculiares. À medida em que as potências vão se aproximando, as formas de onda para cada conversor também se aproximam entre si e, como as contribuições de adição de impedância vão se tornando cada vez mais insignificantes, o efeito de uma etapa de aumento de n sobre a potência vai se tornando praticamente o mesmo de uma etapa de diminuição, de forma que, se calculada a média considerando uma janela de duas etapas consecutivas, esse valor, seja ele negativo, seja positivo, se aproxima de zero. A aplicação do método cessa, então, quando o valor absoluto dessa média for menor que um valor limite estabelecido.

Assim como para o critério de variação relativa de ΔZ , para um caso com dois conversores o critério de $\Delta Q_{n,rel}$ funciona bem, ocasionando a parada do método de maneira análoga ao que aconteceu no exemplo da Figura 36, mas para um caso com três conversores as mesmas

Figura 40 – Critério $\Delta Q_{n,rel}$ para a simulação exemplo com impedância genérica.

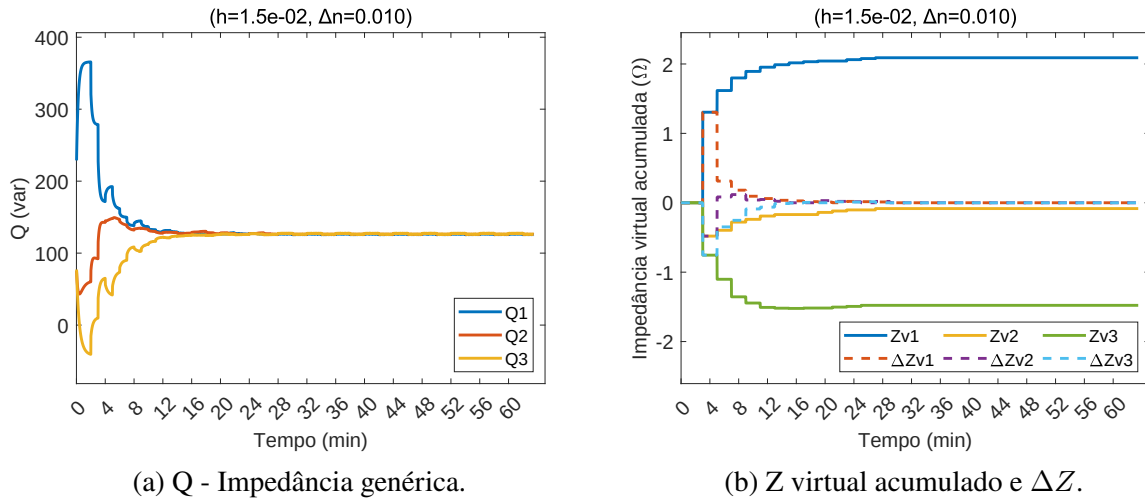


Fonte: O autor (2024).

dificuldades também podem ser encontradas, com a possibilidade de desativação parcial do método para um subconjunto dos conversores e a ocorrência de desativações e ativações sucessivas. Da mesma forma, entretanto, é possível ajustar o valor da constante h para evitar esses problemas, conforme mostram os resultados da Figura 42. Para essa simulação, foram utilizados os valores de $h = 0,018$ e o limite do critério de $0,1\%$. É interessante observar que, caso se utilize o valor de $h = 0,015$, com o mesmo limite do critério de parada, ocorre problema análogo ao mostrado na Figura 38, porém menos severo, uma vez que, apesar das paradas parciais, dessa vez é possível alcançar a parada total da aplicação do método, de acordo com a Figura 41. Essa observação mais uma vez evidencia a crucial importância do valor da constante h para o bom funcionamento do critério de parada, e, portanto, da relação que existe entre esses dois parâmetros. Ressalta-se outra vez que é possível estabelecer também para o critério $\Delta Q_{n,rel}$ valores limites diferentes para a parada e a retomada do método, evitando idas e vindas desnecessárias ao custo de pequenos desbalanceamentos no compartilhamento de potência.

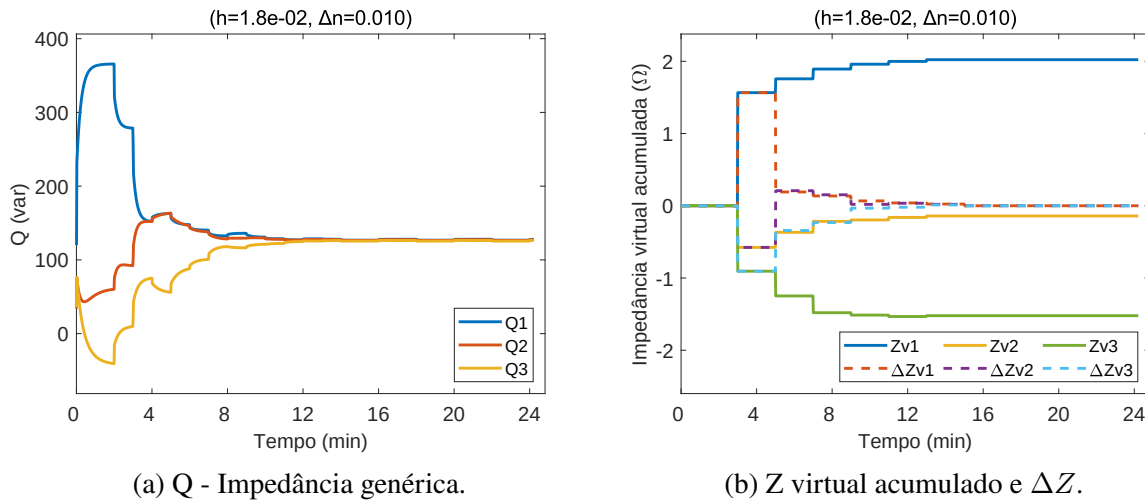
Embora suscetível aos mesmos males que o critério $\Delta(\Delta Z_{rel})$, o critério de $\Delta Q_{n,rel}$ é calculado de forma consideravelmente mais simples e oferece resultados similares, além do que está dissociado do conceito de impedância virtual proposto pelo método QZ de forma que pode ser adotado, inclusive para as variantes desse método, desenvolvidas na Seção 3.2. Mesmo assim, ainda restam dúvidas sobre como escolher o limite do critério de parada e da relação dele com a constante h , processos que permanecem sendo realizados de maneira empírica com o auxílio dos gráficos gerados. Conforme já dito, à medida em que a aplicação do método de correção de compartilhamento de potência for se aproximando da realidade experimental, os desafios e restrições operacionais que surgirão, a depender de cada caso, delimitarão os contornos de cada problema, de modo que se possa estabelecer uma maneira mais bem definida de escolher esses parâmetros para cada situação. O que já se pode depreender a partir das simulações realizadas é que o valor de h , em concordância com o que já se afirmou na Seção 3.1, deve ser escolhido

Figura 41 – Aplicação do método de correção de compartilhamento para 3 conversores com o critério de parada $\Delta Q_{n,rel}$ e $h = 0,015$.



Fonte: O autor (2024).

Figura 42 – Aplicação do método de correção de compartilhamento para 3 conversores com o critério de parada $\Delta Q_{n,rel}$ e $h = 0,018$.



Fonte: O autor (2024).

grande o suficiente para que não sejam necessárias muitas iterações do método mas não grande demais a ponto de ocorrerem inversões nas potências dos conversores, o que também resulta num maior número de iterações para que se atinja o bom compartilhamento de potência. Por sua vez, o valor limite do critério de parada deve ser escolhido preferencialmente de forma que provoque a parada do método para todos os conversores, conforme o exemplo da Figura 35, em um momento em que as potências já estejam suficientemente próximas entre si.

Uma vez abordada a questão da parada do método, resta discutir sobre a necessidade de limitação da impedância virtual, problemática introduzida por meio dos exemplos das Figuras 30 e 31. Para o caso da primeira figura, o próprio critério de parada evita o problema, impedindo que a metodologia continue sendo aplicada indefinidamente e acabe ocasionando instabilidades. Para

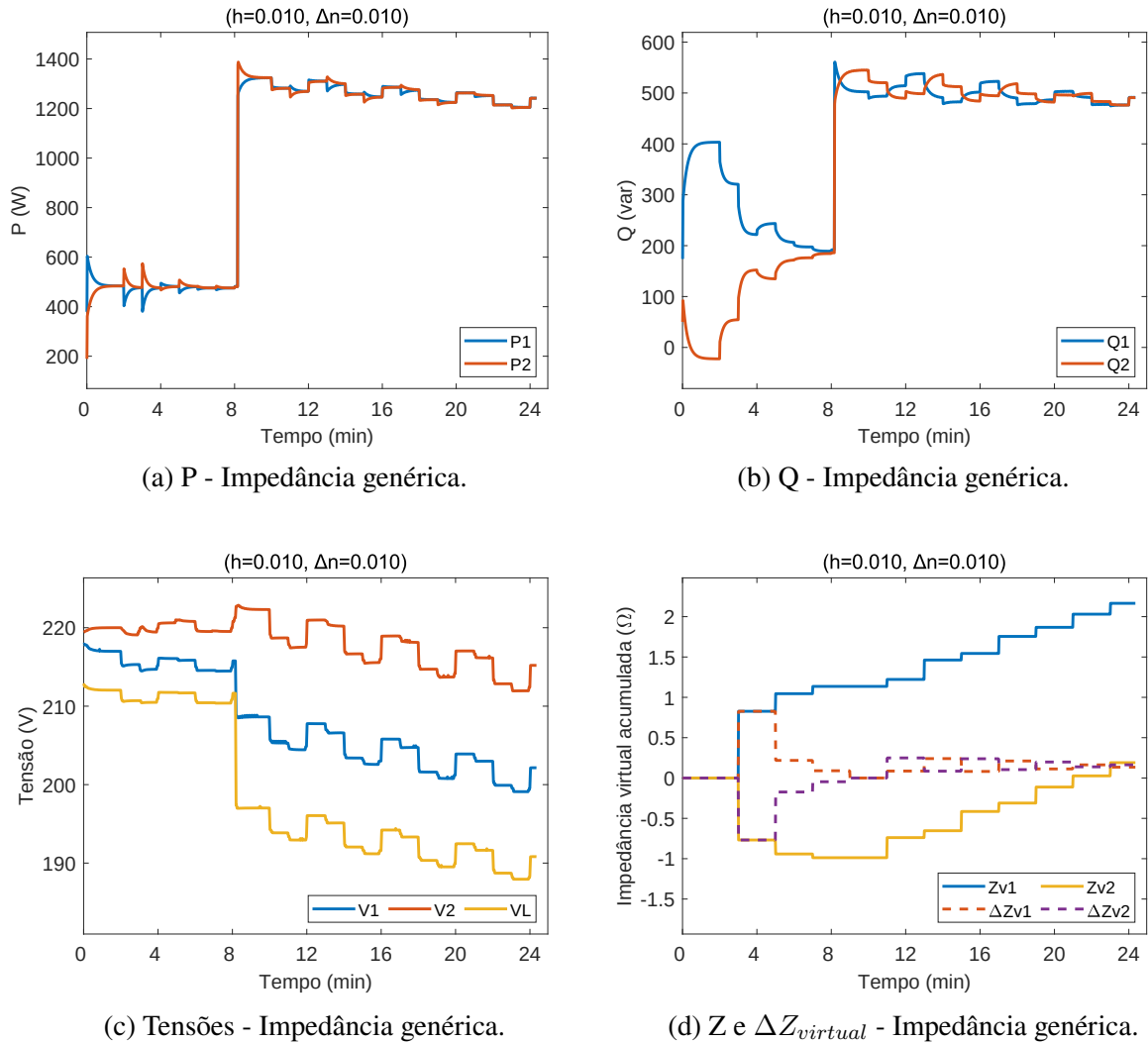
o segundo caso, entretanto, faz-se necessário algum artifício adicional, por conta da adição de valores de impedância artificialmente grandes ocasionada pela mudança de carga. Uma primeira ideia seria estabelecer um limite de saturação para o valor da impedância virtual, o que evitaria os problemas de instabilidade caso esses valores atingissem patamares altos. Mesmo assim, dado que apenas um dos conversores atinja o limite de saturação, o compartilhamento de potência seria prejudicado, uma vez que o método seria aplicado somente ao conversor para o qual ainda não foi atingida a saturação. Mesmo que fosse possível corrigir o compartilhamento nessas condições, isso seria feito com impedâncias virtuais desnecessariamente altas, o que acarretaria quedas de tensão evitáveis para o sistema. Num pior caso, ambos os conversores atingiriam o limite de saturação, impossibilitando a correção do compartilhamento de potência. De toda forma, essa ideia é insuficiente para resolução do problema, uma vez que ainda permite a adição de impedâncias virtuais estranhas à operação normal da metodologia. A próxima seção dedica-se ao tratamento desse problema, estabelecendo artifícios para evitar completamente a adição de impedâncias virtuais indevidas e para identificação das mudanças de carga.

3.1.2 Aperfeiçoamento da operação sob mudança de carga

A fim de evitar a adição de parcelas de impedância virtual indesejadas, pode-se elaborar um critério que verifique, no mesmo passo em que ocorre o cálculo de ΔZ , se a soma do valor calculado com o valor acumulado ultrapassa, em módulo, um dado limite estabelecido. Caso ultrapasse, esse valor calculado é descartado, evitando que a impedância total seja excessiva, caso contrário, o valor é efetivamente somado, compondo a impedância virtual total adicionada. A simples aplicação desse critério, denominado por critério $|Z + \Delta Z|$, torna a situação da Figura 31 livre de instabilidades, com adequação do sistema ao novo patamar de carga, conforme mostra a Figura 43. Nota-se que para o novo patamar de carga o valor de $h = 0,01$ é excessivo, provocando inversões nas potências dos conversores nas primeiras iterações após a mudança de carga, processo que atrasa a estabilização do sistema e também ocasiona crescimento desnecessário das impedâncias virtuais. O aumento de carga é realizado ligando-se em paralelo à carga original uma carga com metade de sua impedância, o que corresponde, nominalmente, a um aumento de carga de 3 vezes, valor exagerado para que se chegasse ao limite de estabilidade. Evidentemente a queda de tensão provocada pela adição dessa carga é severa, tanto que os valores de potência não chegam de fato a triplicar.

É importante observar que antes das inversões de potência reativa ocasionadas pelo valor excessivo de h , ocorre, já no transitório da mudança de carga, uma primeira inversão das potências dos conversores, situação que, por si só, já mostra a importância da execução contínua da metodologia e da possibilidade de retomada do método em situações em que se tenha atingido o critério de parada. Quando ocorreu a mudança de carga, o compartilhamento de potência já havia sido praticamente atingido, mas os valores de impedância calculados para o patamar de carga menor não atenderam perfeitamente à nova situação de carga, de modo que foram necessárias execuções adicionais da metodologia para que se atingisse novamente a

Figura 43 – Simulação com mudança de carga entre 8 e 9 minutos com aplicação do critério $|Z + \Delta Z|$.



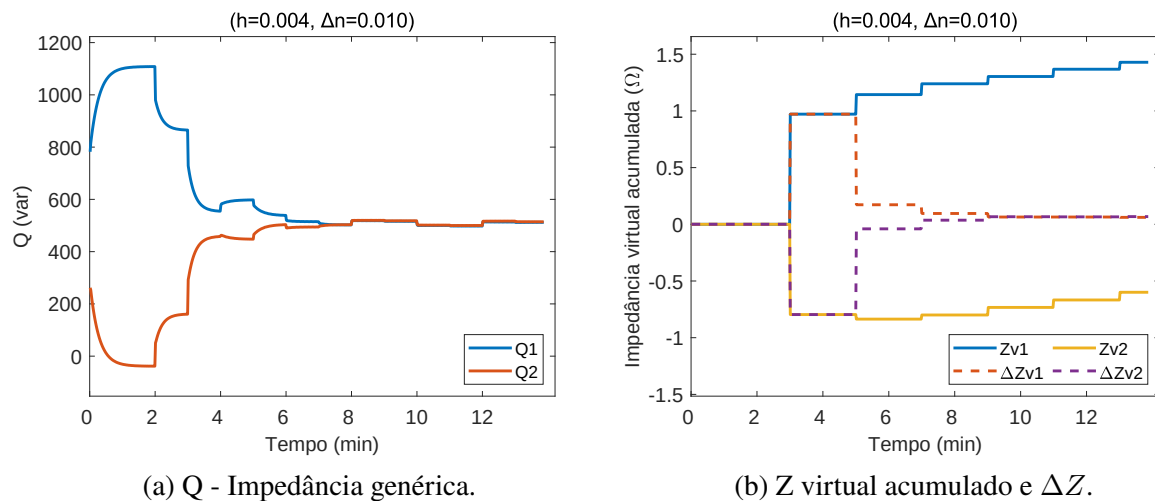
Fonte: O autor (2024).

igualdade entre as potências. Se realizada a simulação da microrrede para o patamar de carga alta, ajustando-se o valor de h para 0,004, fica evidente que as impedâncias virtuais mostradas na Figura 43d de fato são desnecessariamente excessivas, conforme os resultados da Figura 44, que mostram a possibilidade de resolução do compartilhamento de potência para esse patamar de carga fazendo-se uso de impedâncias menores.

Essa situação denota que há várias possibilidades de valores de impedância virtual que resultem na solução do problema, tanto que quando o método foi aplicado sem critério de parada e por longo tempo, caso analisado na seção anterior, as potências diminuíam de valor ao longo do tempo, mas continuando iguais entre si. Para evitar quedas de tensão desnecessárias, o que se busca é o conjunto de impedâncias virtuais adicionadas que sejam capazes de proporcionar equilíbrio entre as potências com o menor impacto possível nas tensões. Essa premissa estabelece mais uma orientação, além das já estabelecidas, para o dimensionamento da constante h : deve-se considerar o maior patamar de carga que a microrrede em questão atende para realizar a escolha

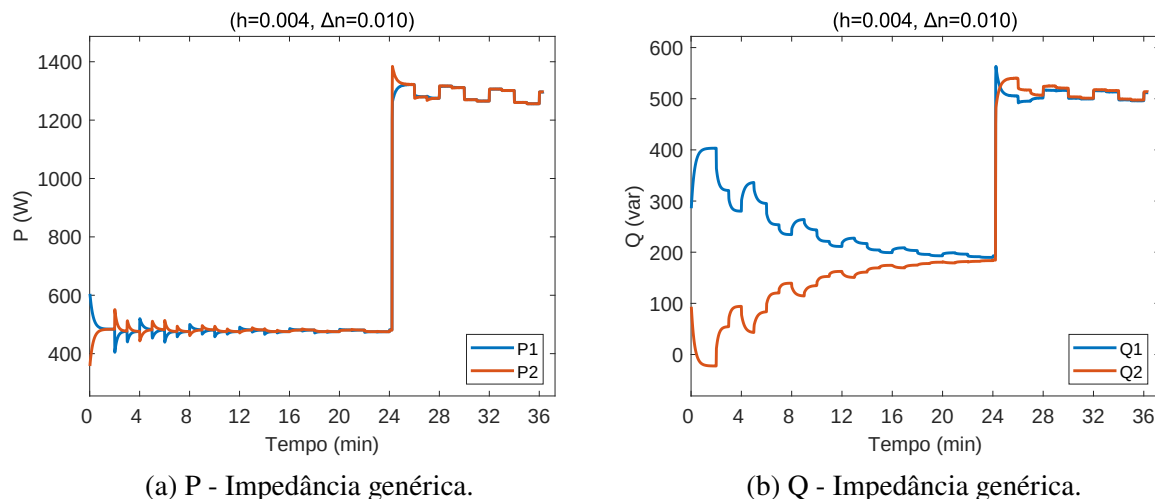
desse parâmetro, buscando evitar que uma eventual mudança de carga durante a aplicação do método possa provocar os efeitos mostrados na Figura 43b. Por exemplo, se uma situação análoga de mudança de carga fosse simulada utilizando o valor de $h = 0,004$, ocorreria a inversão de potências decorrente do próprio transitório, mas nos passos subsequentes da aplicação da metodologia o sistema entraria em equilíbrio muito mais rapidamente, sem que ocorressem mais inversões de potência e fazendo-se uso de impedâncias virtuais menores, conforme mostra a Figura 45. Nessa simulação, a mudança de carga foi realizada entre 24 e 25 minutos e não entre 8 e 9 minutos, como no caso anterior, a fim de que ocorresse em um momento em que as potências reativas já estivessem próximas entre si, preservando a semelhança transitória com o caso anterior. Evidentemente, o menor valor de h utilizado retarda o processo de correção.

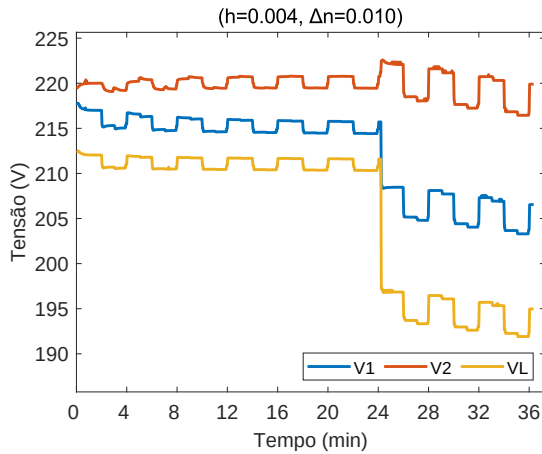
Figura 44 – Resultados de Q e impedância virtual para simulação no patamar de carga alto.



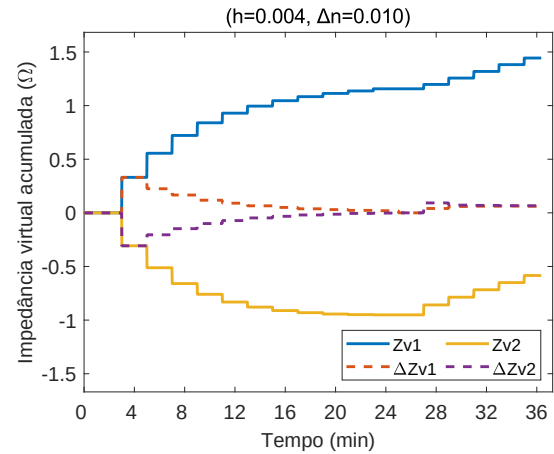
Fonte: O autor (2024).

Figura 45 – Simulação com mudança de carga entre 24 e 25 minutos com aplicação do critério $|Z + \Delta Z|$ utilizando o valor de h do patamar de carga alto.





(c) Tensões - Impedância genérica.

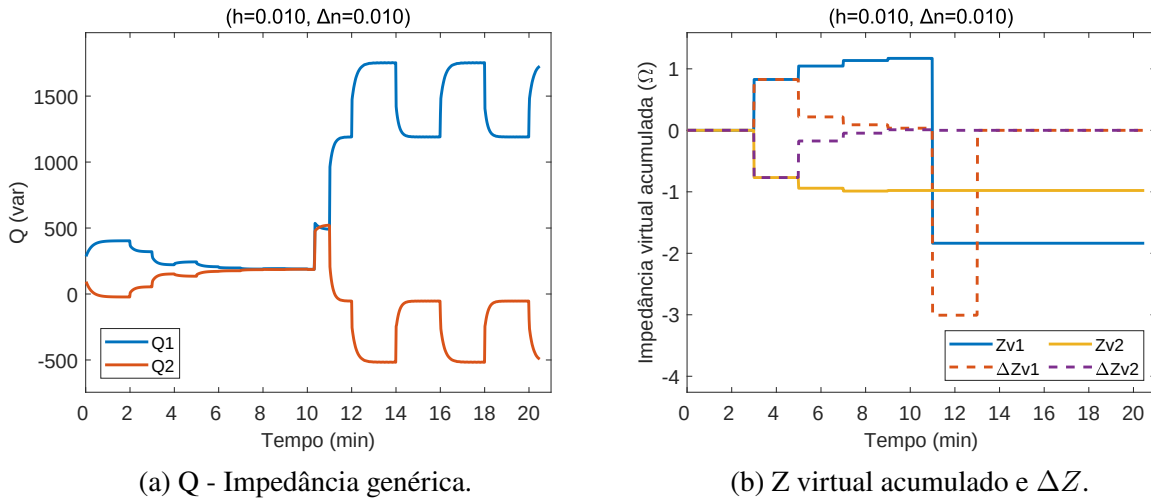
(d) Z e $\Delta Z_{virtual}$ - Impedância genérica.

Fonte: O autor (2024).

Embora seja suficiente para limitar a variação de impedância numa dada faixa estabelecida, o critério $|Z + \Delta Z|$ por si só não é capaz de sanar todos os problemas que podem ser decorrentes de uma mudança de carga. Conforme a Figura 21 e a discussão que se seguiu sobre a periodicidade das perturbações de n no início deste capítulo, a mudança de carga exemplificada entre 8 e 9 minutos ocorre em um momento em que o valor de n se encontra no estado original, já que 8 deixa resto 0 na divisão por 4. Nesses intervalos, o valor da constante k da Equação (75), é positivo, de modo que um aumento de carga provocará um cálculo de ΔZ também positivo. Entretanto, se a mudança de carga ocorresse entre 10 e 11 minutos, por exemplo, n estaria em seu estado aumentado e k valeria -1, de modo que o aumento de carga provocaria cálculo de ΔZ negativo para ambos os conversores. Essa situação pode não ser identificada pelo critério $|Z + \Delta Z|$ na hipótese de que, pelo menos para um dos conversores, o valor da soma ainda esteja dentro da faixa estabelecida, por mais que seja inapropriado somar a variação de impedância ocasionada pela mudança de carga. É isso exatamente o que acontece na situação mostrada na Figura 46, uma vez que a impedância virtual do conversor 1 era positiva e após a mudança de carga passa a ser negativa, mas ainda dentro dos limites permitidos. Essa inversão causada é notadamente prejudicial ao processo e, como se não bastasse, no novo estado atingido, com a variação de potência reativa provocada pela variação de n , não é possível calcular uma impedância virtual que não exceda a faixa estabelecida de $|Z + \Delta Z| = 3 \Omega$, de modo que o sistema permanece oscilando sem conseguir corrigir seu compartilhamento.

Como uma maneira de contornar a situação apresentada, pode-se utilizar aliado ao critério $|Z + \Delta Z|$ um critério sobre o próprio valor absoluto da variação de impedância, denominado de critério $|\Delta Z|$. Ou seja, haverá não somente um valor máximo para a impedância virtual acumulada, mas também um valor máximo para a própria variação de impedância. Isso impediria o acréscimo do valor negativo exagerado na situação da Figura 46b, por exemplo, evitando o problema mostrado. Ainda assim, no evento de uma mudança de carga mais branda, possibilidade inclusive muito mais próxima da realidade que os exemplos exagerados mostrados até então,

Figura 46 – Resultados de Q e impedância virtual para simulação com mudança de carga entre 10 e 11 minutos somente com a aplicação do critério $|Z + \Delta Z|$.



Fonte: O autor (2024).

pode ser que nem um critério nem o outro sejam capazes de atuar corretamente. É preciso ter em mente que o valor limite do critério $|\Delta Z|$ não pode ser também muito pequeno, arriscando que se interrompa um passo do processo normal de correção de compartilhamento, uma vez que é plausível que nessas mudanças de carga mais brandas ocorram variações de impedância da ordem das variações normais à execução do método, mas ainda assim indesejadas. Conforme discutido, considerando-se as duas possibilidades para o valor de k , há quatro casos possíveis para as mudanças de carga que provocam cálculo de ΔZ , ou seja, realizadas entre um minuto par e um ímpar:

- Caso 1: **Aumento de carga** após um minuto par que deixa **resto 0** na divisão por 4 ($k > 0$): provoca ΔZ **positivo** para todos os conversores;
- Caso 2: **Diminuição de carga** após um minuto par que deixa **resto 0** na divisão por 4 ($k > 0$): provoca ΔZ **negativo** para todos os conversores;
- Caso 3: **Aumento de carga** após um minuto par que deixa **resto 2** na divisão por 4 ($k < 0$): provoca ΔZ **negativo** para todos os conversores;
- Caso 4: **Diminuição de carga** após um minuto par que deixa **resto 2** na divisão por 4 ($k < 0$): provoca ΔZ **positivo** para todos os conversores;

É importante salientar que, em uma situação genérica, caso não se tenha o período de perturbação de n como sendo de 4 minutos, basta realizar uma análise com o eixo do tempo normalizado pela quarta parte do período utilizado, obtendo-se as mesmas considerações. As Figuras 47 a 50 ilustram os quatro casos citados para variações de carga de 50% com relação à carga nominal, simuladas fazendo-se uso de três cargas em paralelo, cada uma com o dobro do

valor de impedância nominal. No início de cada simulação, duas dessas cargas estão conectadas, perfazendo uma impedância equivalente de valor igual ao nominal. Nos eventos de aumento de carga, basta conectar a terceira impedância, o que resultará em uma impedância equivalente com $2/3$ do valor nominal; nos eventos de diminuição, basta desconectar uma das duas impedâncias inicialmente ligadas. Evidentemente essas operações não resultarão perfeitamente em aumento e diminuição de carga de 50% porque a tensão da carga não é exatamente o valor nominal.

Sobre as tensões, é interessante observar o efeito combinado da mudança de carga e da adição de impedância virtual decorrente, mostrado na Figura 51 para cada caso. O aumento de carga provoca naturalmente uma queda nas tensões do sistema, que pode ser intensificada caso a variação de impedância virtual seja positiva, como mostra a Figura 51a, ou mitigada caso a variação de impedância seja negativa, conforme a Figura 51c. Observação análoga pode ser feita para as Figuras 51b e 51d, que mostram os efeitos de aumento de tensão decorrentes da diminuição de carga quando intensificados por um ΔZ virtual negativo, ou quando mitigados por um ΔZ virtual positivo, respectivamente.

Conforme previsto, o critério $|Z + \Delta Z|$ não atua nos casos mostrados, uma vez que os valores de impedância, apesar de afetados pelas mudanças de carga, encontram-se ainda dentro da faixa dos 3Ω previamente estabelecida. Além disso, a utilização do critério $|\Delta Z|$ fica seriamente comprometida, uma vez que o ΔZ provocado pela variação de carga tem valor semelhante ao do primeiro passo do método de correção de compartilhamento, conforme, por exemplo, a Figura 47d, de forma que correria-se o risco, com o uso de um limite restritivo para esse critério, de impossibilitar a execução normal da metodologia, situação que pode se tornar ainda mais proibitiva para variações de carga menores. Está clara, então, a necessidade de desenvolver alguma maneira de identificar de fato a mudança de carga, e não apenas de interpretar sua consequência sobre a impedância virtual.

Uma ideia plausível e conhecida no contexto do problema de compartilhamento de potência é a de se utilizar ferramentas de análise de sinais para interpretação, por cada conversor, do seu sinal de potência medida, utilizando uma decomposição em *Wavelets* para identificação da descontinuidade provocada pela mudança de carga (KOSARI; HOSSEINIAN, 2017; SAHEBI et al., 2023). Embora seja uma maneira bastante direta de identificação do evento, uma vez que se analisam os próprios sinais de potência, esse tipo de abordagem envolve uma certa complexidade de implementação, que pode ser evitada fazendo-se uso de um critério muito mais simples, mas que ainda atende aos objetivos pretendidos, já que não é necessário saber exatamente em que momento ocorreu a mudança de carga, mas apenas se ela ocorreu entre um minuto par e ímpar.

Aproveitando o fato de que a potência ativa é sempre bem compartilhada, é interessante avaliar o comportamento das variações de potência ativa devidas às oscilações de n , de forma semelhante ao que se realizou para estabelecer o critério de parada com base na potência reativa. Aquisitando os valores de P imediatamente antes da perturbação de n e após o transitório decorrente, espera-se que, em condições normais, se obtenha valores pequenos, devidos somente

à variação de tensão inerente ao processo, para uma diferença relativa na forma da equação

$$\Delta P_{n,rel} = \frac{P_{perturbado} - P_{anterior}}{P_{anterior}} . \quad (82)$$

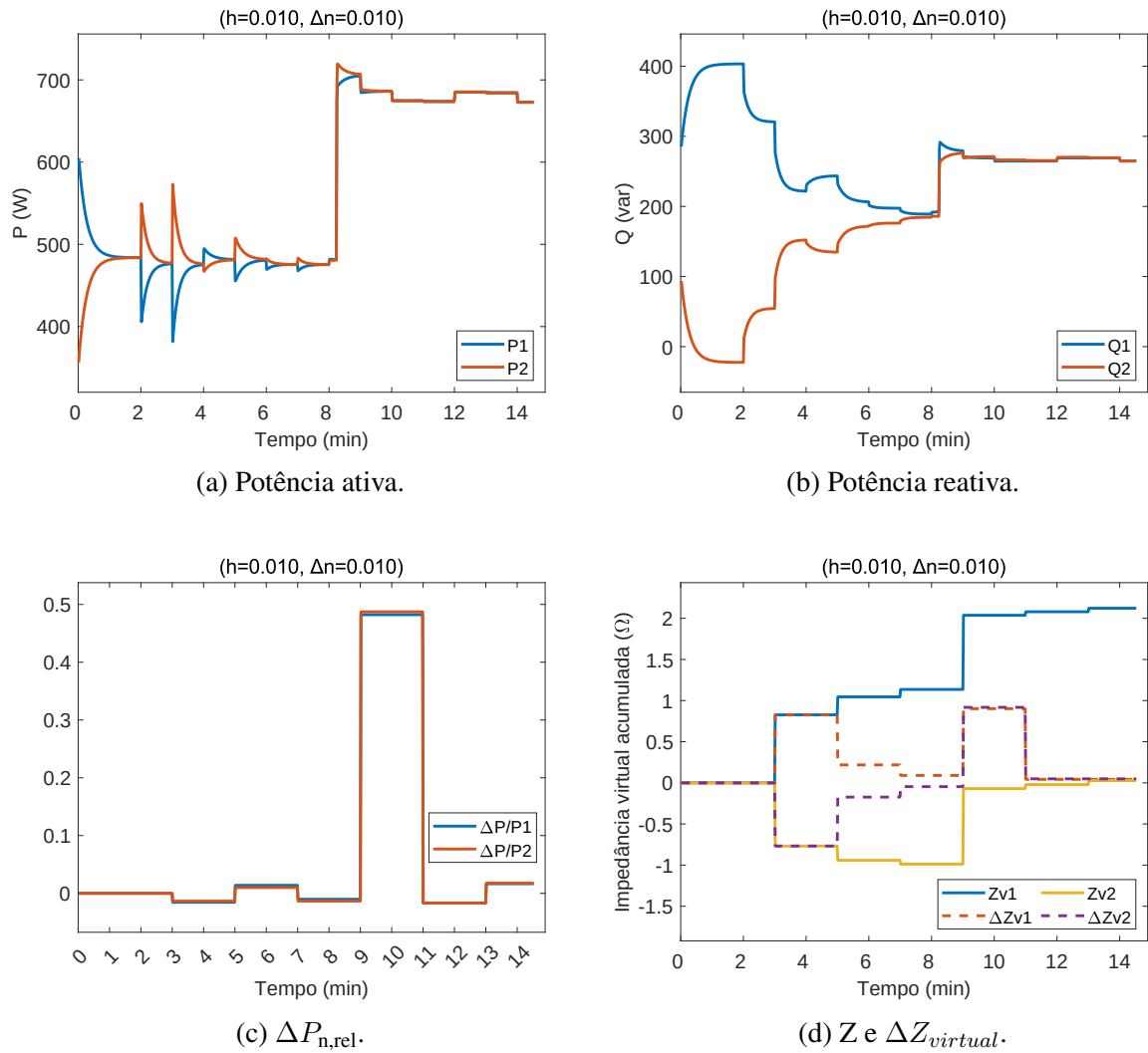
Quando ocorre uma mudança de carga entre um minuto par e ímpar, entretanto, o valor do critério estabelecido torna-se significativo e representa justamente de quanto foi a variação de carga ocorrida. É precisamente isso o que mostram as Figuras 47c a 50c. Dessa forma, pode-se utilizar o valor absoluto dessa variação relativa de P como um critério para detecção de mudança de carga, bastando, para isso, definir um valor limite acima do qual se considera que houve uma variação de carga, descartando o acréscimo de impedância virtual dela decorrente.

Com essa estratégia, adotando-se, por exemplo, um valor limite de 10%, que está bem acima dos valores normais de $\Delta P_{n,rel}$, os problemas ocorridos em todos os 4 casos são sanados, conforme as Figuras 52 a 55, que apresentam os resultados de Q e de impedância virtual para cada caso. Com a aplicação do novo critério, ao invés da adição das impedâncias virtuais após a mudança de carga, os valores de impedância acumulada permanecem constantes, retomando-se a operação normal nos passos subsequentes, conforme mostrado. Essa abordagem torna desnecessária a aplicação dos critérios $|\Delta Z|$ e $|Z + \Delta Z|$ para detecção de mudança de carga, embora ainda se possa manter o último para a finalidade de evitar instabilidades. Mesmo que o critério de $\Delta P_{n,rel}$ seja bem definido e de fácil aplicação, ao contrário de seu análogo para a potência reativa, há um pequeno detalhe que possibilita, em um caso bastante específico, que haja detecção de variação de carga não simultânea entre os conversores.

Um olhar atento para as figuras que mostram a variação relativa de P discerne que há uma pequena diferença entre os valores calculados para cada conversor. Se a mudança de carga ocorrida corresponder a um valor tal que o valor limite do critério escolhido fique entre os valores calculados para os conversores, haverá detecção de variação de carga por um, mas não pelo outro. Essa possibilidade é muito remota, dada a proximidade entre os valores calculados, mas, ainda assim, possível de acontecer. Mesmo assim, escolhendo um valor limite baixo, como 10%, caso isso ocorra, haverá adição de uma impedância indesejada em um dos conversores, mas cujo valor é pequeno, o que não constitui um grande problema, dado que qualquer desbalanço de potência causado será corrigido nos passos subsequentes.

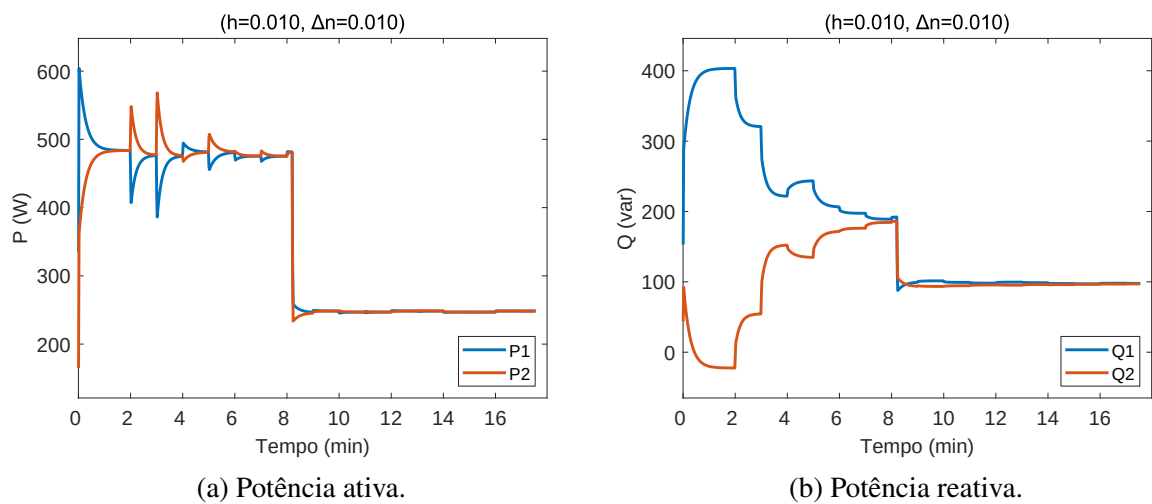
Uma vez definidos os critérios de parada e de detecção de mudança de carga, pode-se esquematizar a sequência de passos de operação contínua do método QZ por meio do fluxograma mostrado na Figura 56. Esse fluxograma também se aplica, analogamente, ao entendimento das variantes metodológicas propostas na próxima seção.

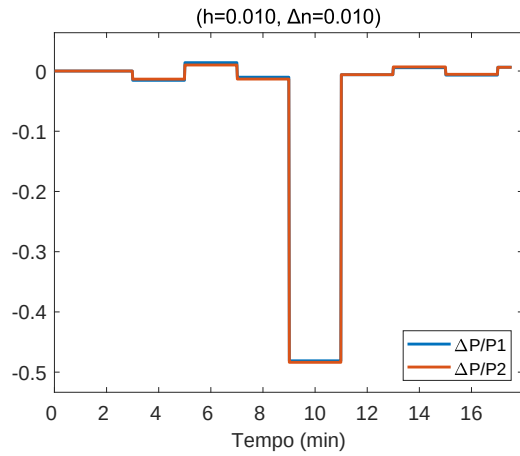
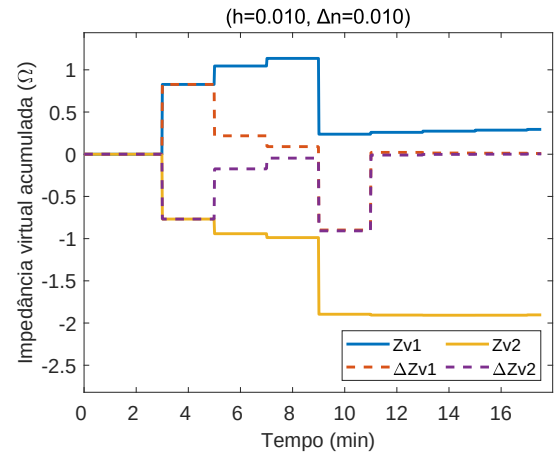
Figura 47 – Simulação com aumento de carga de 50% entre 8 e 9 minutos (caso 1).



Fonte: O autor (2024).

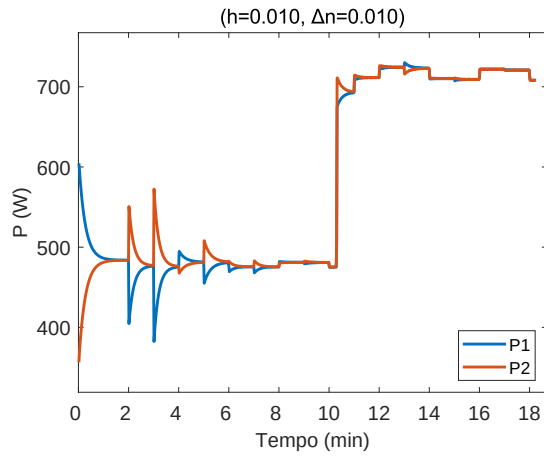
Figura 48 – Simulação com diminuição de carga de 50% entre 8 e 9 minutos (caso 2).



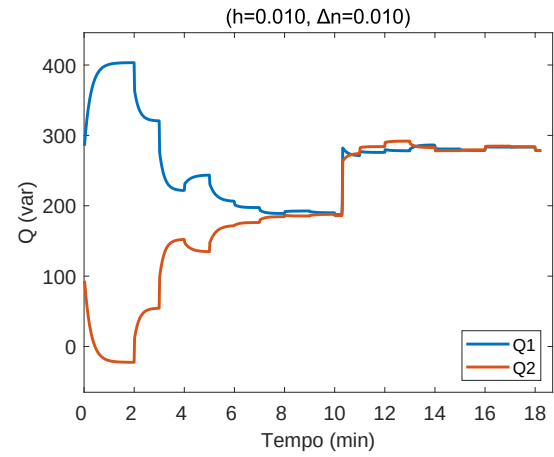
(c) $\Delta P_{n,rel.}$ (d) Z e $\Delta Z_{virtual.}$

Fonte: O autor (2024).

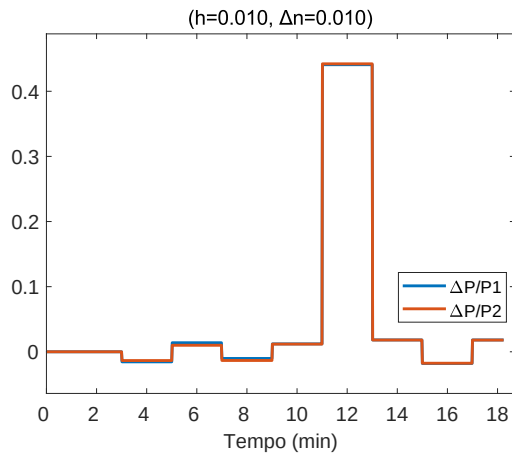
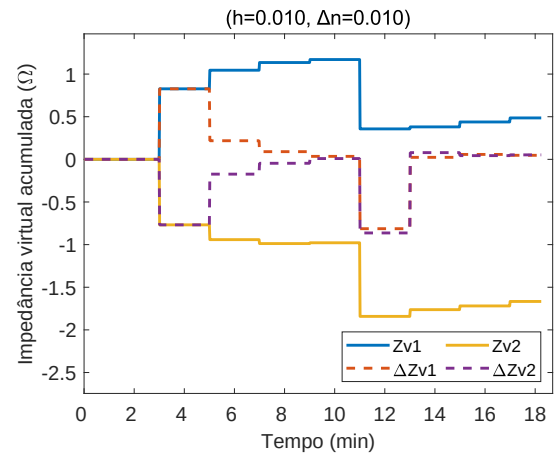
Figura 49 – Simulação com aumento de carga de 50% entre 10 e 11 minutos (caso 3).



(a) Potência ativa.

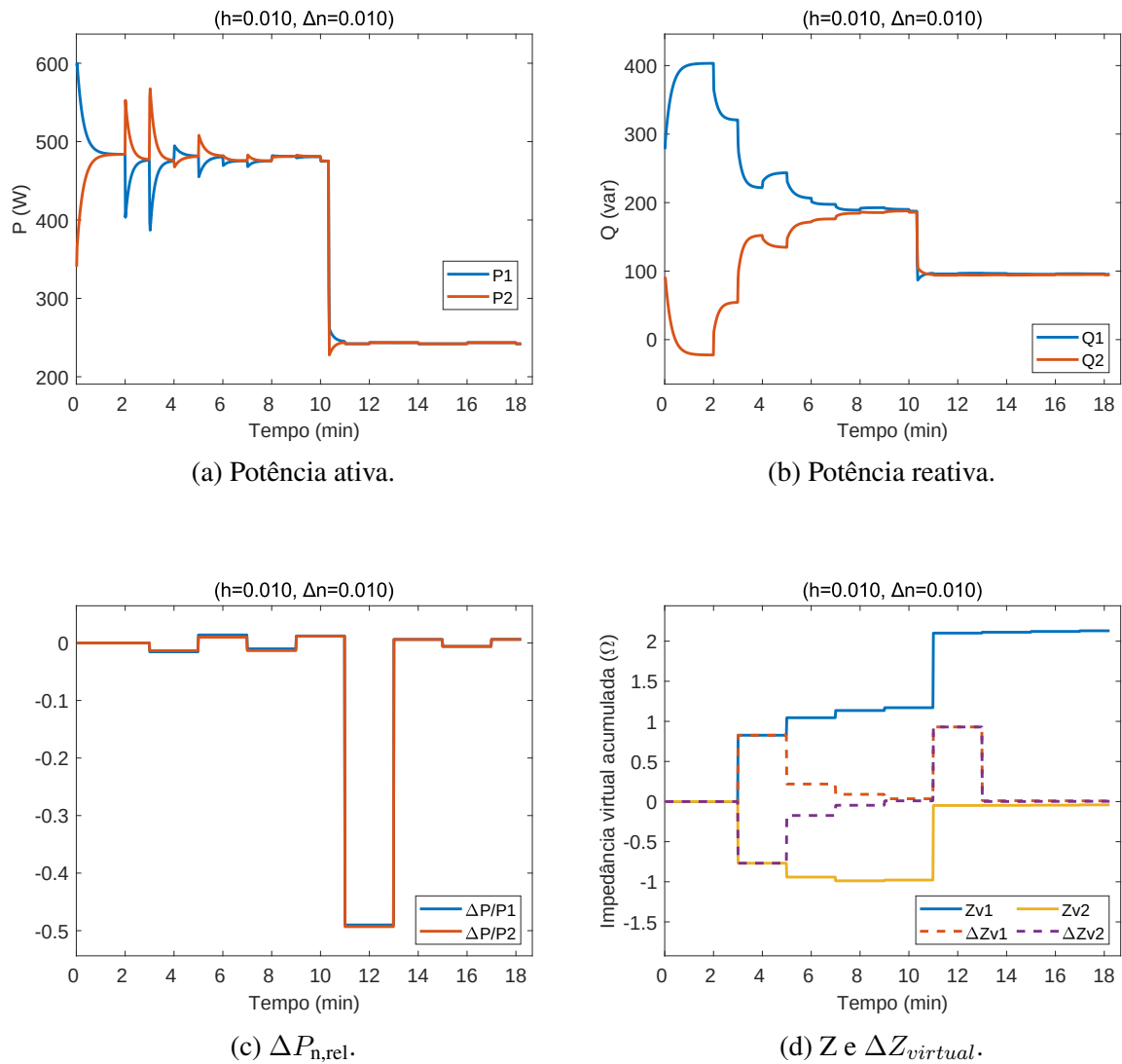


(b) Potência reativa.

(c) $\Delta P_{n,rel.}$ (d) Z e $\Delta Z_{virtual.}$

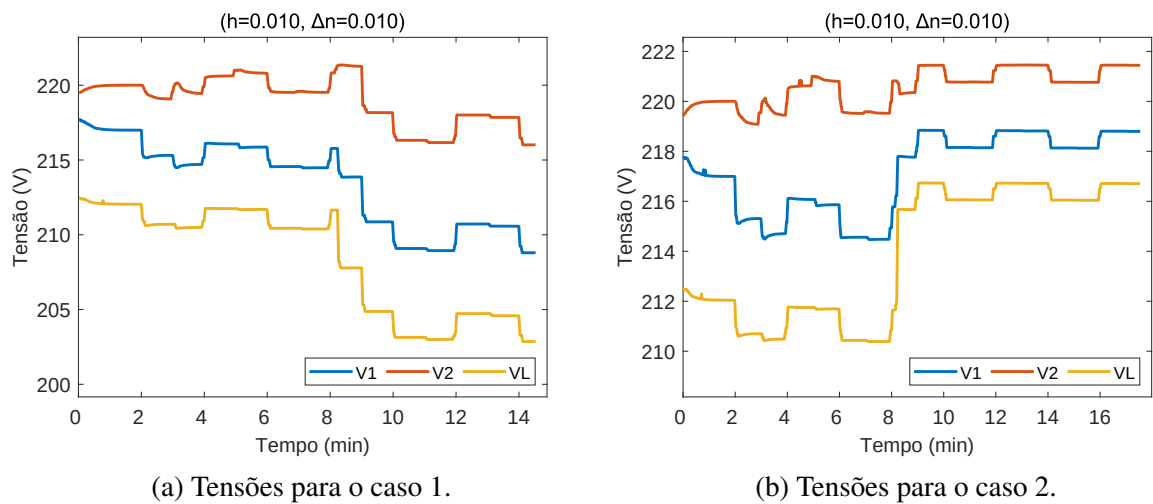
Fonte: O autor (2024).

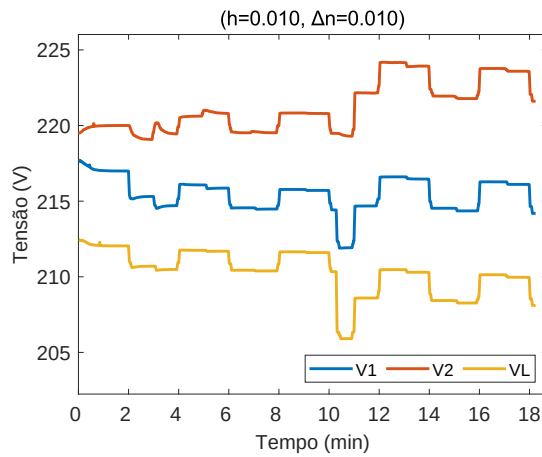
Figura 50 – Simulação com diminuição de carga de 50% entre 10 e 11 minutos (caso 4).



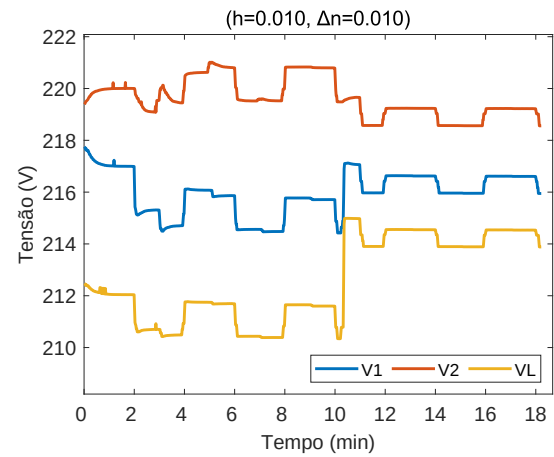
Fonte: O autor (2024).

Figura 51 – Tensões para os quatro casos de variação de carga.





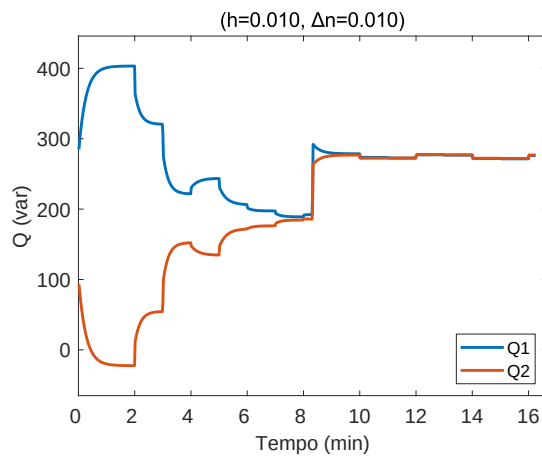
(c) Tensões para o caso 3.



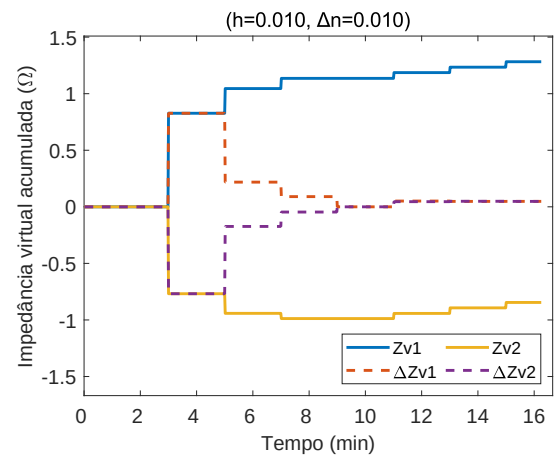
(d) Tensões para o caso 4.

Fonte: O autor (2024).

Figura 52 – Aplicação do critério $\Delta P_{n,rel}$ para o caso 1.

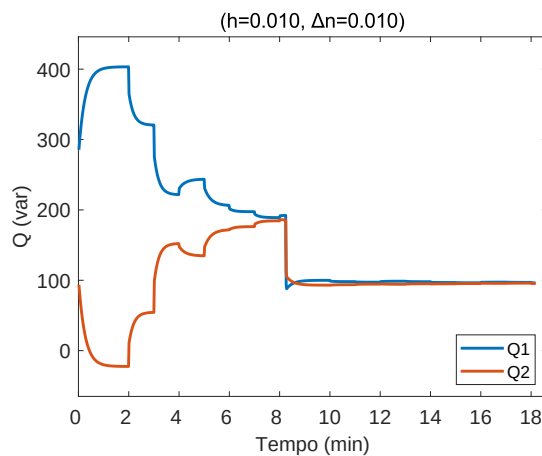


(a) Potência reativa.

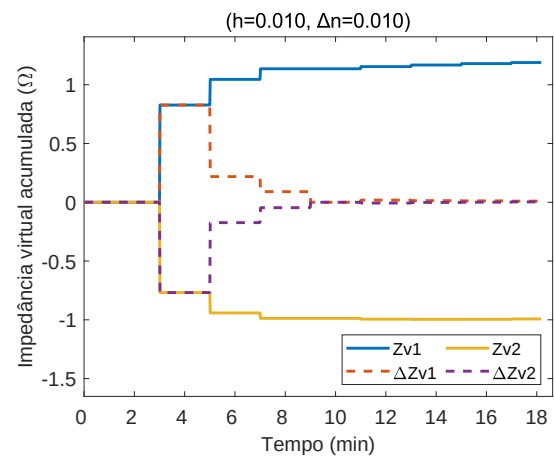
(b) Z virtual acumulado e ΔZ .

Fonte: O autor (2024).

Figura 53 – Aplicação do critério $\Delta P_{n,rel}$ para o caso 2.

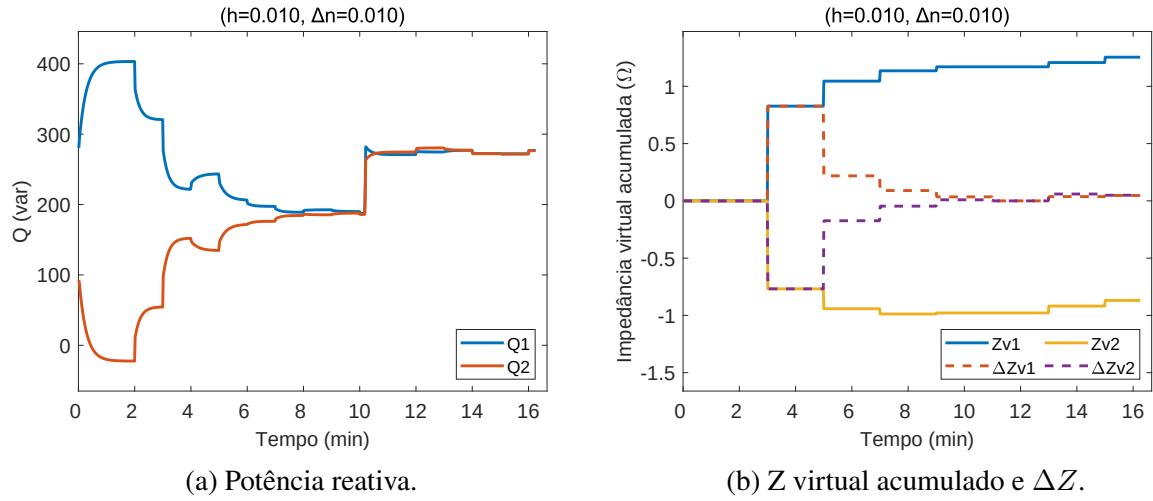


(a) Potência reativa.

(b) Z virtual acumulado e ΔZ .

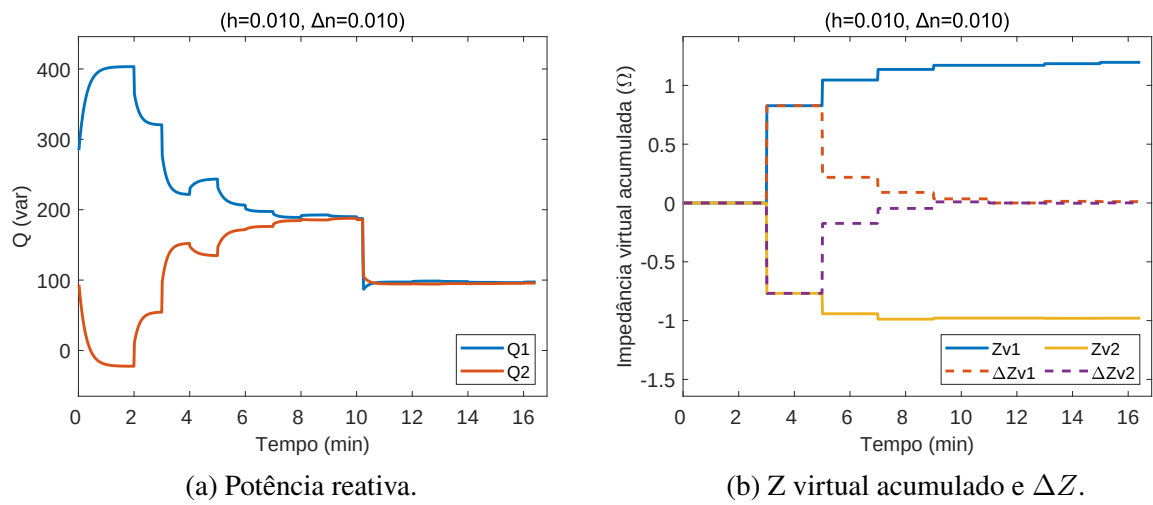
Fonte: O autor (2024).

Figura 54 – Aplicação do critério $\Delta P_{n,rel}$ para o caso 3.



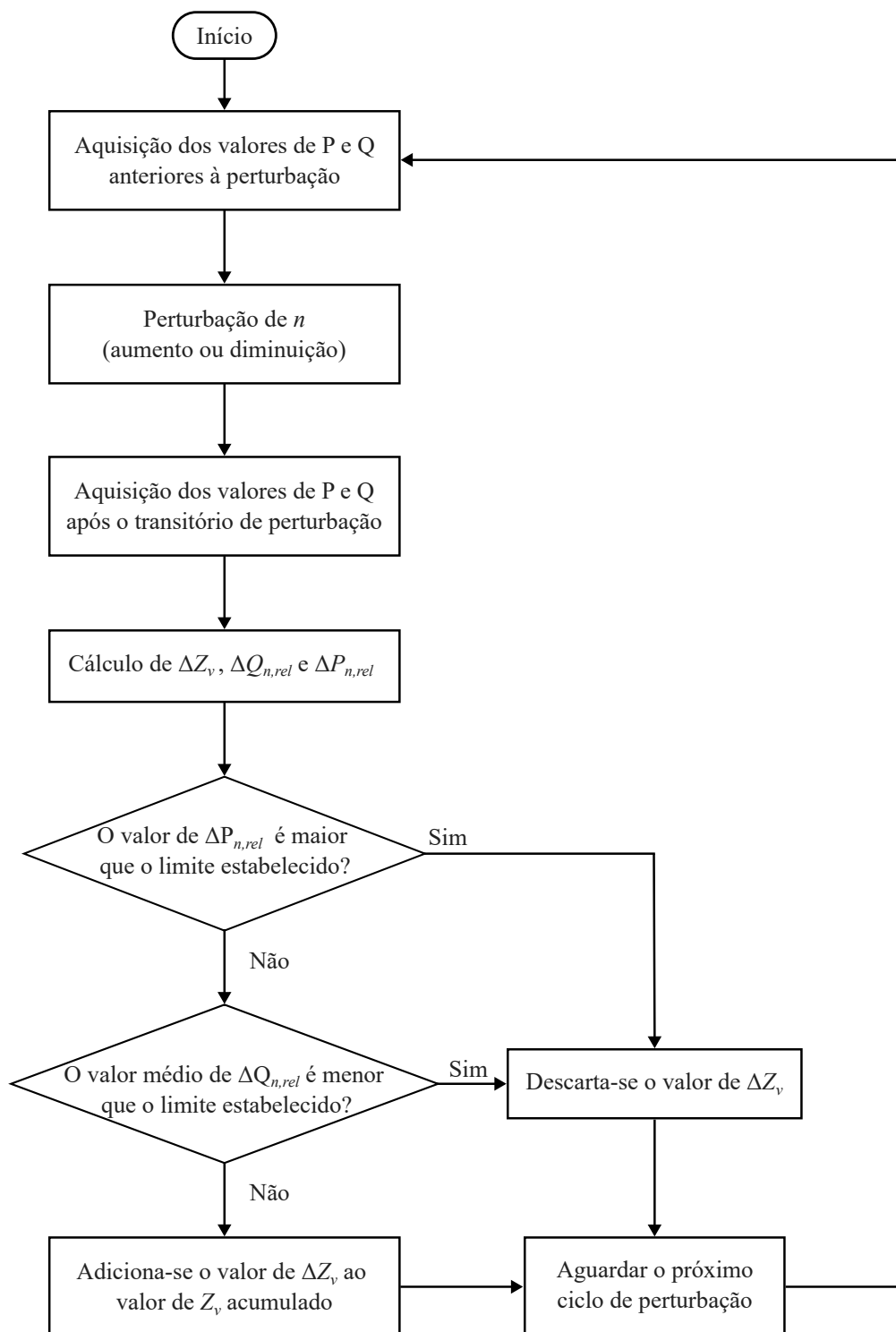
Fonte: O autor (2024).

Figura 55 – Aplicação do critério $\Delta P_{n,rel}$ para o caso 4.



Fonte: O autor (2024).

Figura 56 – Fluxograma do método de correção de compartilhamento de potência baseado na perturbação de n



3.2 VARIANTES DO MÉTODO DE CORREÇÃO DO COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA A PARTIR DA PERTURBAÇÃO DE n

Após a discussão teórica realizada no Capítulo 2 e a exploração metodológica no contexto de simulação realizada nas seções anteriores deste capítulo, dispõe-se de embasamento suficiente para propor variantes do método QZ. Embora tenha sido possível reinterpretar a formulação original, aperfeiçoando o entendimento sobre a impedância virtual adicionada, e sanar as dificuldades encontradas com relação a instabilidades, quedas de tensão e mudanças de carga durante a execução do método, ainda há possibilidades a serem exploradas, a partir de uma generalização da ideia central do método QZ. Antes de tudo, esse método tem como objetivo introduzir modificações na equação do *droop* $Q - V$ por meio do cálculo de uma variação paramétrica, a partir da perturbação de n . Ou seja, perturbar o equilíbrio do sistema para discernir quais modificações precisam ser feitas objetivando um compartilhamento de potência reativa balanceado. Da forma como originalmente proposto em Wu, Zhang e Zhan (2023), essas modificações são realizadas pela adição de um termo extra à equação *droop*, melhor entendido como sendo o produto de uma impedância virtual e da corrente eficaz entregue pelo conversor, conforme já discutido. Não necessariamente, entretanto, precisa-se utilizar dessa formulação para modificar o sistema. Pode-se escrever a mesma equação (75) para o cálculo da variação de um parâmetro genérico, denominado por ρ na equação

$$\Delta\rho_s = k h \Delta Q_{n,s} . \quad (83)$$

À luz da discussão realizada no tópico especial da Seção 2.2, que versa sobre a possibilidade de manipular as retas *droop* $Q - V$ sem compromisso com a proporcionalidade entre os coeficientes n , pode-se propor que o parâmetro modificado a partir da perturbação de n seja ele próprio, constituindo, dessa forma, uma primeira abordagem que pode ser utilizada para responder qual o conjunto de valores de n que resulta em compartilhamento equilibrado de potência, pergunta deixada ao final da Seção 2.2. Essa ideia é explorada na Seção 3.2.1. Além dela, também se verifica, na Seção 3.2.2, a possibilidade de correção do compartilhamento de potência por modificação da tensão V_0 do *droop* $Q - V$, quando expresso no formato estabelecido na Equação (44). Por fim, propõe-se na Seção 3.2.3 uma variante bastante semelhante à original, mas com uma implementação instantânea das modificações paramétricas calculadas, o que melhora sobremaneira o desempenho do método com relação às instabilidades decorrentes de sua operação contínua. É importante que se diga, entretanto, que não se busca esgotar o tema, apresentando todas as possibilidades advindas da generalização proposta, as quais são múltiplas, especialmente se levado em conta a grande liberdade proporcionada pelo desvencilhamento das retas *droop* $Q - V$ dos conversores. Por hora, as variantes discutidas são suficientes para mostrar o vasto potencial da ideia da perturbação de parâmetros, abrindo caminho para novas discussões no contexto do problema de compartilhamento de potência reativa em microrredes, um dos objetivos deste trabalho.

3.2.1 Correção de compartilhamento de potência por modificação de n

Quando da discussão sobre a possibilidade de utilizar retas *droop* $Q - V$ com coeficientes distintos, realizada no tópico especial da Seção 2.2, foram exemplificadas, na Figura 17, duas possibilidades de conjuntos de valores de n distintos que resultavam em bom compartilhamento de potência na microrrede exemplo estudada. A obtenção desses valores, realizada empiricamente, evidenciou um comportamento consistente sobre o efeito da variação individual dos coeficientes n . Relembrando, o aumento do coeficiente n de um conversor provoca diminuição de sua potência reativa e aumento das potências reativas dos demais conversores, fato que também foi demonstrado matematicamente no desenvolvimento do tópico em questão. Ou seja, para equilibrar o compartilhamento de potência reativa, os conversores que entregam potência maior que a média devem receber acréscimos de n e os que entregam menor potência, decréscimos de n . Essa ideia é, na verdade, bastante semelhante à do método QZ, de adição de impedâncias virtuais para equilíbrio das potências reativas. De forma similar, os conversores que entregam maior potência tinham adição de impedância virtual e os conversores que entregam menor potência tinham sua impedância equivalente diminuída pela adição do termo virtual. Sendo assim, pode-se utilizar da mesma estratégia de cálculo da variação paramétrica para propor uma nova metodologia que equilibre o compartilhamento por meio de modificações no próprio n , sem a necessidade de adicionar termos extras à equação do *droop* $Q - V$, conforme a formulação proposta a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{l} V = V_0 - (n + \Delta n_{ac}) Q , \end{array} \right. \quad (84)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta n_{ac} = \sum_{s=1}^{2C} \Delta n_s , \end{array} \right. \quad (85)$$

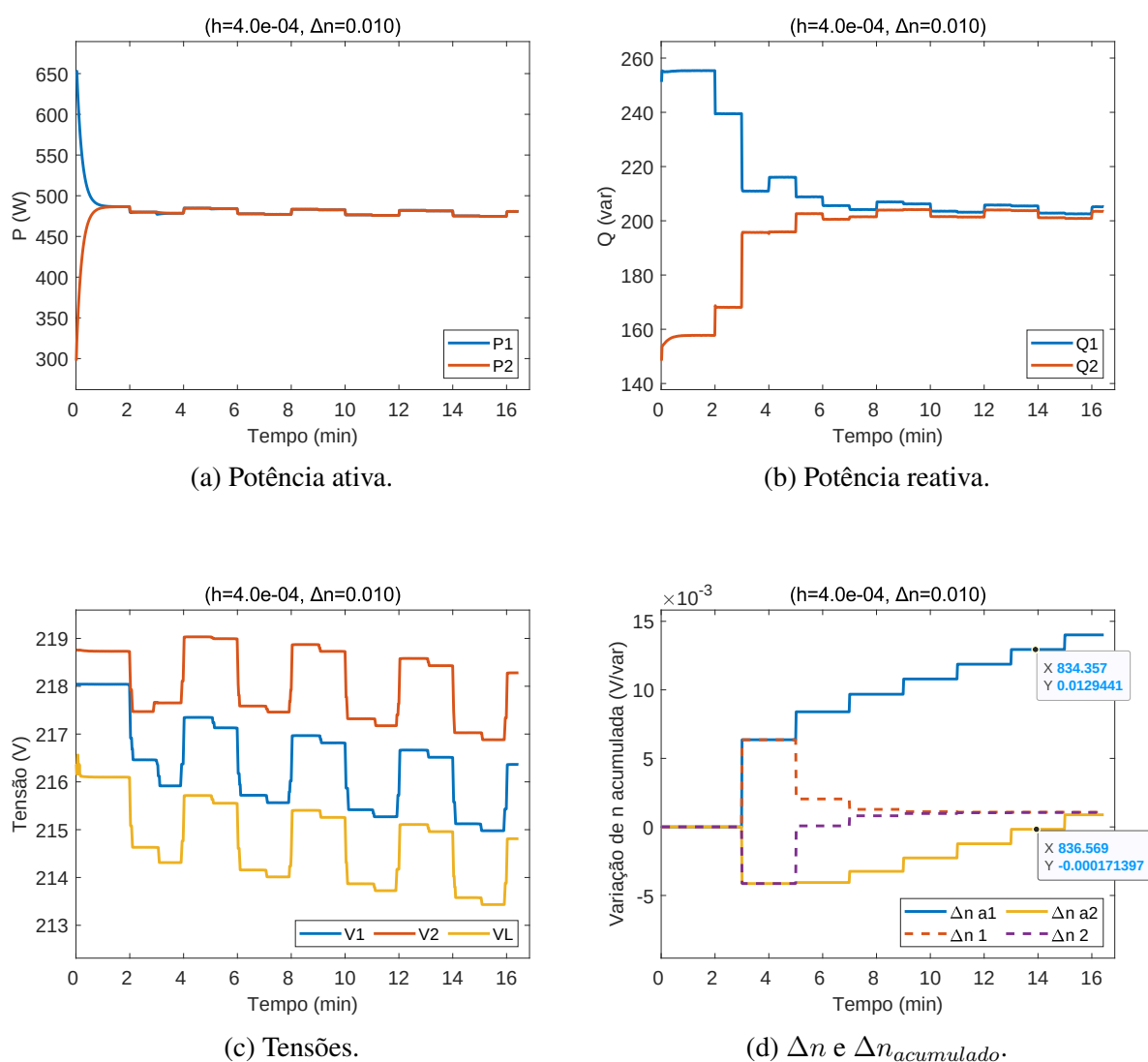
$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta n_s = k h \Delta Q_{n,s} . \end{array} \right. \quad (86)$$

Em que C é o número de ciclos completos de perturbação de n , s é o índice de um dado passo do processo e $\Delta Q_{n,s}$ é a variação de Q devida a n no s -ésimo passo. O valor de k é definido exatamente da mesma maneira que para o método QZ, conforme a Figura 21. O valor base de n é igual para os dois conversores e também oscila entre valores máximo e mínimo fixos, de forma que o efeito dessa perturbação é o mesmo observado no método original. Quando se aumenta o valor de n , ocorre diminuição de Q para os conversores que entregam em excesso. Como o valor de k nessa situação é negativo, isso resulta em um Δn positivo, que é então acrescentado ao valor base. Para os conversores que entregam menos potência, o contrário acontece, pois ocorre um aumento de sua potência reativa decorrente do aumento de n , o que corresponde a um Δn negativo. No estágio de retorno de n ao valor inicial, da mesma forma que no método QZ, ocorre a inversão dos sinais das variações de Q para cada conversor, compensada pela inversão do sinal de k , mantendo-se a consistência do sinal das variações de n calculadas.

A implementação desse novo método, denominado método Qn, é imediata, podendo-se utilizar também os mesmos critérios de parada e de detecção de mudança de carga estudados ao longo deste capítulo. Utilizando a mesma microrrede exemplo das simulações do início

do Capítulo 3, obtém-se para o caso com impedâncias puramente indutivas os resultados da Figura 57. Evidentemente, o valor de h utilizado para esse novo método é muito menor que o do original, pois agora se tratam de variações de n e não mais de impedâncias. Isso faz com que seja mais difícil alcançar um compartilhamento de potência reativa perfeito, sempre permanecendo uma pequena diferença, tal como mostrado na Figura 57b. Quando os valores das potências se aproximam o suficiente, as variações de n calculadas para cada conversor tornam-se muito próximas entre si, não oferecendo ganhos significativos com relação à aproximação entre essas potências.

Figura 57 – Simulação com o método Qn para o caso com impedâncias puramente indutivas.



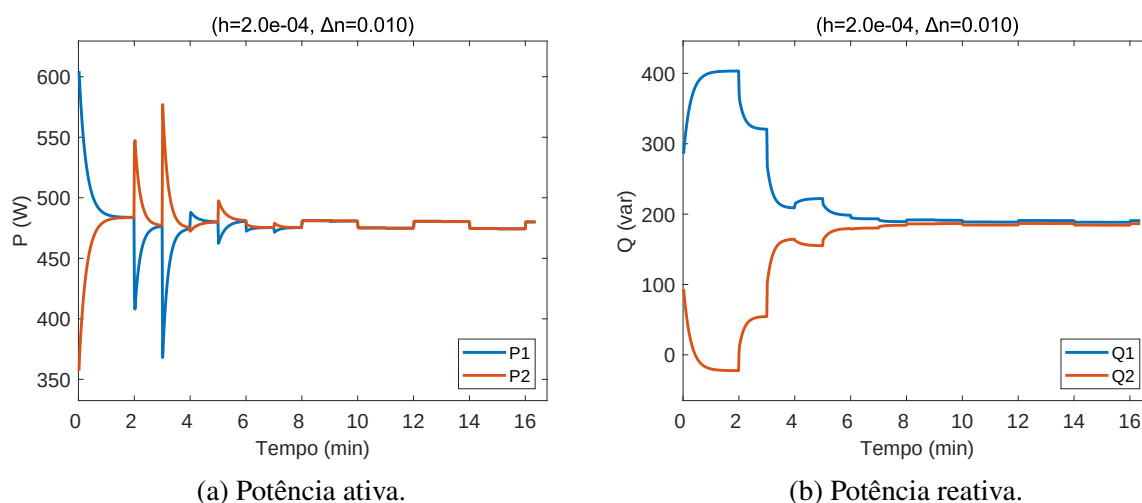
Fonte: O autor (2024).

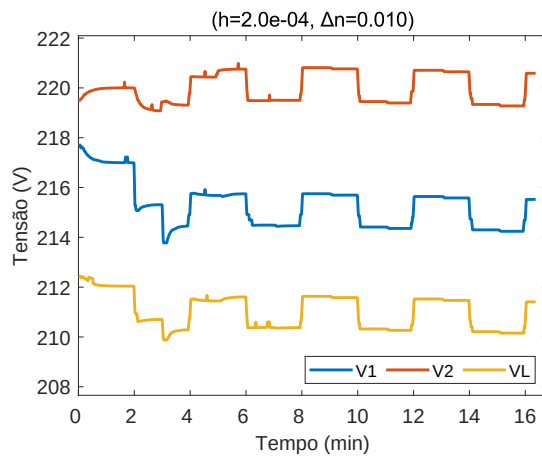
Na Figura 57d estão destacados os valores de Δn_{ac} de um ponto de operação próximo ao mostrado na Figura 17a, com o valor total no nível mais baixo de n correspondendo a $n_1 \approx 0.023$ e $n_2 \approx 0.01$, como se tivesse sido modificado somente o coeficiente do conversor 1. Claro, há outras possibilidades de pontos de operação que resultam em compartilhamento de potência suficientemente equilibrado, tanto com os valores de Δn_{ac} para cada conversor tendo sinais

opostos quanto sendo ambos positivos, tendência que prevalece ao longo do tempo se não houver um critério de parada. Nesse aspecto, além das quedas de tensão provocadas pela operação contínua do método, assim como ocorria no caso do método QZ, existe a preocupação de que os valores de n possam eventualmente violar o intervalo de estabilidade da microrrede em questão, sendo necessário para devida aplicação desse método conhecer esses limites e implementar critérios que impeçam a violação deles, levando em conta o efeito conjunto das modificações em todos os coeficientes n . Apesar dessa ressalva, o método Qn pode ser aplicado nas mesmas situações simuladas anteriormente: para redes genéricas; puramente resistivas; e para uma situação com mais de dois conversores, conforme mostram as Figuras 58 a 60. Diferentemente do caso indutivo, para os demais casos um dos conversores fica com n total negativo, de forma que sua reta *droop* passa a ter inclinação positiva. Embora estranho, a princípio isso não é um problema, mas pode se tornar caso essa inclinação seja demasiado acentuada, violando os limites de estabilidade. É interessante analisar essa possibilidade para um caso puramente indutivo, em que se pode fazer uso de uma interpretação gráfica como a da Figura 17. É evidente, nesse caso, que se uma das retas *droop* passar a ter inclinação positiva e que seja comparável à inclinação da reta característica de impedância correspondente, o ponto de operação, definido pela interseção dessas duas retas, poderia ficar excessivamente distante do ponto de operação nominal e, num caso extremo em que as retas fossem paralelas, seria indefinido.

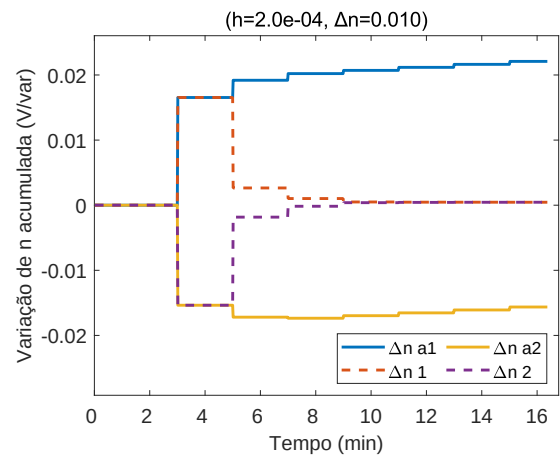
Além dessa preocupação, o método Qn apresentou para todos os casos analisados pequenas diferenças entre as potências reativas, que, embora possam ser consideradas desprezíveis com relação ao valor total dessas potências, representam erros maiores que os obtidos com o método QZ. Nada garante, entretanto, que não possam existir valores de h mais adequados que ofereçam precisão melhor no resultado de compartilhamento de potência, inclusive com a possibilidade de se utilizar valores distintos para cada conversor, conforme mostra o exemplo da Figura 61, simulado para o caso exemplo com impedância genérica.

Figura 58 – Simulação com o método Qn para o caso com impedâncias genéricas.



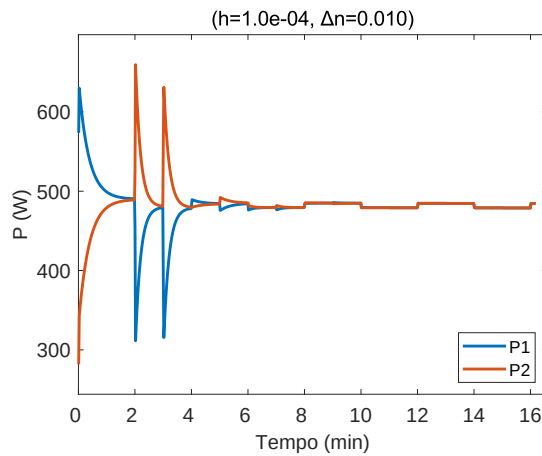


(c) Tensões.

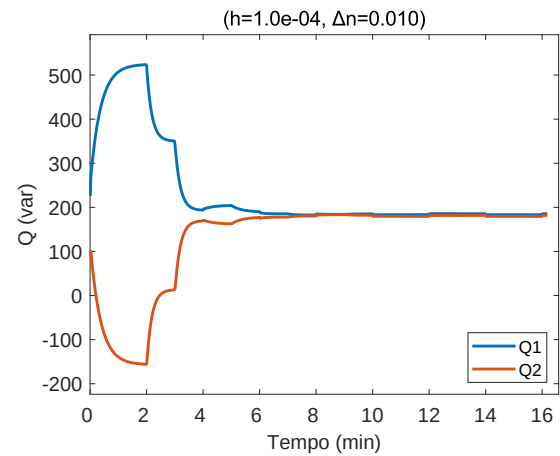
(d) Δn e $\Delta n_{acumulado}$.

Fonte: O autor (2024).

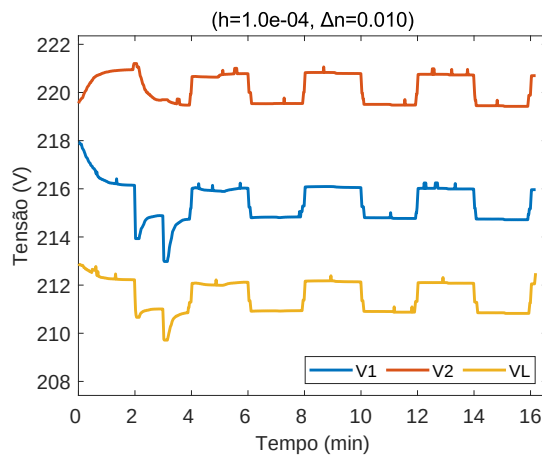
Figura 59 – Simulação com o método Qn para o caso com impedâncias puramente resistivas.



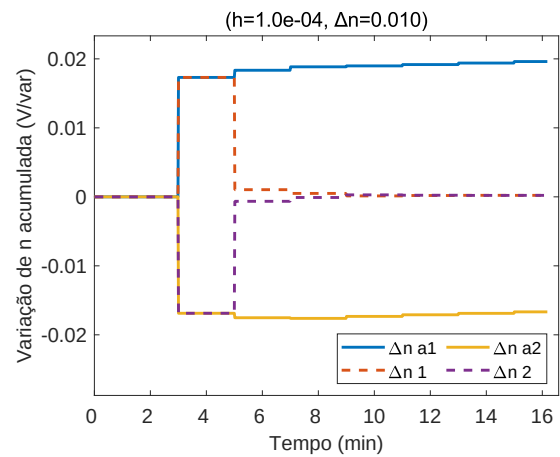
(a) Potência ativa.



(b) Potência reativa.

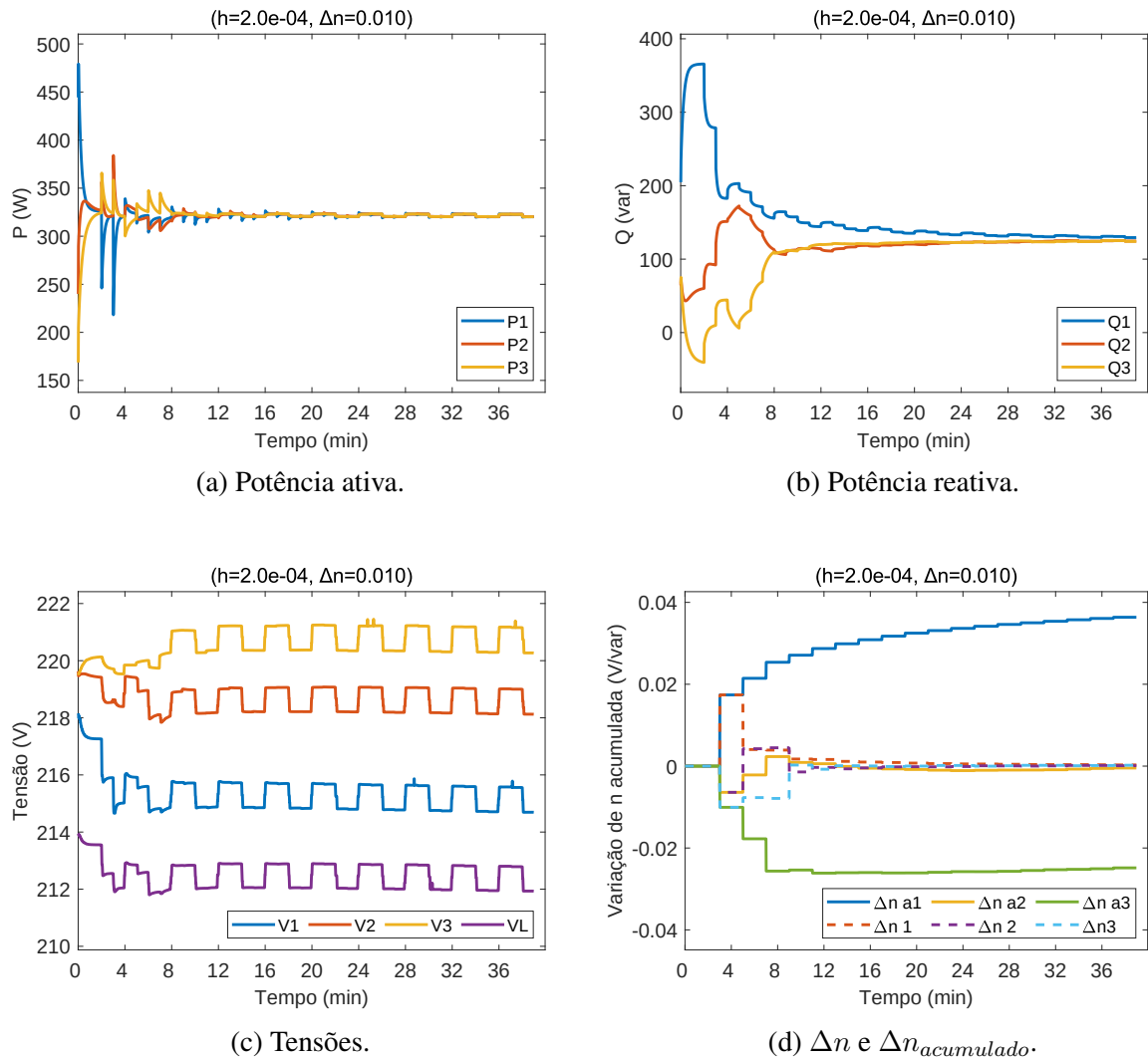


(c) Tensões.

(d) Δn e $\Delta n_{acumulado}$.

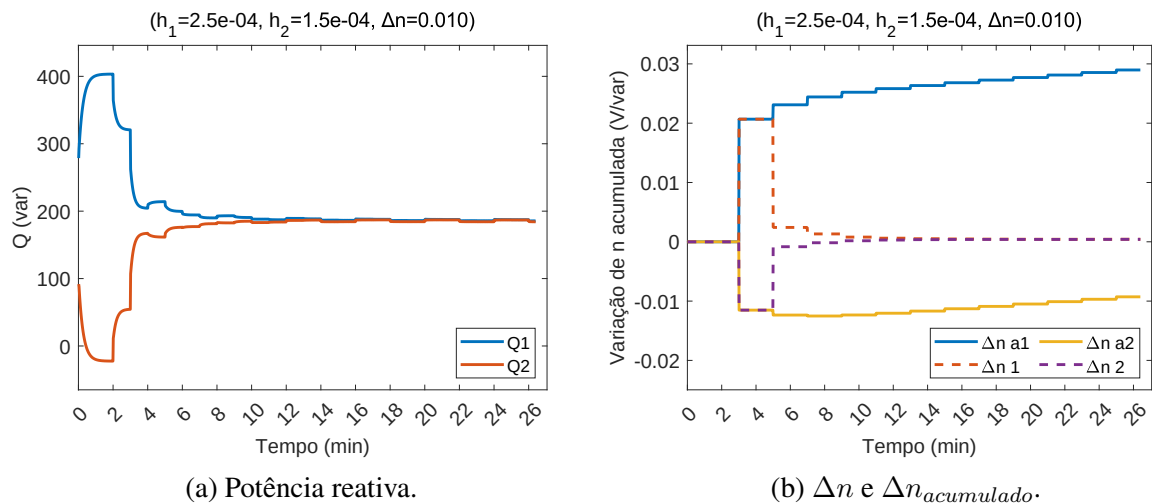
Fonte: O autor (2024).

Figura 60 – Simulação com o método Qn para o caso com 3 conversores (impedância genérica).



Fonte: O autor (2024).

Figura 61 – Aperfeiçoamento do compartilhamento de potência no método Qn com a utilização de coeficientes h distintos (impedância genérica).



Fonte: O autor (2024).

3.2.2 Correção de compartilhamento de potência por modificação de V_0

Com base na mesma premissa utilizada para idealização do método Qn, de fazer uso de perturbações de n para cálculo de uma variação paramétrica a ser adicionada na equação do *droop* $Q - V$, pode-se propor mais uma possibilidade que não necessita de termos extras: modificar a tensão V_0 . Embora não tenha sido demonstrado teoricamente, como foi para o caso das modificações de n , a modificação de V_0 pode ser utilizada consistentemente para equilibrar as potências reativas. De maneira similar às estratégias apresentadas anteriormente, os conversores que entregam potência reativa em excesso deverão ter o termo de V_0 da sua equação *droop* diminuído, enquanto os que entregam menos potência deverão sofrer aumento nesse parâmetro. Pode-se perceber isso intuitivamente, analisando a equação *droop* para uma tensão resultante e n constantes.

$$V = V_0 - n Q . \quad (87)$$

Se para um dado ponto de operação o Q do conversor é excessivo, pode-se produzir a mesma tensão desse ponto de operação com um valor de potência reativa menor se o valor de V_0 for diminuído, como se parte da parcela negativa da Equação (87) tivesse sido somada ao valor de V_0 original. Raciocínio análogo se pode aplicar ao caso em que a potência reativa é menor que o valor desejado. A esse ponto, fica claro que, na verdade, todos os métodos apresentados até então realizam o mesmo processo de adição de tensões, mas com base em variações paramétricas distintas. No método QZ a adição de impedância virtual a um conversor que entrega potência em excesso pode ser interpretada como uma queda de tensão virtual, a qual, nesse caso, é expressa pelo termo $Z_v I$ na Equação (73). Da mesma forma, para o método Qn, no caso do conversor que entrega potência em excesso, um termo negativo é adicionado à equação *droop*, dessa vez expresso em função de n e do próprio Q no termo $\Delta n_{ac} Q$, conforme a Equação (84). Para os casos em que o conversor precisa aumentar a potência entregue, os valores calculados de impedância virtual e Δn seriam negativos, invertendo o sinal do termo adicionado.

Em todos os métodos, portanto, busca-se alterar a parcela de Q na expressão (87) por meio da modificação de um dos outros dois parâmetros dessa equação, n ou V_0 , ou da adição de algum termo extra. Evidentemente, a tensão resultante após a modificação paramétrica não permanece perfeitamente constante na realidade, mas também não sofre variações significativas, conforme mostrado nas Figuras 62c a 65c. A formulação do método baseado na modificação de V_0 , denominado de método QV, é semelhante à do método Qn e é apresentada nas equações a seguir:

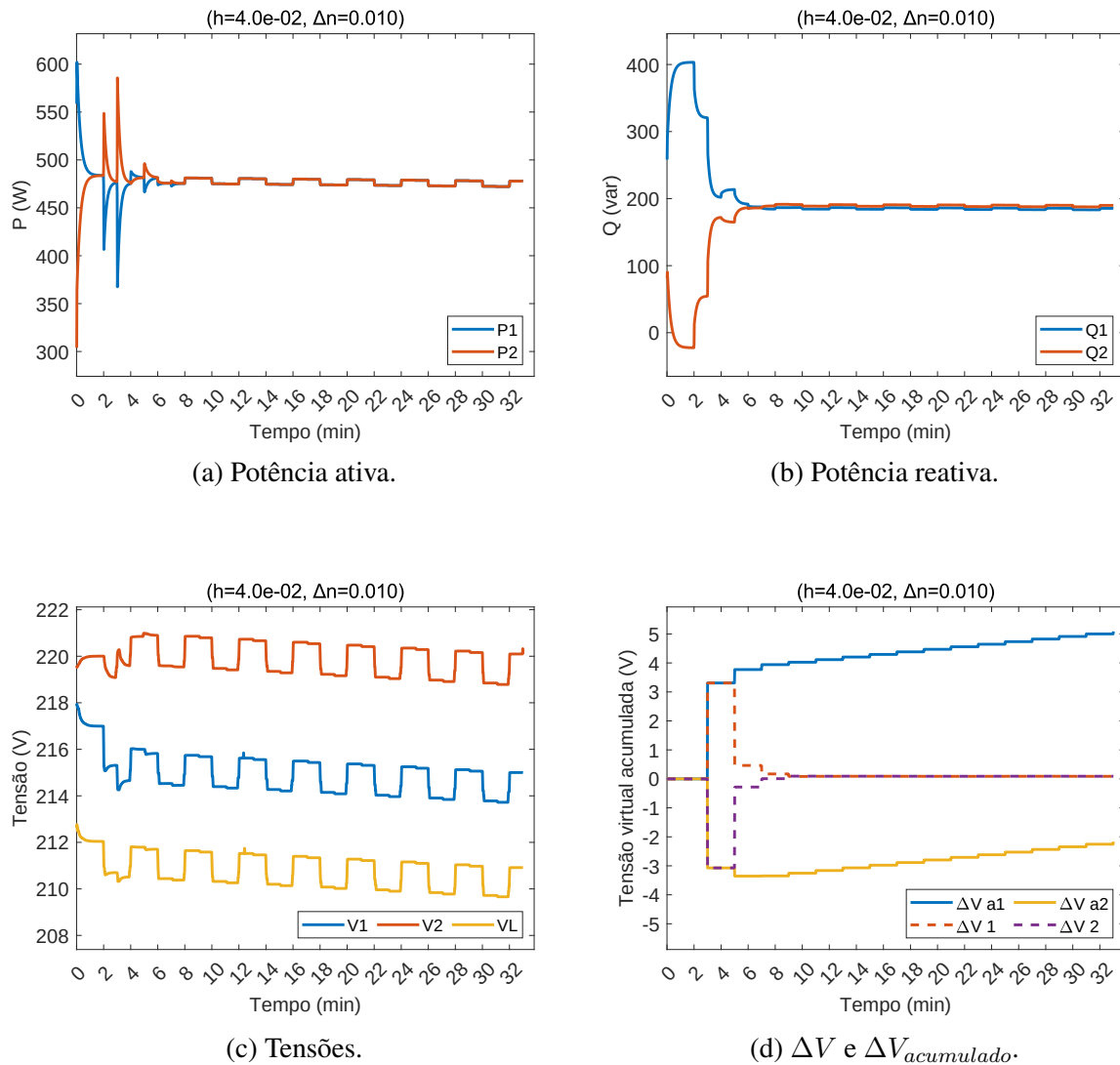
$$\left\{ \begin{array}{l} V = (V_0 - \Delta V_{ac}) - n Q , \end{array} \right. \quad (88)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta V_{ac} = \sum_{s=1}^{2C} \Delta V_s , \end{array} \right. \quad (89)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta V_s = k h \Delta Q_{n,s} . \end{array} \right. \quad (90)$$

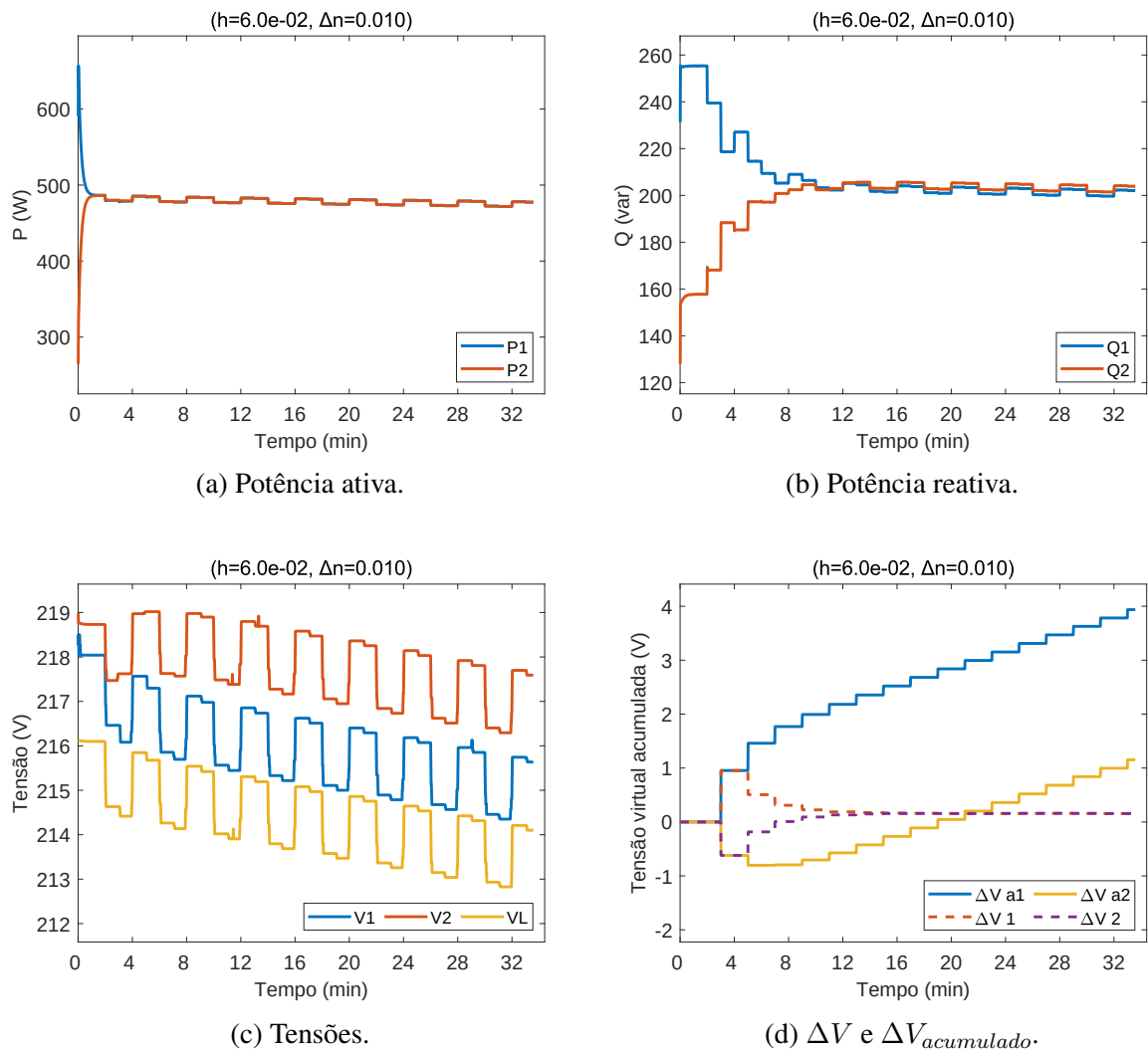
As Figuras 62 a 65 mostram os resultados de simulação para os casos com impedância genérica, puramente indutiva, puramente resistiva e para o caso com três conversores. Como era de se esperar, dado o que se discutiu sobre a equivalência dos métodos, esses resultados foram semelhantes aos obtidos para o método QZ e para o método Qn destacando-se o fato de que, assim como para o método Qn, a precisão do compartilhamento de potência também não é perfeita, ocorrendo inclusive inversões entre as potências, conforme mostrado nas Figuras 62b a 64b. Da mesma forma, também é possível escolher valores específicos de h que aumentem essa precisão do compartilhamento de potência, conforme o exemplo da Figura 66.

Figura 62 – Simulação com o método QV para o caso com impedâncias genéricas.



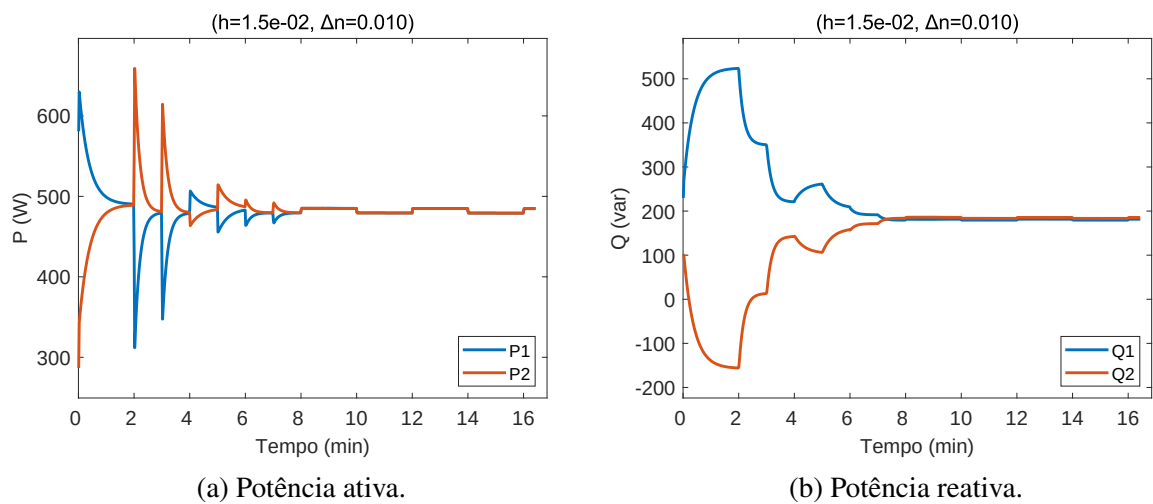
Fonte: O autor (2024).

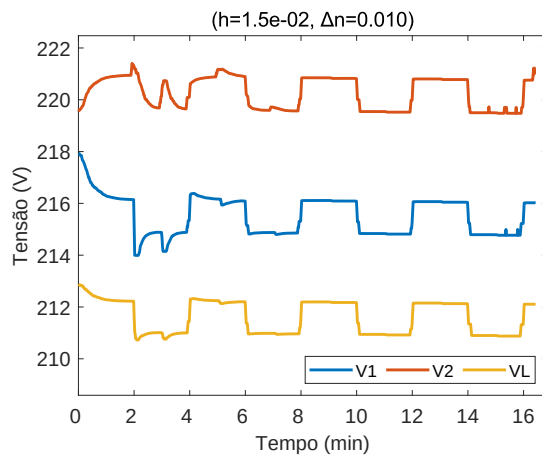
Figura 63 – Simulação com o método QV para o caso com impedâncias puramente indutivas.



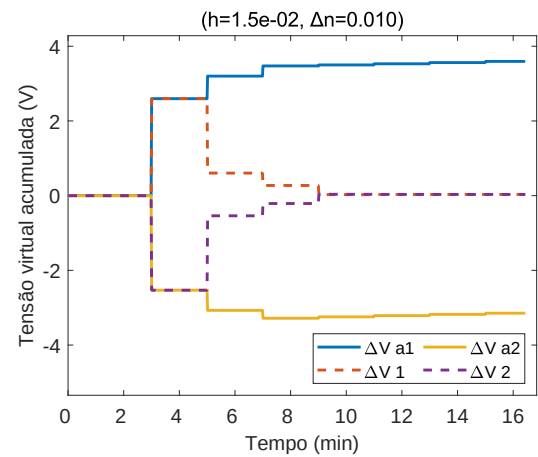
Fonte: O autor (2024).

Figura 64 – Simulação com o método QV para o caso com impedâncias puramente resistivas.



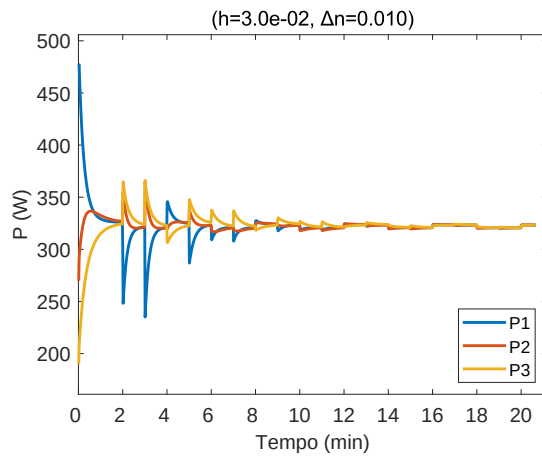


(c) Tensões.

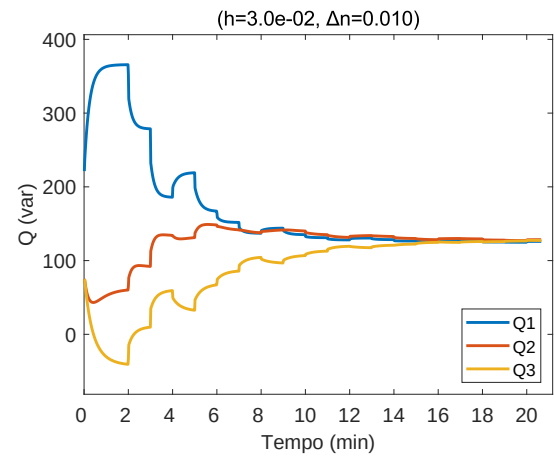
(d) ΔV e $\Delta V_{acumulado}$.

Fonte: O autor (2024).

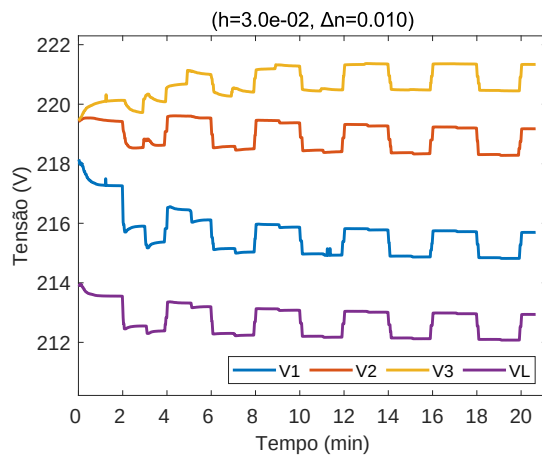
Figura 65 – Simulação com o método QV para o caso com 3 conversores (impedância genérica).



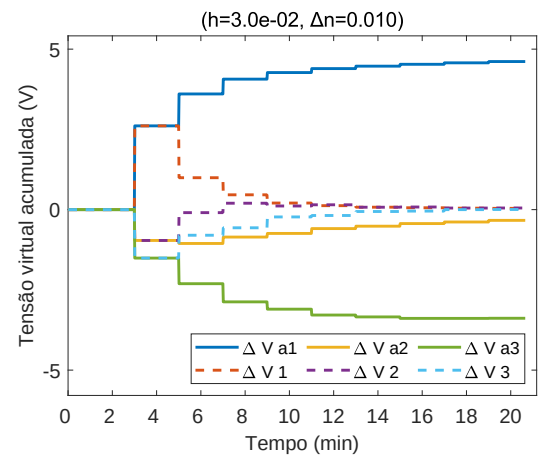
(a) Potência ativa.



(b) Potência reativa.

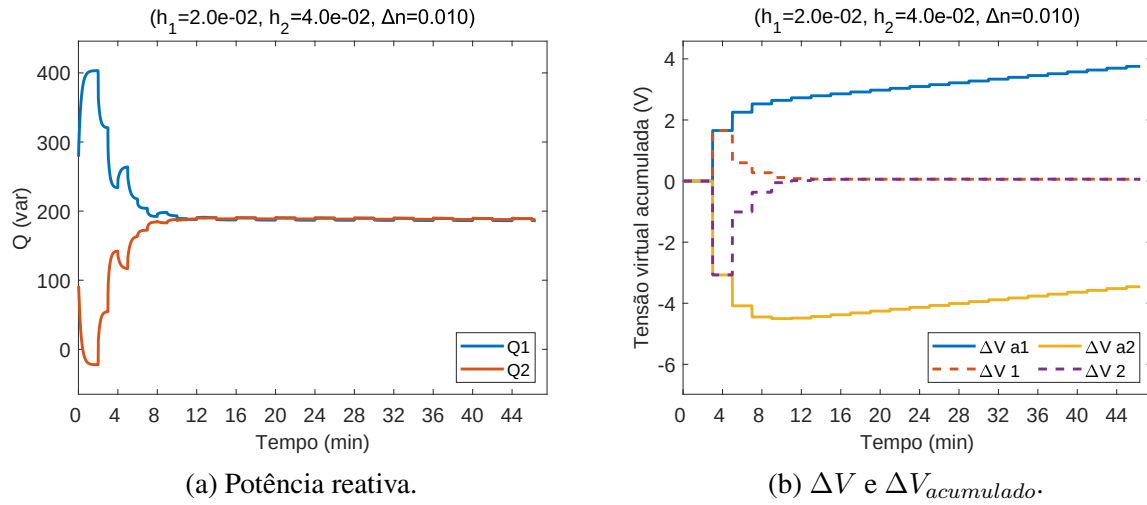


(c) Tensões.

(d) ΔV e $\Delta V_{acumulado}$.

Fonte: O autor (2024).

Figura 66 – Aperfeiçoamento do compartilhamento de potência no método QV com a utilização de coeficientes h distintos (impedância genérica).



Fonte: O autor (2024).

Com a apresentação do método QV, encerram-se as possibilidades por hora identificadas de metodologias que utilizem como premissa o ajuste de Q por meio da modificação de algum outro termo da equação *droop* ou da adição de um termo extra. Mesmo assim, ainda pode-se pensar em mais possibilidades alterando a maneira de se perturbar o sistema. Ao invés de utilizar o coeficiente n poderia-se pensar, por exemplo, em realizar perturbações em V_0 , as quais poderiam resultar em modificações no próprio V_0 , em n ou na impedância virtual. Essa ideia, entretanto, não será explorada neste trabalho, pois que se de fato for válida, provavelmente apresentará resultados semelhantes aos já obtidos. Ao invés disso, embora não se descarte totalmente investigações futuras acerca dessa ideia, é interessante analisar outra possibilidade: a de aperfeiçoar o método QZ adicionando as impedâncias virtuais de forma instantânea. Sobre essa possibilidade tratará a próxima seção.

3.2.3 Correção de compartilhamento de potência por adição de resistência virtual

Na Seção 2.3, quando da primeira apresentação do método QZ, foi criticada a formulação do conceito de impedância virtual utilizado. A adição do termo $Z_v I$ como modificação da equação do *droop* $Q - V$ guarda, inerentemente, uma restrição sobre a natureza dessa impedância, que tem, obrigatoriamente, o mesmo argumento do fator de potência entregue pelo conversor, conforme já discutido. Isso, a princípio, não é um problema, pois, como visto neste capítulo, esse método proporciona boa correção do compartilhamento de potência reativa, sendo necessário apenas atentar para o estabelecimento de critérios de parada, em caso de execução contínua, e de esquemas de detecção de mudança de carga, a fim de evitar perturbações externas à execução da metodologia. Mesmo assim, as instabilidades mostradas nas situações das Figuras 30 e 31, embora possam ser contornadas por meio de critérios que limitem a variação paramétrica, são um incômodo e denotam uma limitação no uso dessa metodologia caso os valores das impedâncias

virtuais sejam muito altos. Nada garante, por exemplo, que não possa existir uma situação em que as impedâncias virtuais necessárias à correção do compartilhamento sejam tão altas que causem instabilidades, mesmo sem a operação longa do método.

Por conta dessas insatisfações, propõe-se uma nova maneira de implementar as variações paramétricas, mas, dessa vez, sem causar nenhuma modificação na equação *droop*. Ao invés disso, adiciona-se uma tensão virtual após o gerador da referência da tensão produzida pelos *droops*, por meio da multiplicação de uma resistência virtual, calculada pelo mesmo processo utilizado até então, pela corrente instantânea entregue pelo conversor, conforme o diagrama da Figura 67. Apresenta-se abaixo a formulação matemática desse método, denominado por método QR.

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 - m P , \\ V = V_0 - n Q . \end{cases} \quad (91)$$

$$\quad (92)$$

$$\begin{cases} v^* = V \sin(\omega t) - R_v i , \\ R_v = \sum_{s=1}^{2C} \Delta R_s , \\ \Delta R_s = k h \Delta Q_{n,s} . \end{cases} \quad (93)$$

$$\quad (94)$$

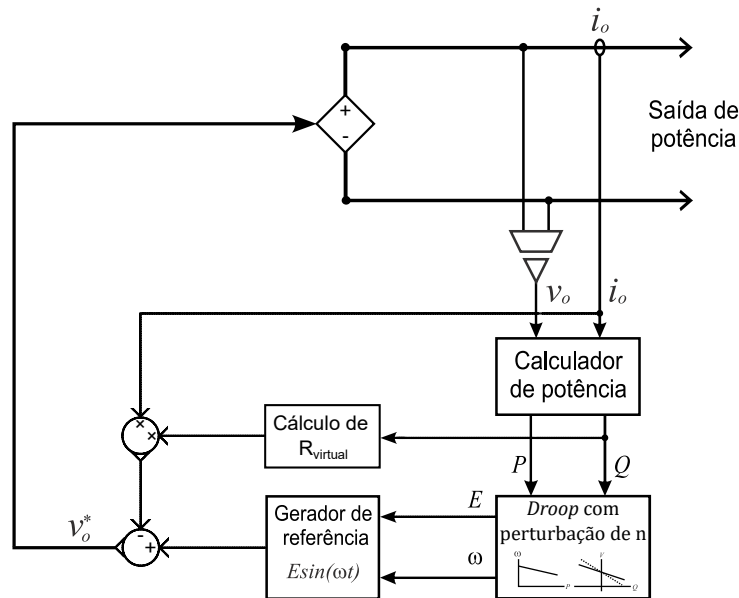
$$\quad (95)$$

Evidentemente, poderia ter sido proposto um método semelhante realizando adição de indutância virtual, ao invés de resistência. Essa alternativa foi testada, mas apresentou problemas de estabilidade após certo tempo de operação, os quais aparentemente foram causados pelo elemento derivador responsável pela definição da tensão no indutor. Sendo assim, optou-se pela adição de resistência virtual, escolha que não provocará alterações nas características das linhas, levando em conta que as microrredes de baixa tensão têm impedâncias predominantemente resistivas. É interessante observar que essas abordagens de correção de compartilhamento baseadas no cálculo de variações paramétricas a partir de perturbações no sistema somente permitem alterar um único parâmetro. No método QZ, o parâmetro é o módulo da impedância adicionada (e somente o módulo, pois não há controle sobre o argumento); no método Qn, o parâmetro é o próprio n ; no método QV, o parâmetro é o V_0 ; e no método QR é a resistência virtual. É por esse motivo, de que só se calcula uma variação paramétrica, que não se propôs a adição de uma impedância com resistência e indutância virtuais. Mesmo assim, é importante notar que, com a adição de resistência virtual, tanto o módulo como a fase da tensão resultante serão alterados, ao contrário do que acontecia no método QZ. De toda forma, a correção de compartilhamento de potência promovida pelo método QR é exitosa, não sendo necessária a utilização de valores de h distintos para obtenção de boa precisão no compartilhamento, conforme mostram os resultados das Figuras 68 a 71, respectivamente para os casos com impedância genérica, puramente indutiva, puramente resistiva e para o caso com 3 conversores.

Além de possuir uma formulação mais precisa quanto ao significado do termo virtual adicionado, o método QR também é livre das instabilidades mostradas para o método QZ

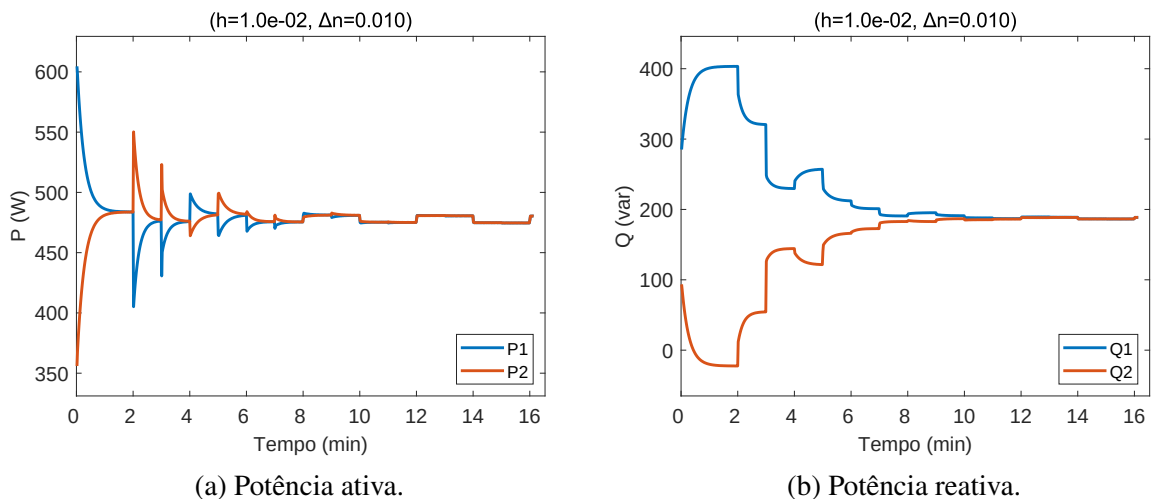
conforme atestado pela simulação da Figura 72, em que se submeteu o sistema a um aumento de carga de 3 vezes a carga nominal entre 8 e 9 minutos (sem utilização do critério de detecção de mudança de carga), mesma situação da Figura 31. Nesse caso, mesmo após o aumento artificialmente grande das resistências virtuais ocasionado pela mudança de carga, não ocorreram as instabilidades severas como no caso do método QZ. É claro que a situação mostrada não é benéfica ao sistema, de modo que se deve utilizar os mesmos critérios de parada e de detecção de mudança de carga, desenvolvidos anteriormente, para o correto funcionamento da metodologia quando aplicada de forma contínua. O critério de limitação da variação paramétrica pode ainda ser mantido, mas não é mais uma necessidade dada a ausência de instabilidades, pelo menos nos casos simulados, mesmo com resistências excessivas.

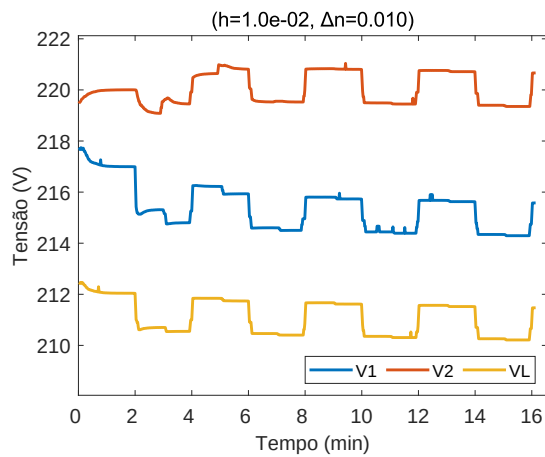
Figura 67 – Controle do conversor com as modificações do método QR.



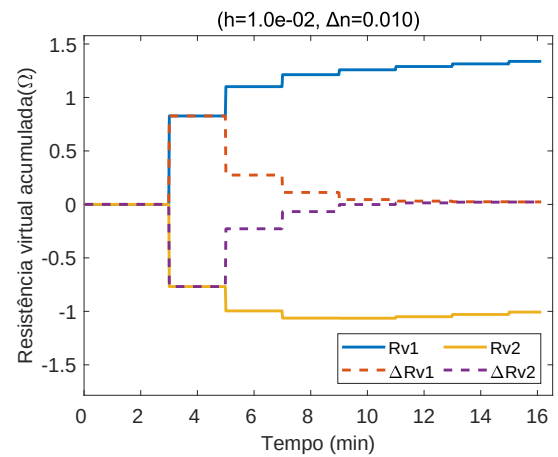
Fonte: O autor (2024).

Figura 68 – Simulação com o método QR para o caso com impedâncias genéricas.



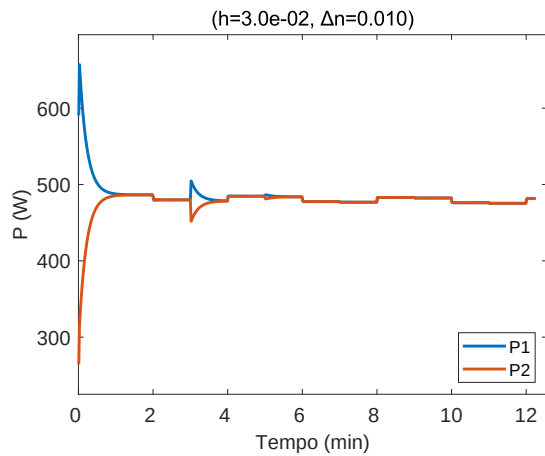


(c) Tensões.

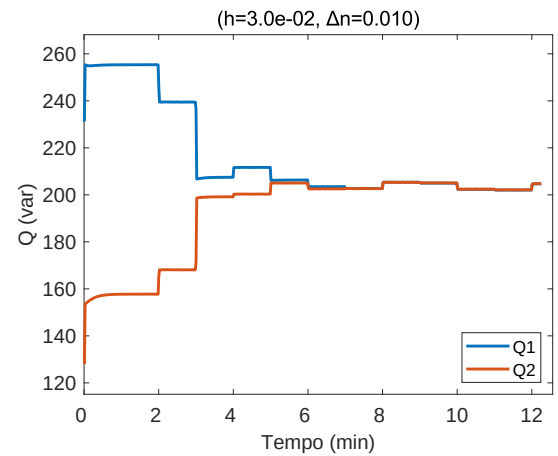
(d) ΔR_v e R_v .

Fonte: O autor (2024).

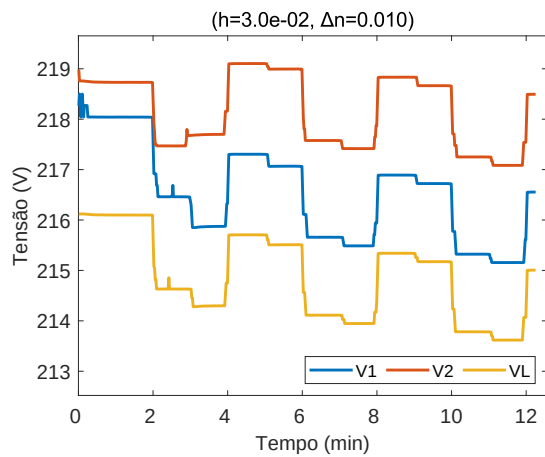
Figura 69 – Simulação com o método QR para o caso com impedâncias puramente indutivas.



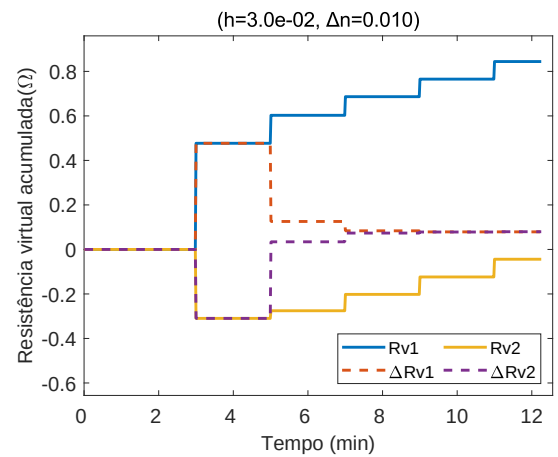
(a) Potência ativa.



(b) Potência reativa.

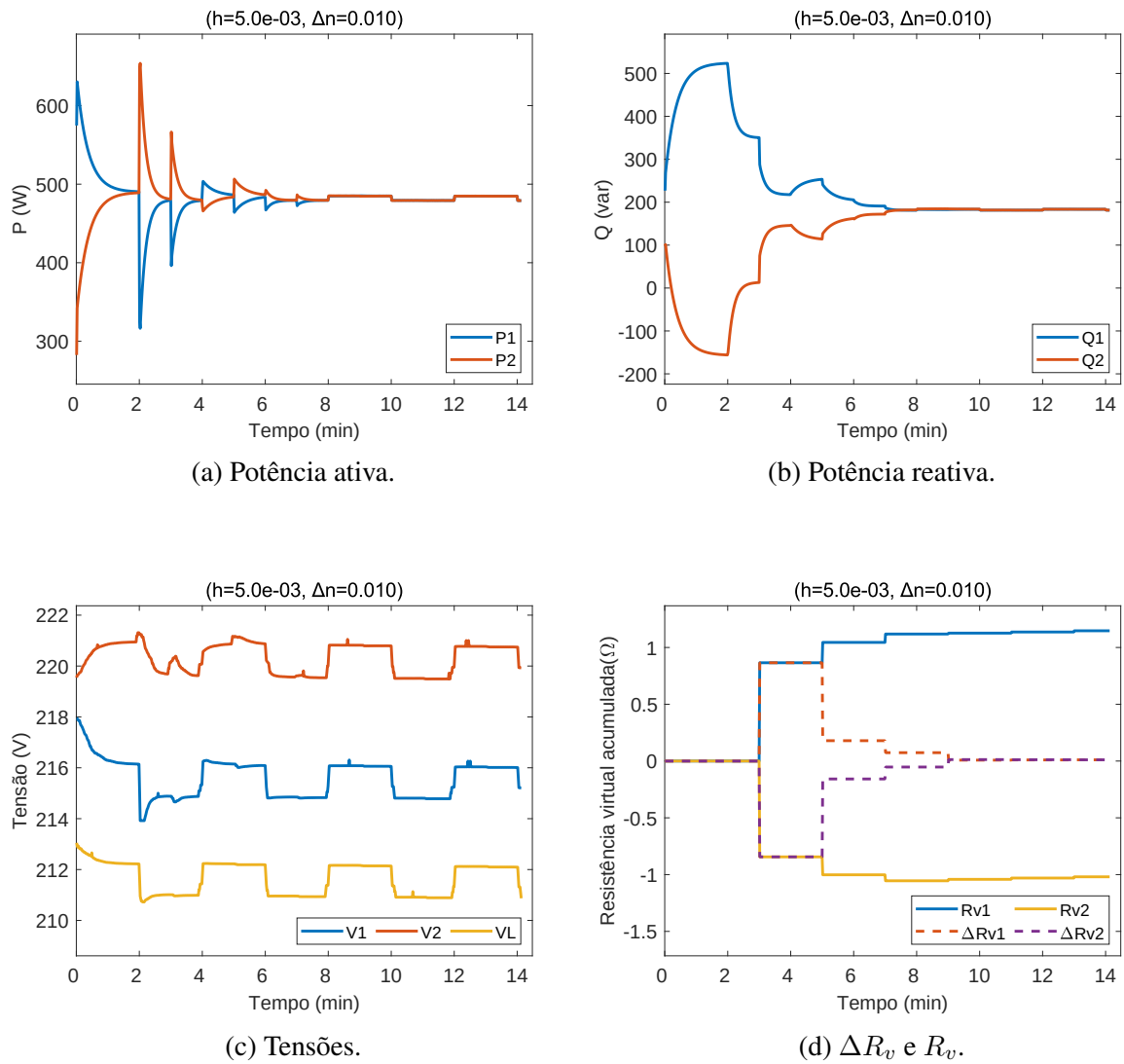


(c) Tensões.

(d) ΔR_v e R_v .

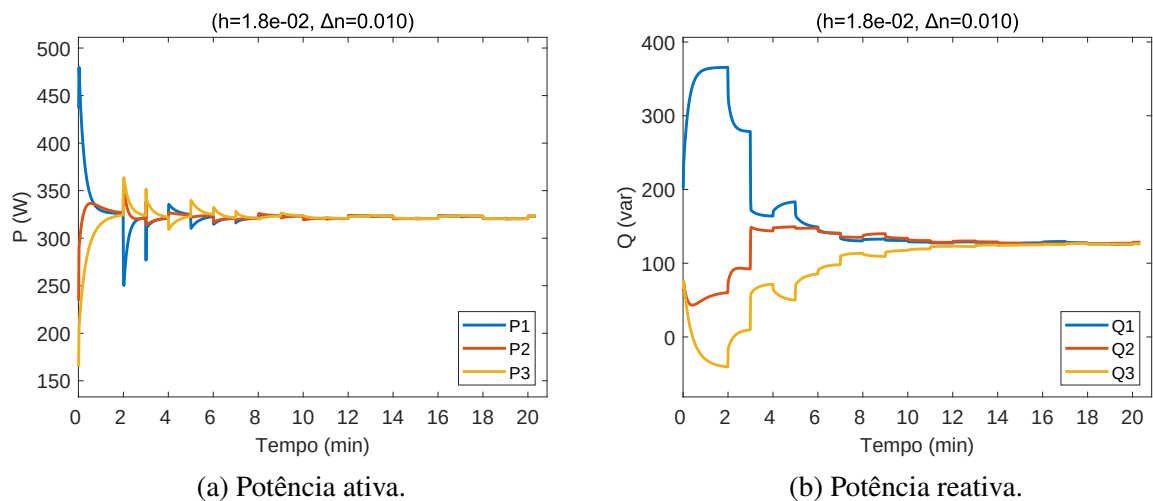
Fonte: O autor (2024).

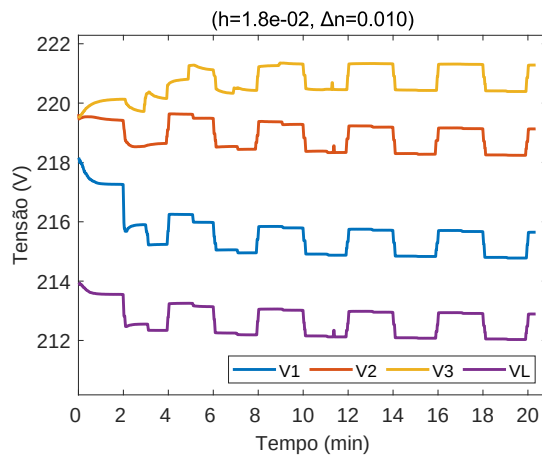
Figura 70 – Simulação com o método QR para o caso com impedâncias puramente resistivas.



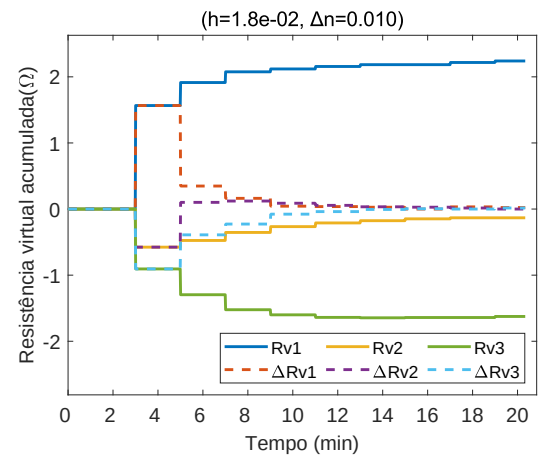
Fonte: O autor (2024).

Figura 71 – Simulação com o método QR para o caso com 3 conversores (impedância genérica).



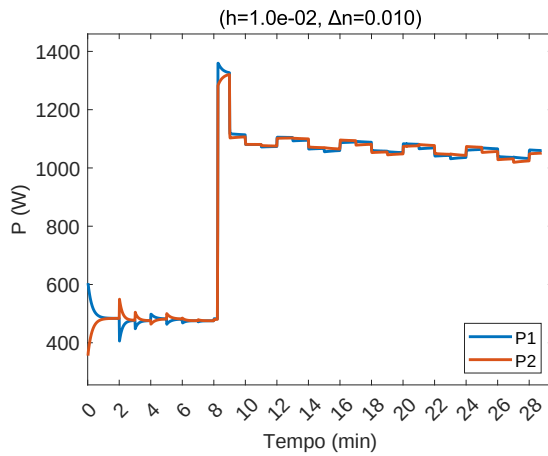


(c) Tensões.

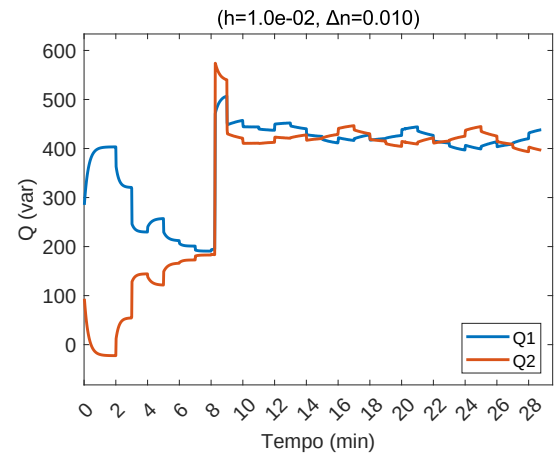
(d) ΔR_v e R_v .

Fonte: O autor (2024).

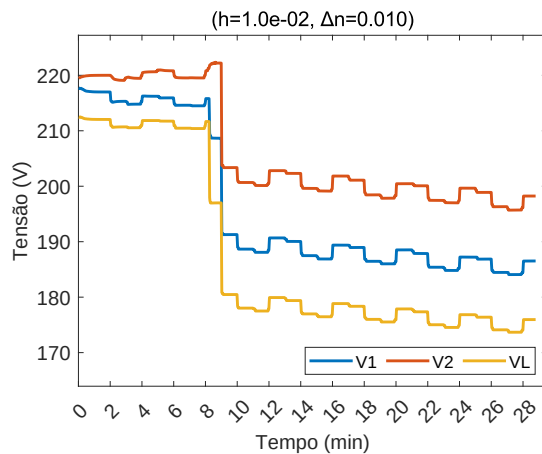
Figura 72 – Simulação com o método QR para o caso de aumento de carga de 3x o valor nominal, entre 8 e 9 minutos, sem aplicação do critério $\Delta P_{n,rel}$ (impedâncias genéricas).



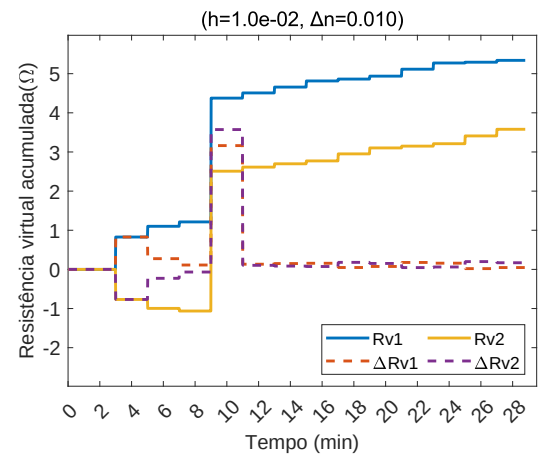
(a) Potência ativa.



(b) Potência reativa.



(c) Tensões.

(d) ΔR_v e R_v .

Fonte: O autor (2024).

3.3 COMPARAÇÃO QUALITATIVA ENTRE OS MÉTODOS APRESENTADOS

Na seção anterior, foram apresentadas três alternativas ao método QZ com base na mesma estratégia de cálculo de variação paramétrica proposta originalmente. Duas dessas alternativas, os métodos Qn e QV, não fazem uso de termos extras na equação *droop*, realizando apenas modificações nos termos já existentes, seja em n , seja em V_0 . Conforme discutido na Seção 3.2.2, há uma equivalência conceitual entre esses dois métodos e o método QZ, uma vez que todos compensam as modificações no valor de potência reativa por meio de alguma modificação de tensão virtual na própria equação *droop*, seja ela representada em função de Q , com o termo $\Delta n Q$, seja em função de I , pelo termo $Z_v I$, seja de forma direta, por meio de uma modificação no próprio valor de V_0 . Entretanto, mostrou-se nas simulações das subseções 3.2.1 e 3.2.2 que essa equivalência conceitual não se traduz exatamente em uma equivalência de aplicação entre esses métodos, uma vez que os métodos Qn e QV apresentaram, em geral, uma precisão pior com relação ao resultado de compartilhamento de potência reativa, se comparados ao método QZ, sendo possível corrigir os erros encontrados ajustando cuidadosamente os valores de h .

Ressalta-se novamente que, embora perceptíveis, esses erros ainda são pequenos e podem ser desprezados a depender do grau de rigor que se busque para a solução do compartilhamento de potência, de forma que não constituem uma grande desvantagem dessas metodologias. A esse ponto, é difícil comparar os resultados obtidos por cada metodologia de um ponto de vista puramente quantitativo, comparando-se, por exemplo, os valores de potência e tensão obtidos ao final de cada processo. Há uma variedade muito grande de combinações de parâmetros h e de limites de critérios de parada possíveis, de forma que é difícil estabelecer uma forma padrão de comparação que permita afirmar que um dado método é, categoricamente, melhor que outro. Nada garante que não seja possível escolher, para cada método em uma dada situação, valores de h que resultem em boa precisão do compartilhamento e um valor limite de critério de parada adequado, embora a escolha desses valores possa ser mais difícil para um método que para outro. Fica posta, então, a necessidade do estabelecimento de figuras de mérito adequadas à comparação dessas metodologias, necessidade que poderá ser tratada em trabalhos futuros. Mesmo assim, numa análise preliminar, a partir dos resultados já mostrados, pode-se perceber a semelhança entre as respostas obtidas, o que constitui uma quase-equivalência entre os métodos apresentados, incluindo-se na discussão também o método QR.

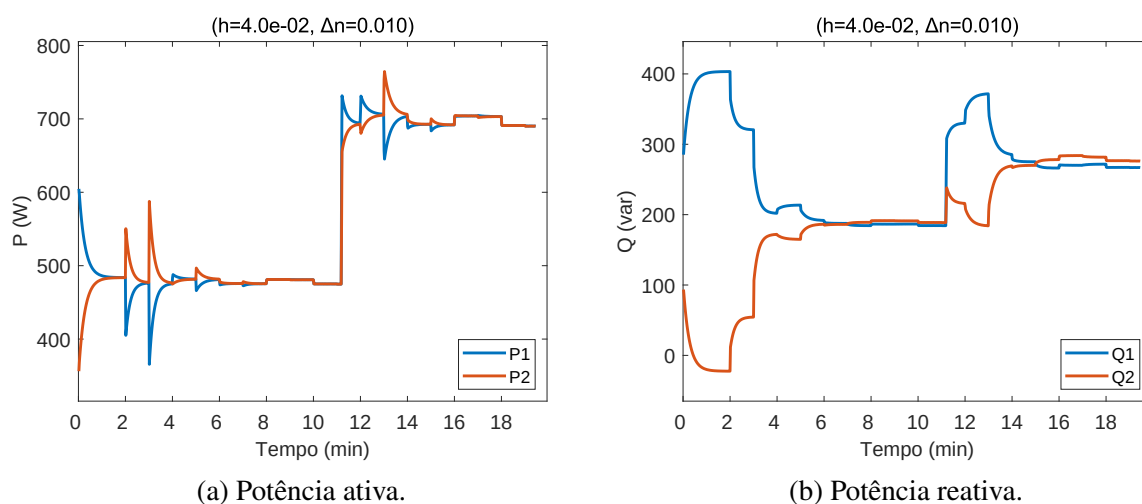
Este último, por sua vez, é mais semelhante ao método QZ no sentido de que também realiza o cálculo de um termo com qualidade de impedância, nesse caso específico, de uma resistência pura. Essa característica, e o fato de que o termo de tensão virtual passa a depender também de um termo de corrente, embora no método QZ seja a corrente eficaz e no método QR seja a corrente instantânea, parecem ser responsáveis pela melhor precisão dos resultados de compartilhamento alcançados por esses dois métodos. Além disso, do ponto de vista de que o problema do desbalanceamento das potências reativas é causado pela assimetria entre as impedâncias de acoplamento dos conversores com a microrrede, o

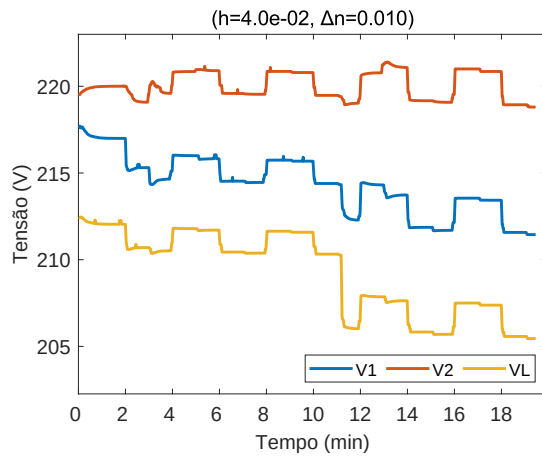
cálculo de impedâncias, ou resistências, virtuais tem um significado mais concreto, no sentido de balancear esses desequilíbrios. É importante que se diga, entretanto, que esses valores calculados não necessariamente farão com que as impedâncias de acoplamento equivalentes sejam iguais, até porque essa seria a solução para o problema somente caso as tensões produzidas pelos conversores fossem perfeitamente iguais, o que como se sabe não acontece. Desse modo, há várias possibilidades de valores de impedância equivalente e tensões produzidas possíveis que resultem em igualdade entre as potências reativas, conforme já se discutiu anteriormente.

Para ilustrar a influência da corrente no termo de tensão virtual, basta comparar o que acontece na situação de uma mudança de carga após a correção de compartilhamento de potência para o método QV e para o método QR. Por simplificação, considerou-se uma mudança de carga ocorrendo entre um minuto ímpar e um minuto par, evitando uma situação de cálculo exagerado de variação paramétrica discutida na Seção 3.1.2. Conforme mostram os resultados da Figura 73, a mudança de carga provoca desajuste do compartilhamento de potência no método QV, uma vez que, para o novo patamar de carga, as tensões virtuais necessárias para balanceamento dos valores de Q mudam, de forma que os valores calculados para o patamar de carga anterior não são mais suficientes e precisam ser corrigidos na etapa seguinte de cálculo de ΔV . Em contrapartida, para o método QR, a mudança de carga não provoca desbalanceamento significativo de potência reativa, conforme mostram os resultados da Figura 74. Com o aumento de carga, as potências entregues pelos conversores aumentam, suas correntes também aumentam e, automaticamente, os termos de tensão virtual, que nesse caso dependem da corrente, são ajustados para o novo patamar de carga, oferecendo pequeno erro de compartilhamento para os mesmos valores de resistência virtual calculada no patamar de carga baixo.

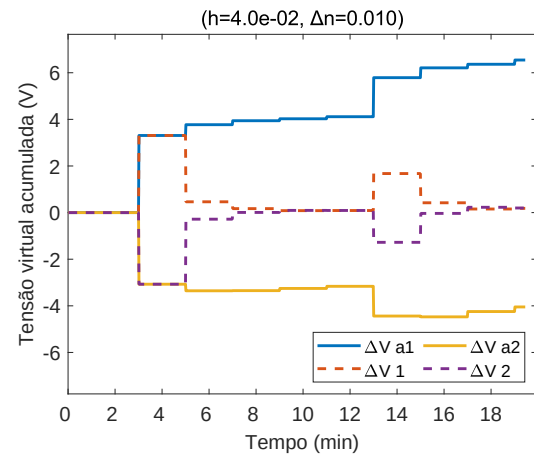
Dessa forma, o método QR preserva uma semelhança teórica com o método QZ pelo fato de calcular uma variação paramétrica na forma de uma impedância, o que se traduz em uma vantagem na precisão do compartilhamento de potência com relação aos métodos Qn e

Figura 73 – Simulação de aumento de carga após correção do compartilhamento com o método QV (impedância genérica).



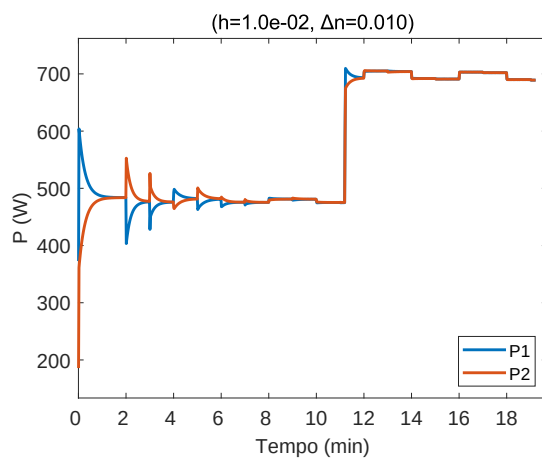


(c) Tensões.

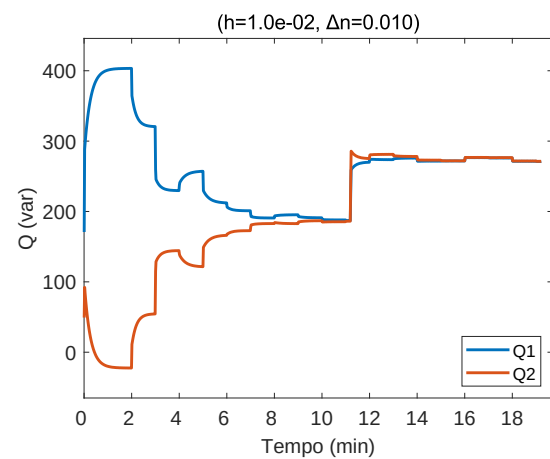
(d) ΔV e $\Delta V_{acumulado}$.

Fonte: O autor (2024).

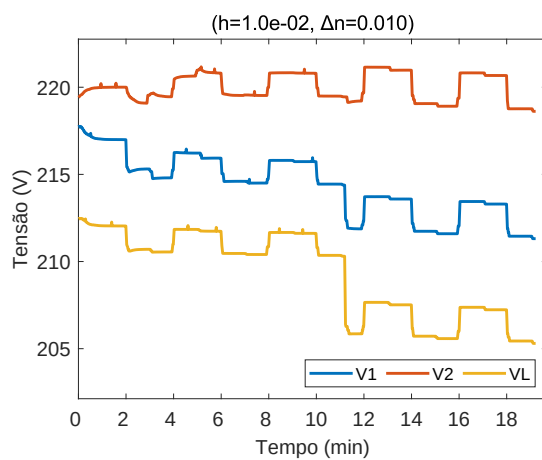
Figura 74 – Simulação de aumento de carga após correção do compartilhamento com o método QR (impedância genérica).



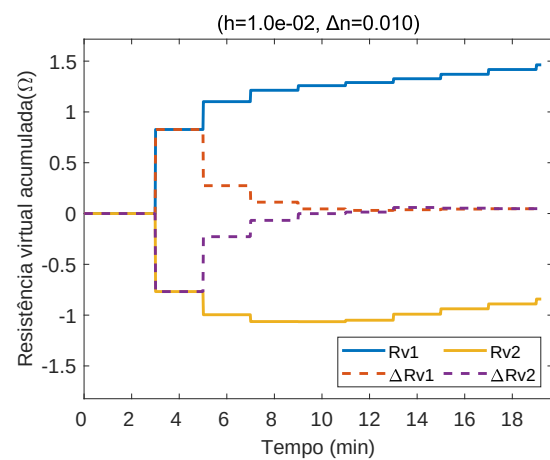
(a) Potência ativa.



(b) Potência reativa.



(c) Tensões.

(d) ΔR_v e R_v .

Fonte: O autor (2024).

QV, conforme apontam os resultados de simulação das subseções anteriores. Além disso, o método QR não sofre dos problemas de estabilidade verificados para o método QZ para valores altos de impedância virtual, de forma que pode ser considerado de fato como uma proposta de melhoria que ainda mantém características vantajosas da metodologia introduzida por Wu, Zhang e Zhan (2023). Apesar dessas conclusões, é preciso reconhecer que a modelagem dos conversores como fontes de tensão controladas, realizada neste capítulo, é demasiado simplificada, de forma que pode omitir dificuldades de implementação quando da aplicação das metodologias propostas em simulações mais detalhadas, que utilizem um modelo chaveado para os conversores. Além disso, mesmo se vencidas essas dificuldades, nada garante que os resultados porventura obtidos utilizando maior detalhamento na modelagem serão condizentes com os das simulações simplificadas, ou ainda, que todos os métodos sejam igualmente aplicáveis com relação às dificuldades de implementação.

Portanto, é importante, neste momento, ter cautela com as conclusões sobre a aplicabilidade e desempenho das metodologias propostas, apesar de os resultados obtidos neste capítulo já constituírem bons indícios de que essas metodologias podem ser aplicadas com sucesso para a resolução do problema de compartilhamento de potência reativa. Embora não seja o foco deste trabalho desenvolver a modelagem dos conversores, incluindo as possíveis adaptações necessárias à implementação dos métodos propostos, destina-se o próximo capítulo à apresentação de simulações mais detalhadas, considerando uma topologia de microrrede com cargas distribuídas e modelo chaveado para os conversores.

4 SIMULAÇÃO HIL DOS MÉTODOS PROPOSTOS COM MODELAGEM DE CONVERSORES EM UMA MICRORREDE GENÉRICA

Ainda que os capítulos anteriores tenham desenvolvido, tanto teoricamente como em termos de simulação, as metodologias propostas de correção de compartilhamento de potência baseadas na perturbação de parâmetros, dois paradigmas que precisam ser superados ainda permanecem: a utilização de uma topologia simplificada de microrrede; e a utilização de modelo médio para os conversores. Com relação ao primeiro, somente uma demonstração teórica que generalize, para uma microrrede qualquer, as conclusões obtidas no Capítulo 2 pode garantir que as metodologias propostas são de fato genéricas. Mesmo assim, é importante pelo menos verificar o funcionamento dessas metodologias em uma microrrede exemplo com cargas distribuídas, buscando evidenciar que o sucesso obtido no compartilhamento de potência não está condicionado a uma topologia de microrrede com cargas concentradas.

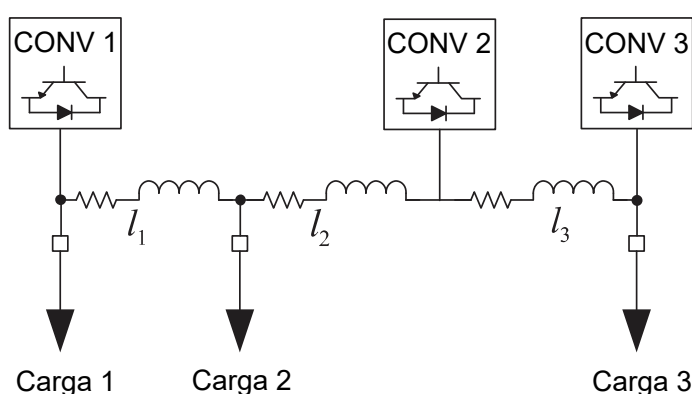
Para a realização desse teste, foi escolhido o sistema utilizado por Kosari e Hosseini (2017), cujo circuito é apresentado na Figura 75. Esse sistema, por sua vez, resulta de algumas modificações no circuito da microrrede modelada por Pogaku, Prodanovic e Green (2007), autor que apresenta, além dos parâmetros elétricos utilizados no circuito, os ganhos dos controladores utilizados. Como a modelagem do controle e as análises de estabilidade dinâmica excedem o escopo deste trabalho, escolheu-se convenientemente um modelo de microrrede amplamente referenciado e que oferecesse também um detalhamento do projeto dos controladores, de forma que se pudesse aplicar somente a modificação no controle *droop* para cálculo das variações paramétricas a partir da perturbação de n visando a correção de compartilhamento de potência.

Com a inclusão do modelo chaveado dos conversores, fica praticamente inviável realizar a simulação exclusivamente com base em *software*, dado o longo tempo demandado, de forma que é essencial utilizar um dispositivo *Hardware-in-the-Loop* (HIL), encarregado da realização de processamento dedicado aos elementos chaveados, a fim de que se consiga simular o sistema em tempo real. Para tanto, aproveitou-se a disponibilidade de um equipamento Typhoon HIL modelo 404 (TYPHOON. . . , 2024a), apresentado na Figura 77. A modelagem e controle dos conversores foi elaborada de acordo com o diagrama da Figura 76, utilizando-se o bloco *Three Phase Inverter* com modulador PWM interno e um esquema de controle realizado em referencial dq , assim como nos artigos referenciados. Cada um dos blocos que representam conversores na Figura 75 corresponde ao circuito da Figura 76, o qual inclui, além do conversor, o filtro LCL de saída, que também promove o acoplamento do conversor à malha da microrrede.

A Tabela 7 apresenta os parâmetros originais do filtro de saída e dos ganhos dos controladores, que são idênticos para os três conversores, e a Tabela 8 apresenta os demais parâmetros do circuito da microrrede. Destaca-se, observando os coeficientes de inclinação *droop*, que o denominado conversor 2 é projetado para entregar o dobro da potência que os outros dois conversores, uma vez que seus coeficientes de inclinação são a metade dos demais, conforme

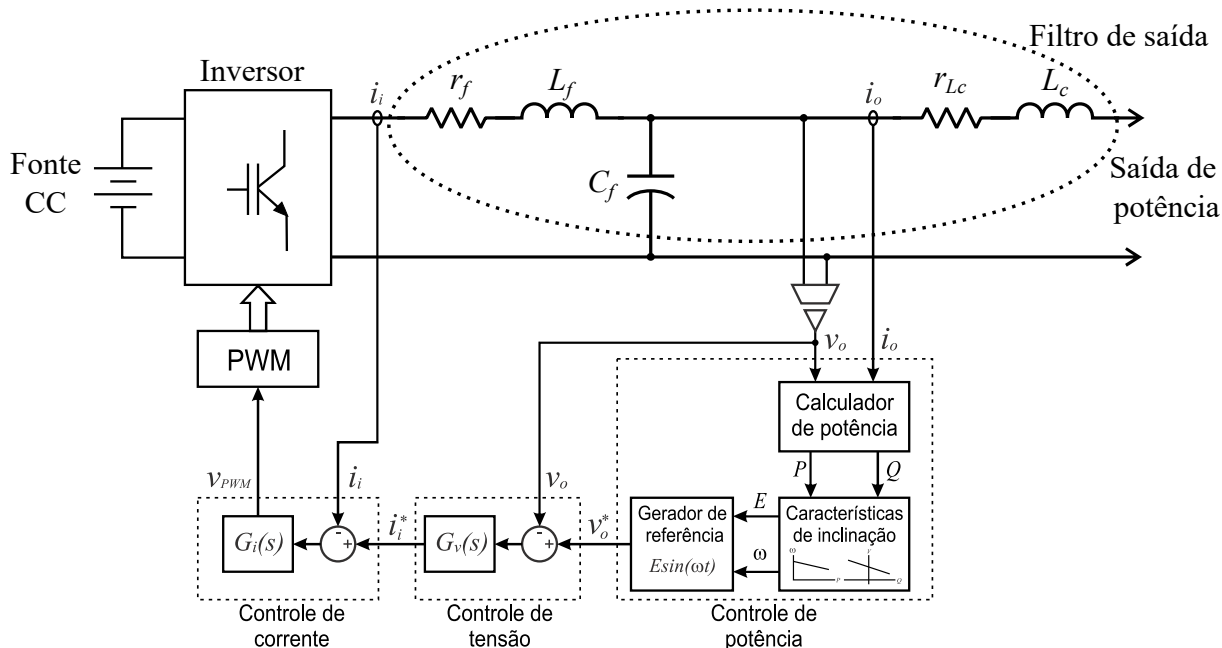
discussão já realizada no Capítulo 2. A situação simulada engloba, portanto, simultaneamente, vários aspectos generalizadores do problema de compartilhamento de potência: a topologia da microrrede tem cargas distribuídas, inclusive tendo algumas posicionadas como cargas locais, ou seja, ligadas no mesmo nó que um conversor; as impedâncias das linhas têm parcela resistiva e indutiva; e as potências nominais dos conversores são distintas. Em contrapartida, as cargas continuam sendo modeladas de forma simplificada, como impedâncias constantes.

Figura 75 – Microrrede exemplo com cargas distribuídas para verificação da aplicabilidade dos métodos baseados em perturbação paramétrica.



Fonte: Adaptado de (KOSARI; HOSSEINIAN, 2017).

Figura 76 – Esquema de controle e circuito de saída dos conversores.

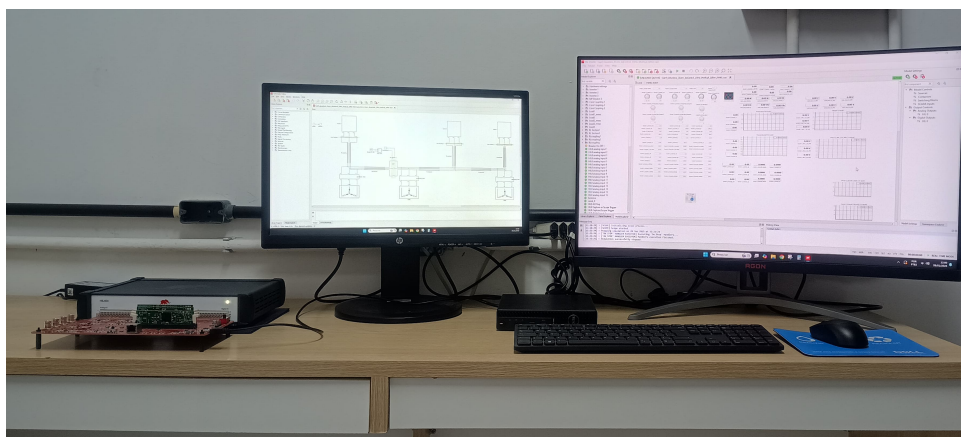


Fonte: Adaptado de (AZEVEDO, 2011).

Tabela 7 – Parâmetros de controle (ganhos contínuos) e filtro de saída dos conversores (POGAKU; PRODANOVIC; GREEN, 2007).

Filtro de saída	
Capacitância do filtro (C_f)	$50 \mu F$
Indutância do filtro (L_f)	$1,35 mH$
Resistência da indutância do filtro (r_f)	$0,1 \Omega$
Indutância de acoplamento (L_c)	$0,35 mH$
Resistência da indutância de acoplamento (r_{Lc})	$0,03 \Omega$
Controle de tensão	
Ganho proporcional (K_{pv})	$0,05$
Ganho integrativo (K_{iv})	390
Controle de corrente	
Ganho proporcional (K_{pi})	$10,5$
Ganho integrativo (K_{ii})	16×10^3
Frequência de chaveamento	
Valor original	8 kHz
Valor modificado	15 kHz

Figura 77 – Equipamento Typhoon HIL modelo 404 conectado ao computador.



Fonte: O autor (2025).

Uma vez elaborado o modelo descrito da microrrede, basta adicionar os elementos referentes ao cálculo das variações paramétricas, da mesma forma como se utilizou no capítulo anterior, sendo possível alternar entre os diferentes métodos de correção de compartilhamento propostos apenas modificando a maneira de adicionar essas variações, que nada mais são que variações de tensão virtual, ora ressignificadas como variações de n , ora como variações de resistência virtual, ora de fato como variações de tensão, conforme já discutido. Essa flexibilidade de aplicação facilita a testagem das três metodologias, possibilitando avaliar se as conclusões atingidas no capítulo anterior continuam válidas em uma situação mais generalizada e com modelos mais detalhados para os conversores.

Tabela 8 – Parâmetros da microrrede exemplo (KOSARI; HOSSEINIAN, 2017).

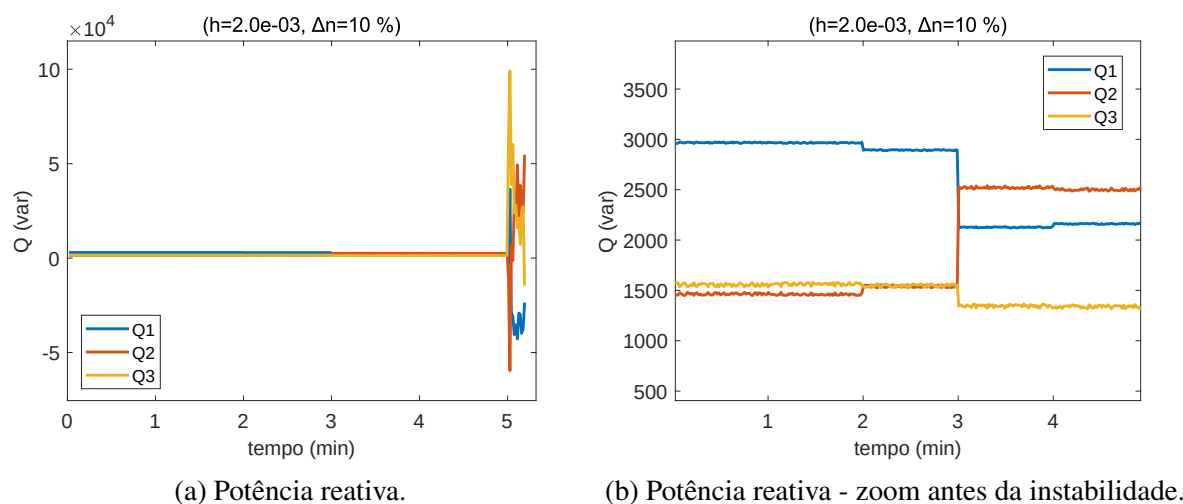
Tensão nominal de linha (rms)	380V
Frequência nominal	60Hz
Impedâncias das linhas	$l_1 = 0,4 + j 0,3 \Omega$ $l_2 = 0,2 + j 0,1 \Omega$ $l_3 = 0,2 + j 0,2 \Omega$
Inclinações do <i>droop</i> $P - \omega$	$m_1 = 1 \times 10^{-4}$ $m_2 = 0,5 \times 10^{-4}$ $m_3 = 1 \times 10^{-4}$
Inclinações do <i>droop</i> $Q - V$	$n_1 = 1 \times 10^{-3}$ $n_2 = 0,5 \times 10^{-3}$ $n_3 = 1 \times 10^{-3}$
Potências nominais das cargas	Carga 1 = $4kW + j 2kvar$ Carga 2 = $4kW + j 2kvar$ Carga 3 = $4kW + j 2kvar$

Ainda assim, é preciso ter cautela ao analisar os resultados obtidos neste capítulo, especialmente nos aspectos que podem sofrer influência da modelagem dos conversores, uma vez que ela não foi adaptada considerando a aplicação da correção de compartilhamento de potência. O único parâmetro modificado com relação aos valores originais propostos por Pogaku, Prodanovic e Green (2007) foi a frequência de chaveamento, alterada de seu valor original de 8kHz para 15kHz, a fim de possibilitar a utilização dos ganhos contínuos fornecidos no artigo, desconsiderando os tempos de atraso inerentes ao PWM. Do contrário, teria sido necessário realizar uma discretização desses ganhos, já que a simulação HIL é realizada em tempo discreto.

A despeito do bom desempenho evidenciado na Seção 3.2.3, o método QR apresentou instabilidades severas após o início da adição das resistências virtuais, fato que, a princípio, cogitou-se estar relacionado à interação do método de correção com o controle do conversor, ausente nas investigações anteriores. Conforme já mostrado na Figura 67, a aplicação da metodologia requer o fechamento de outra malha de controle para a modificação da tensão de referência a partir do cálculo da resistência virtual, o que poderia causar uma instabilização do sistema, cujo controle não havia sido projetado considerando essa nova malha. Em uma tentativa de sanar o problema, foi adicionado um *feedforward* na tensão de referência do PWM, o que permitiu a realização do primeiro passo de cálculo de resistência virtual, mas posteriormente resultou também em instabilidade do sistema, conforme mostra a Figura 78. Para eliminar outras possíveis causas desse problema, foram utilizados valores pequenos de variação de n , perturbando esse coeficiente em apenas 10% do valor original, além de terem sido testados valores diferentes de h . Mesmo utilizando valores menores, por mais que alguns passos de cálculo de resistência

possam ser realizados, a partir de certo valor de resistência virtual acumulada, a instabilidade volta a ocorrer.

Figura 78 – Resultados de potência reativa para o método QR (com modelo chaveado para conversores).



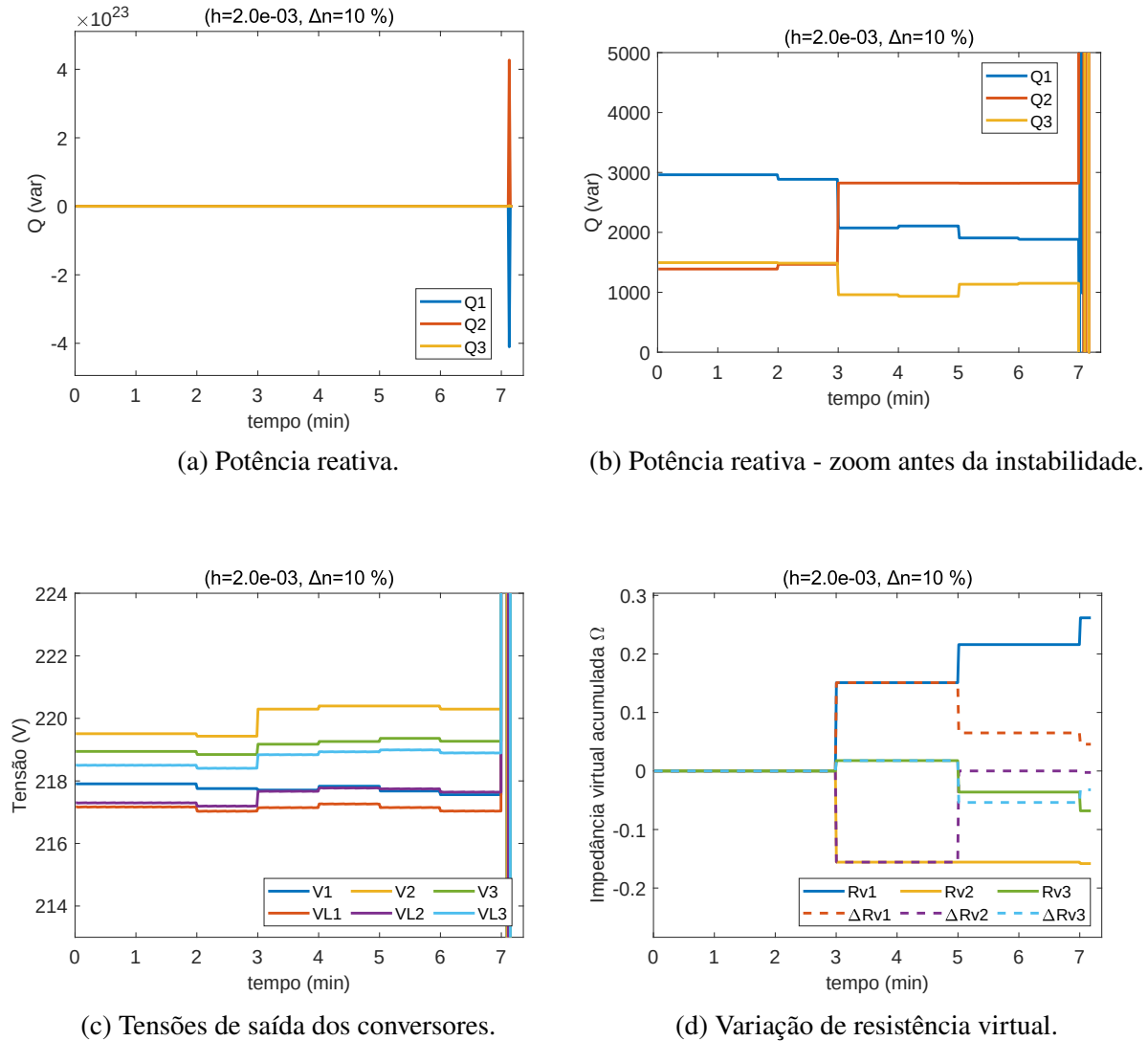
Fonte: O autor (2024).

Outra possibilidade é que o problema seja causado por alguma limitação inerente ao método QR quando aplicado à microrrede estudada neste capítulo, afinal, duas mudanças foram realizadas com relação às simulações do capítulo anterior: a topologia da microrrede; e a adição do controle e modelagem dos conversores. Embora se tenha observado anteriormente que esse método é menos propenso a instabilidades, se comparado ao método QZ, que apresentava problemas caso as impedâncias virtuais atingissem valores muito altos, nada garante que não possa ocorrer algo similar, em algumas situações, com o método QR. Para discernir a causa das instabilidades observadas, se de fato são relacionadas ao controle ou se à microrrede em si, faz-se necessário colocar em ressalva quaisquer conclusões obtidas para a topologia simplificada do Capítulo 3 e, novamente, idealizar a modelagem dos conversores para a microrrede da Figura 75, permitindo que sejam comparados os resultados, para uma mesma microrrede, com e sem a implementação do modelo chaveado.

Surpreendendo as expectativas, a simulação da microrrede utilizando o modelo médio para os conversores também apresentou as mesmas instabilidades após alguns passos de adição dos termos de resistência virtual, o que indica alguma limitação anteriormente não observada, não relacionada ao controle do conversor e que tornou-se evidente para este exemplo específico. A Figura 79 mostra os resultados de potência reativa, tensão nos conversores e resistência virtual calculada para esse caso. Por si só, esse fato enseja discussões sobre a estabilidade da operação da microrrede quando aplicados os métodos de correção de compartilhamento, inclusive para que se possa, de maneira generalizada, entender quais parâmetros devem ser dimensionados considerando a aplicação desses métodos e, dado um determinado projeto de microrrede, quais os limites de operação estável considerando a adição das variações paramétricas. Essa discussão

poderá ser desenvolvida em pesquisas futuras. Por hora, basta contornar o problema específico a partir do entendimento intuitivo que já se pode depreender das simulações desenvolvidas neste trabalho.

Figura 79 – Resultados de simulação para método QR com idealização dos modelos dos conversores.



Fonte: O autor (2024).

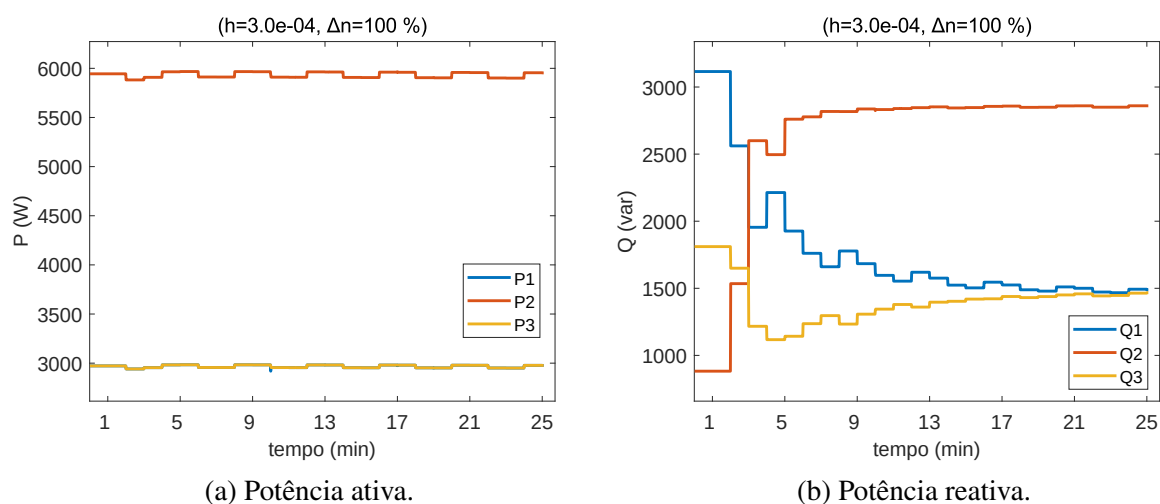
Uma peculiaridade da microrrede estudada neste capítulo que a diferencia dos circuitos utilizados até então é a presença de cargas locais conectadas aos conversores 1 e 3. Como as impedâncias de acoplamento, listadas na Tabela 7, são pequenas e predominantemente indutivas, as tensões nas cargas locais são, em módulo, praticamente as tensões de saída dos conversores, medidas atrás da impedância de acoplamento, conforme mostra o gráfico da Figura 79c especificamente para os conversores 1 e 3. Desse modo, qualquer pequena alteração nas tensões dos conversores causada pela execução do método de correção de compartilhamento se refletirá de maneira praticamente direta nas cargas, possivelmente causando instabilidades a depender de como as variações de tensão virtual são adicionadas. Embora não se tenha ainda

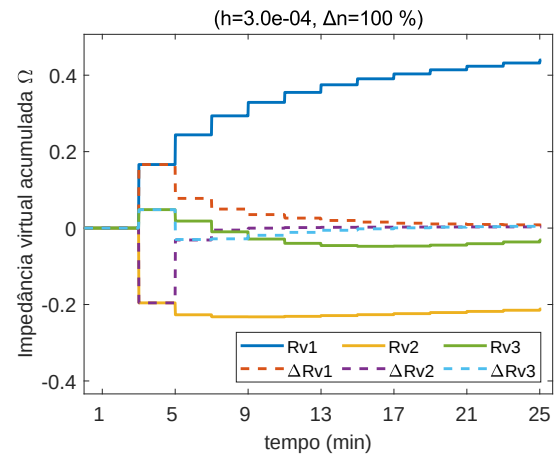
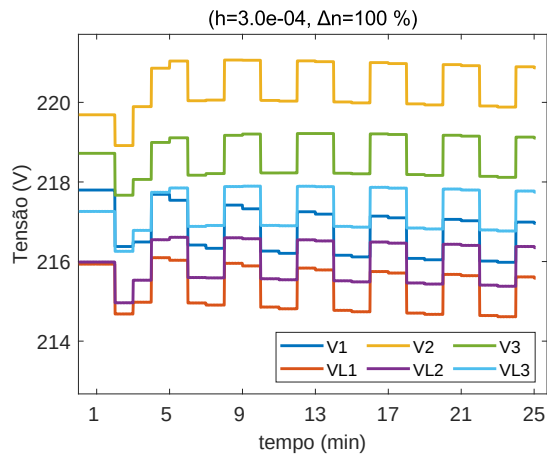
clareza teórica para explicar o fenômeno observado, pode-se conjecturar que, quando da presença de cargas locais, é possível que a adição dos termos de resistência virtual provoque inversões entre os níveis de tensão, que são muito próximos entre si. Por sua vez, isso pode ocasionar inversões nos sentidos das correntes entregues por alguns dos conversores, influenciando diretamente no próprio termo de tensão virtual, que depende da corrente no método QR. Essa situação pode realimentar uma instabilidade, levando o sistema a um colapso ou a aumento excessivo de tensão.

É claro que em se tratando de sistemas de corrente alternada, a fase, e não só o nível de tensão, importam para a conjectura realizada, a qual, aliás, ainda é bastante incipiente e, como já dito, carece de mais aprofundado desenvolvimento teórico para que possa ser de fato confirmada ou refutada. De toda forma, independentemente da explicação, o fato é que se aumentadas as impedâncias de acoplamento de forma que as cargas 1 e 3 deixem de ser locais, configurando-se uma situação mais próxima das simulações do capítulo anterior, o método QR pode ser aplicado sem que ocorram instabilidades. Para isso, bastou aumentar as impedâncias de acoplamento para valores mais próximos das impedâncias de rede, utilizando-se o valor de $Z_{ac} = 0.2 + j 0.2 \Omega$, tendo-se atingido, inclusive, boa correção de compartilhamento de potência conforme mostra a Figura 80. Também experimentou-se aumentar somente o valor da indutância, o que não foi suficiente para estabilização da operação, indicando que a modificação no valor da resistência é preponderante nesse caso. Os resultados para a simulação com o modelo chaveado são mostrados na Figura 81, em que também foi possível alcançar bons resultados de compartilhamento de potência.

Mesmo que se tenha conseguido contornar o problema da instabilidade, é importante salientar que suas causas ainda não estão compreendidas. Não necessariamente a presença de cargas locais provoca diretamente as instabilidades observadas, já que o aumento de impedância realizado pode ter modificado também outros aspectos do circuito, de forma que são necessárias mais investigações para distinguir a causa do problema observado. Além disso, é importante

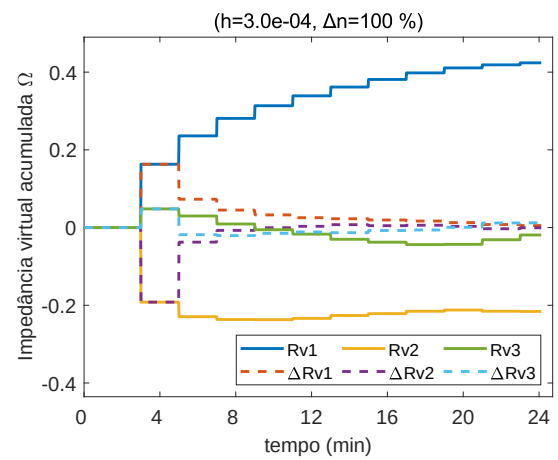
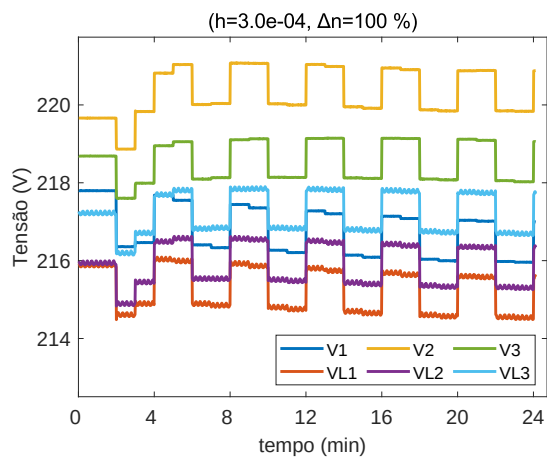
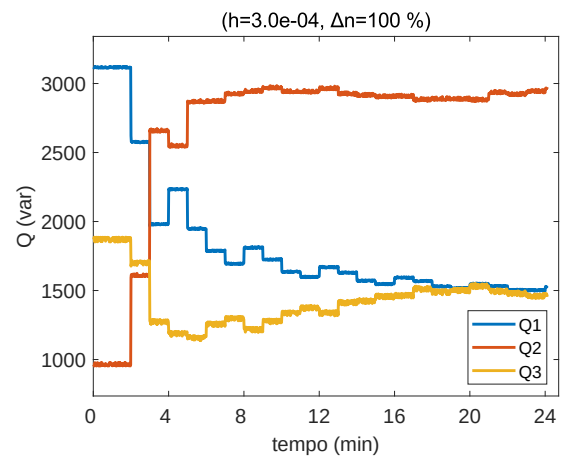
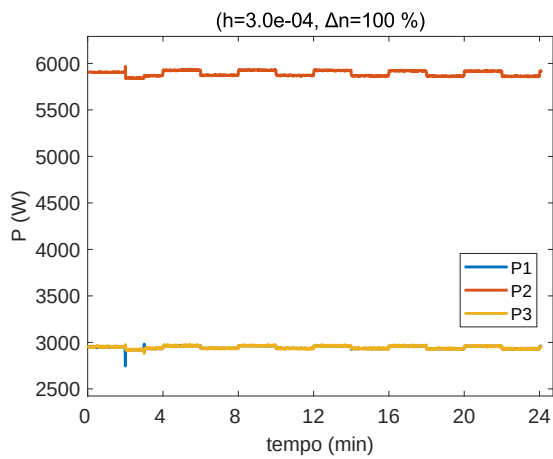
Figura 80 – Resultados de simulação para método QR (modelo médio) aumentando as impedâncias de acoplamento para $Z_{ac} = 0.2 + j 0.2 \Omega$.





Fonte: O autor (2024).

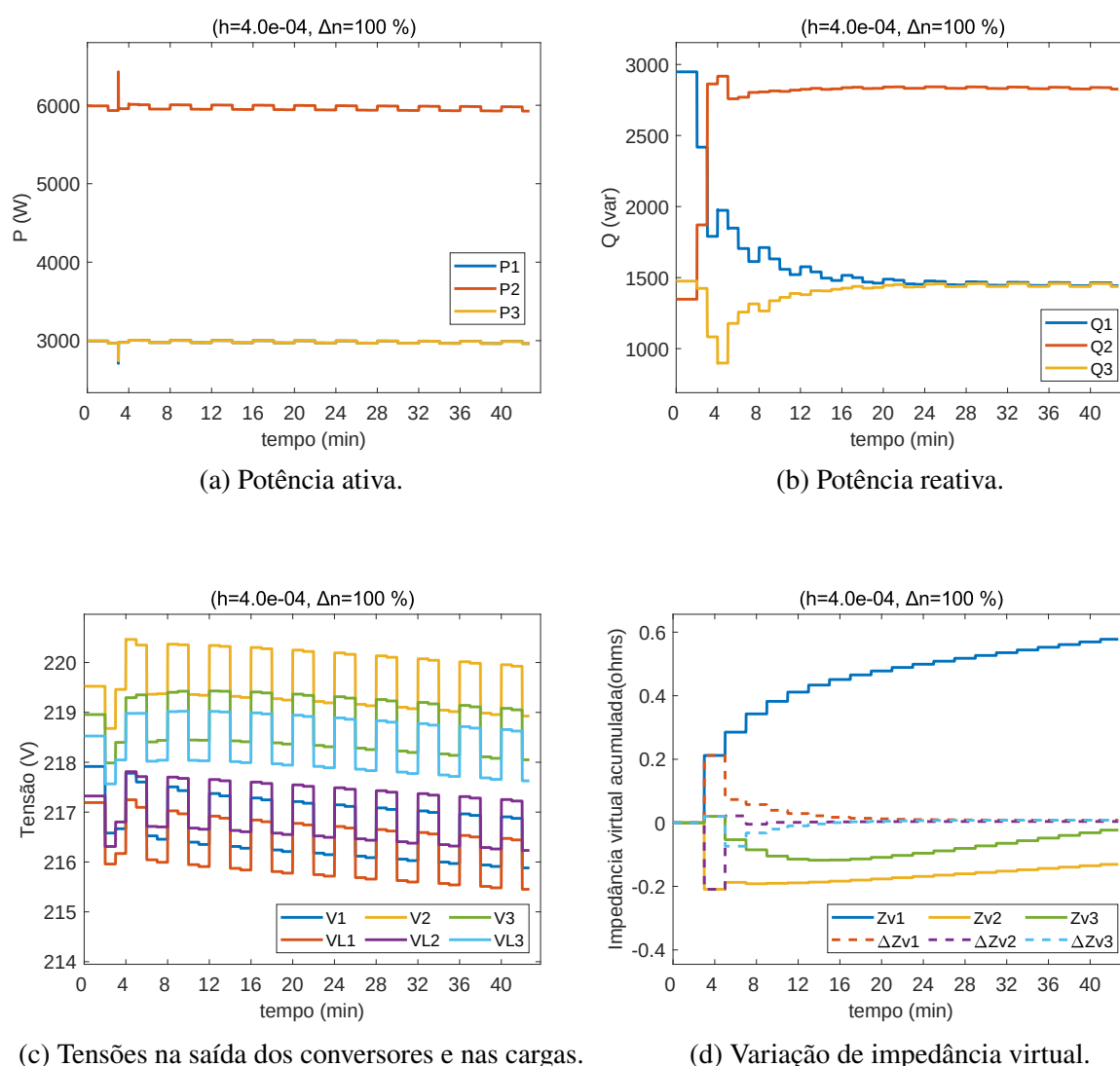
Figura 81 – Resultados de simulação para método QR (modelo chaveado) aumentando as impedâncias de acoplamento para $Z_{ac} = 0.2 + j 0.2\Omega$.



Fonte: O autor (2024).

destacar que a instabilidade observada neste capítulo para o método QR é diferente da observada no Capítulo 3 para o método QZ uma vez que este último funciona livre de instabilidades na microrrede da Figura 75 sem a realização de quaisquer adaptações na impedância de acoplamento, conforme os resultados da Figura 82. Nota-se, analisando cuidadosamente os resultados obtidos nas Figuras 80 e 81, que há pequenas diferenças entre a aplicação do método QR no modelo médio e no modelo chaveado, mais perceptíveis se observados os gráficos de potência reativa e variação de resistência virtual, especificamente ao final das simulações. Dessa vez, trata-se claramente de uma diferença introduzida pela implementação do modelo dos conversores e que será tratada após observar seu impacto na aplicação dos demais métodos.

Figura 82 – Resultados de simulação para método QZ (modelo médio).



Fonte: O autor (2024).

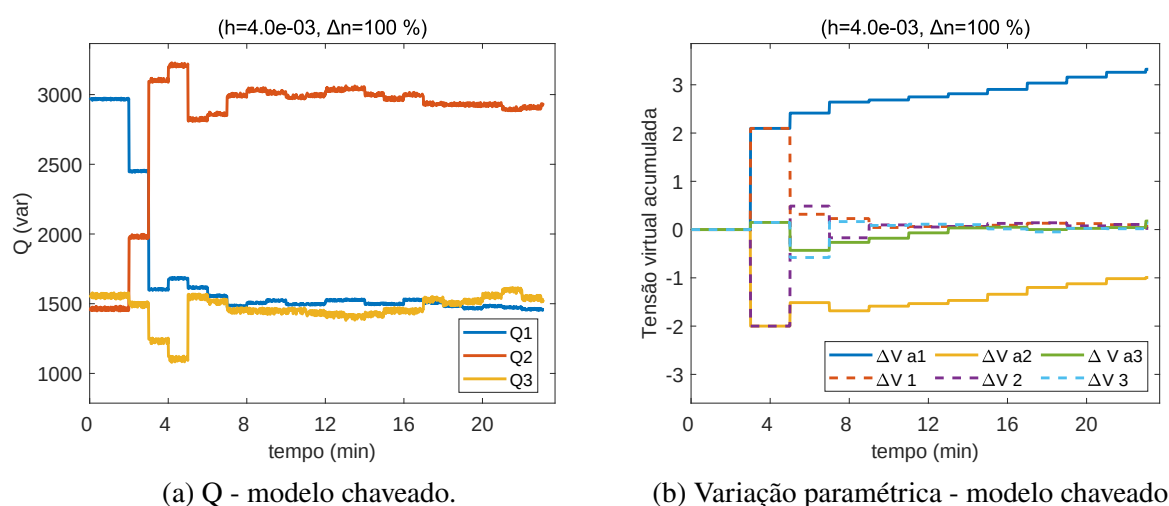
Diferentemente do método QR, os métodos QV e Qn apresentam funcionamento livre de instabilidades sem a necessidade de alteração na impedância de acoplamento. Entretanto, é preciso ter atenção a algumas anomalias no cálculo das variações paramétricas, as quais podem ocorrer em virtude das oscilações nas medições de potência reativa, sendo um problema

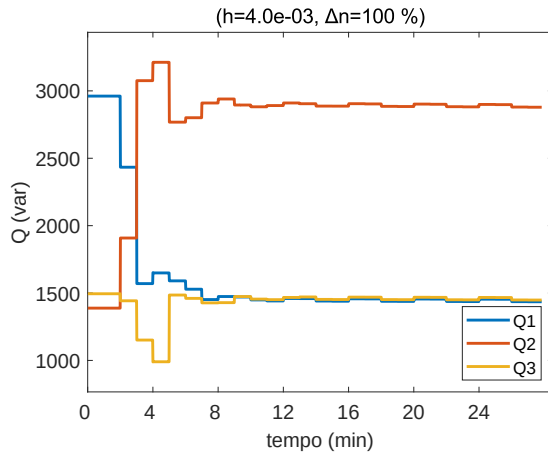
independente de qual método está sendo aplicado, mas cuja gravidade pode ser severa a depender do caso. É inerente à simulação com o modelo completo do conversor que ocorram oscilações nas medições de tensão e corrente e, por conseguinte, nas medições de potência. Como as metodologias aplicadas se valem de oscilações de potência reativa para cálculo de variações paramétricas, caso essas oscilações provocadas pela perturbação de n sejam muito pequenas, é possível que as oscilações de medição atrapalhem a identificação do valor correto de ΔQ_n , o que, em casos extremos, pode resultar até em uma inversão de sinal de seu valor. Esse problema é especialmente importante em situações nas quais um dos conversores entrega potência reativa muito próxima da média a ser atingida, de forma que as oscilações sofridas por ele devido às perturbações de n são naturalmente pequenas, mesmo quando utilizados valores de Δn maiores.

Mais uma vez, para verificar os efeitos e discernir as causas, apresenta-se a comparação das simulações com modelo médio e com chaveado, com ênfase nos resultados de potência reativa e cálculo de variação paramétrica, conforme Figura 83, que apresenta os resultados para o método QV. Nesse caso, o conversor 3 inicia a simulação com um valor de potência muito próximo da potência desejada, que é de 1500 var, de forma que as perturbações sofridas pela sua potência reativa nos minutos pares são consideravelmente menores que as dos demais conversores. Observa-se que o desenvolvimento do cálculo de suas variações paramétricas começa a apresentar diferenças com relação ao caso idealizado, com a primeira anomalia ocorrendo aos 9 minutos, quando deveria ocorrer uma aproximação entre os valores de potência reativa dos conversores 1 e 3, mas ocorre um afastamento. A partir desse ponto, todo o processo é comprometido, resultando inclusive em um desempenho pior da simulação com modelo chaveado.

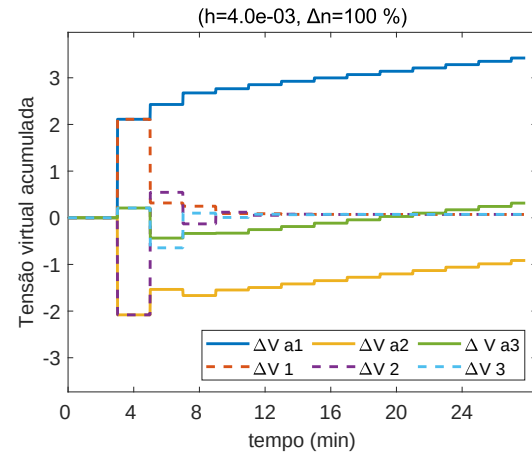
Para o método Qn, ocorre um comportamento semelhante, conforme mostra a Figura 84, inclusive com um desequilíbrio das potências reativas ao final da simulação para o caso com modelo chaveado que não acontece para o caso com modelo médio. Durante o processo da escolha da constante h , notou-se que em casos nos quais se escolheu um valor excessivo para esse

Figura 83 – Comparação entre os resultados do método QV com modelo médio e com modelo chaveado para os conversores.





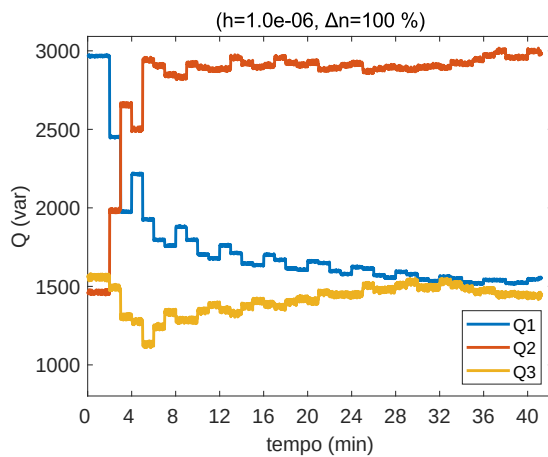
(c) Q - modelo médio.



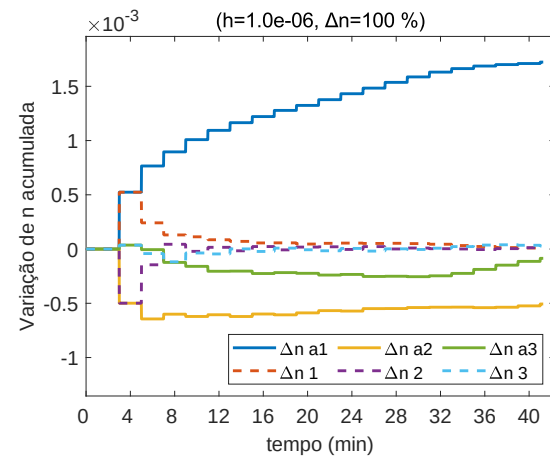
(d) Variação paramétrica - modelo médio.

Fonte: O autor (2024).

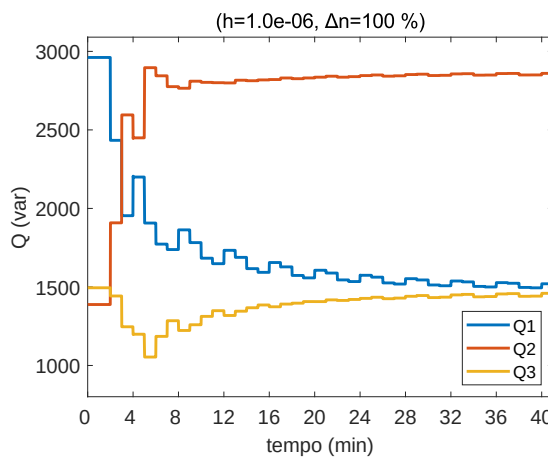
Figura 84 – Comparação entre os resultados do método Qn com modelo médio e com modelo chaveado para os conversores.



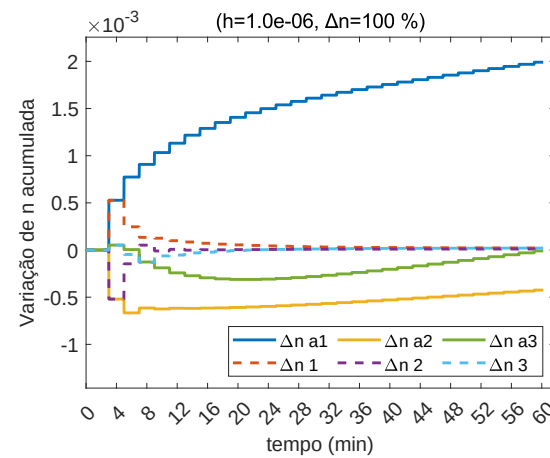
(a) Q - modelo chaveado.



(b) Variação paramétrica - modelo chaveado.



(c) Q - modelo médio.



(d) Variação paramétrica - modelo médio.

Fonte: O autor (2024).

parâmetro, as já esperadas oscilações de potência em torno do valor final foram potencializadas pela anomalia no cálculo das variações paramétricas, especialmente para o método Qn, que é naturalmente mais sensível a esses erros, uma vez que a variável modificada é o próprio n . Mesmo quando isso acontece, é possível ainda contornar a situação escolhendo um critério de parada que garanta o término da execução em um momento anterior aos desvios de potência reativa, ainda que os decorrentes resultados de compartilhamento sejam deteriorados por uma parada precoce. A fim de alcançar resultados mais satisfatórios, faz-se necessário, então, aprimorar a forma de cálculo das variações paramétricas, evitando completamente as anomalias e suas más consequências para o compartilhamento de potência.

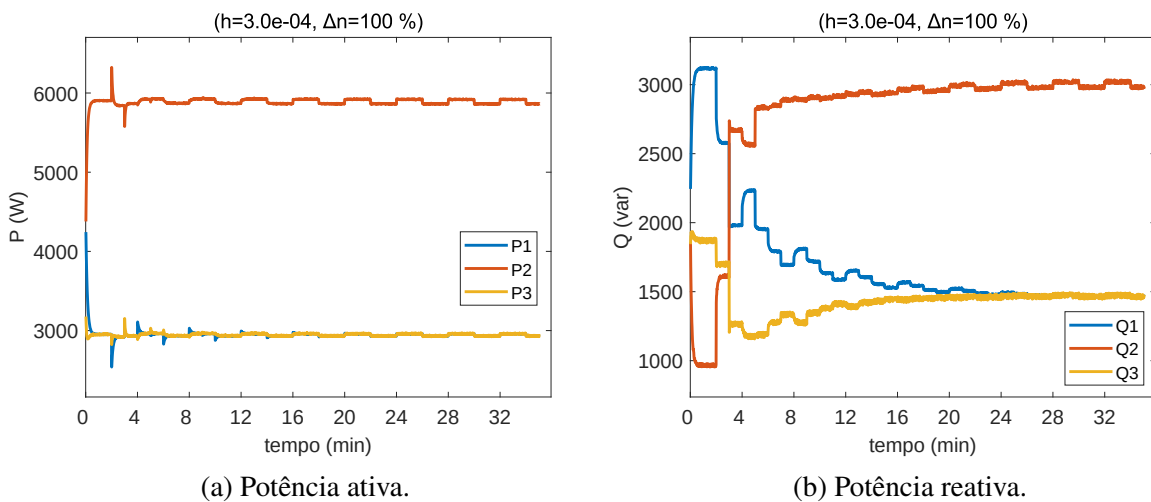
Para sanar esse problema, pode-se adicionar um filtro para a potência reativa utilizada nos cálculos de variação paramétrica. Não é adequado modificar o filtro de primeira ordem utilizado para o próprio cálculo das potências porque isso introduziria outra dinâmica na malha de controle, causando instabilidades, uma vez que os ganhos dos controladores foram projetados considerando o filtro original. Como o cálculo das variações paramétricas da metodologia de correção de compartilhamento é realizado de maneira totalmente independente das variáveis de controle, pode-se adicionar o novo filtro sem prejuízos à estabilidade do sistema. Utilizou-se um filtro de segunda ordem com a função transferência

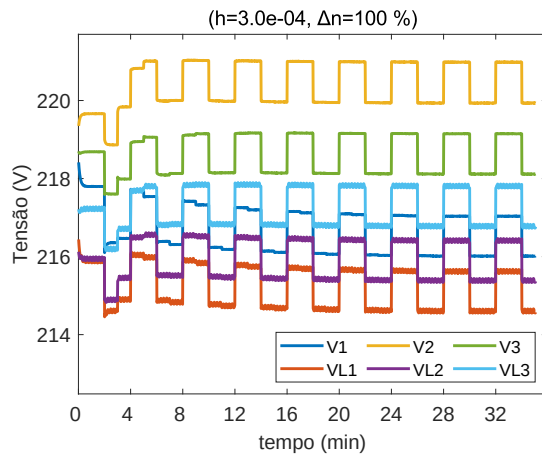
$$H(s) = \frac{\omega_c^2}{(s + \omega_c)^2} \quad (96)$$

e frequência de corte de 1 Hz.

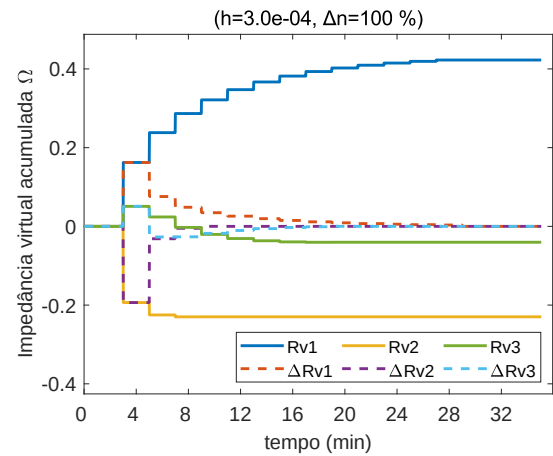
Com mais essa adição, as simulações para os três métodos foram refeitas, obtendo-se os resultados das Figuras 85 a 87. Aproveitou-se para diminuir em 100 vezes os valores de m , a fim de tornar mais lenta a dinâmica de resposta da microrrede a uma perturbação, adequando-a ao tempo estipulado de 1 minuto entre perturbações de n .

Figura 85 – Resultados de simulação HIL do método QR com a aplicação do filtro de medição de Q e ajuste das impedâncias de acoplamento.





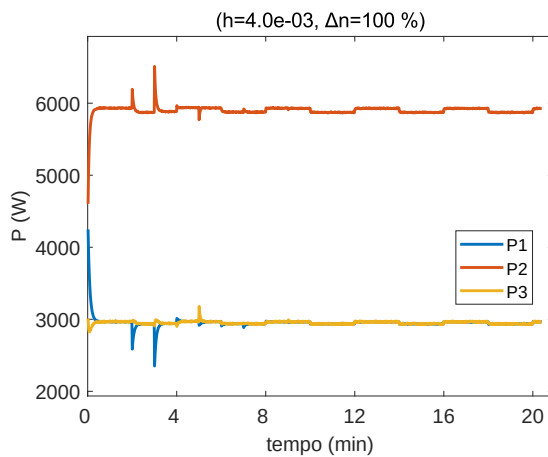
(c) Tensões nas saídas dos conversores e nas cargas.



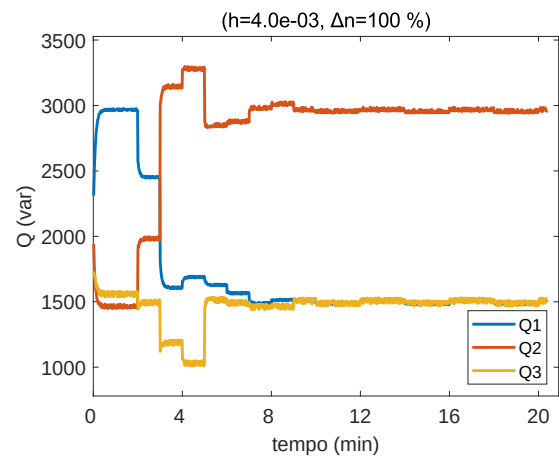
(d) Variação de resistência virtual.

Fonte: O autor (2024).

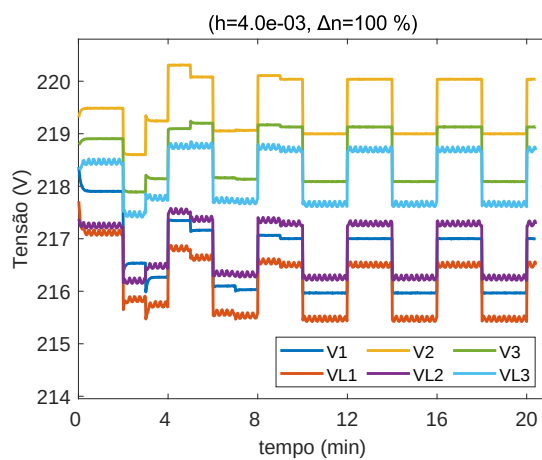
Figura 86 – Resultados de simulação HIL do método QV com a aplicação do filtro de medição de Q .



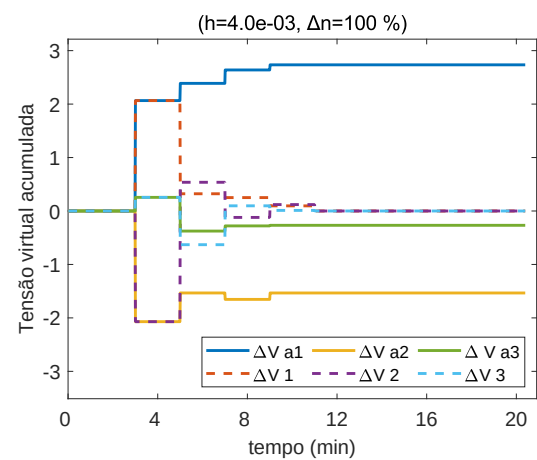
(a) Potência ativa.



(b) Potência reativa.

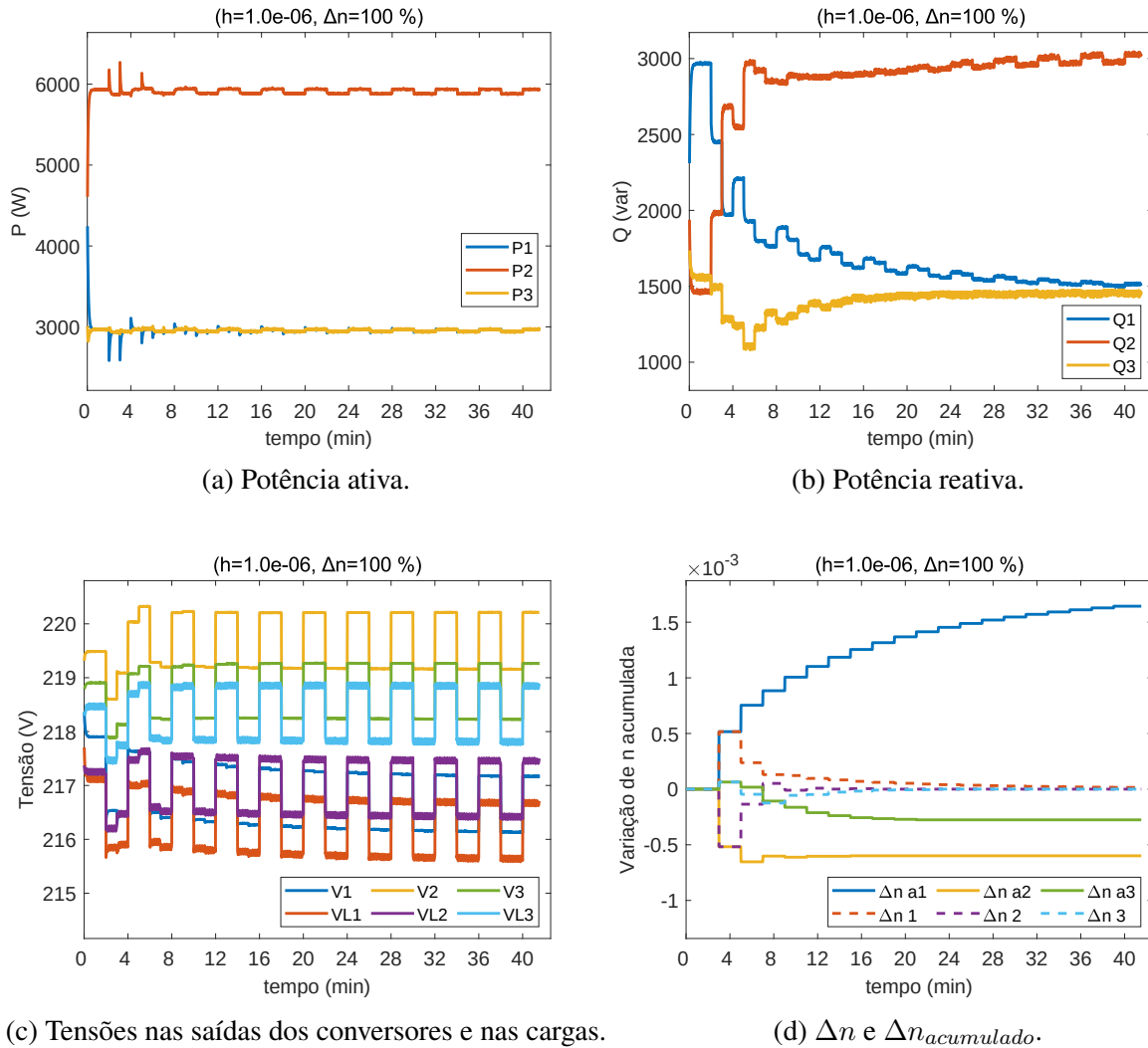


(c) Tensões nas saídas dos conversores e nas cargas.

(d) ΔV e $\Delta V_{\text{acumulado}}$.

Fonte: O autor (2024).

Figura 87 – Resultados de simulação HIL do método Qn com a aplicação do filtro de medição de Q .



Fonte: O autor (2024).

Considerando as modificações realizadas, todos os métodos puderam atingir bom desempenho no compartilhamento de potência reativa, inclusive com a utilização do critério de parada, o qual pôde ser aplicado da mesma forma que no Capítulo 3 para cessar as quedas de tensão e acréscimos de variações paramétricas. Comparando os três métodos, somente o método Qn apresentou um ligeiro desvio nos valores finais de potência, assim como se observou no Capítulo 3. Para esse método foi mais difícil escolher um valor adequado para a constante h que resultasse em um tempo de simulação mais rápido sem provocar oscilações de n excessivas. Optou-se nesse caso pelo cálculo de variações mais brandas, o que em contrapartida fez com que a simulação levasse mais tempo que as dos outros métodos.

Malgrado as pequenas diferenças entre os métodos, pode-se afirmar que todos atingiram o objetivo pretendido, restando apenas entender se essas diferenças são inerentes a cada método aplicado ou específicas para a situação simulada. Tanto a potência ativa quanto a reativa seguem a proporção estabelecida pelos coeficientes *droop*, com o conversor 2 entregando o dobro da

potência dos demais: a potência ativa por estar relacionada à frequência no *droop* $P - \omega$ e a reativa em virtude da aplicação dos métodos de correção. Entretanto, este capítulo também evidenciou, além da validade das metodologias propostas quando aplicadas a uma situação mais próxima da realidade, a necessidade de posteriores estudos sobre a estabilidade da microrrede quando submetida aos métodos de correção de compartilhamento de potência.

As dificuldades para a aplicação de método QR, que necessitou de modificações no próprio circuito utilizado, demonstram que a aplicabilidade dessas metodologias não é imediata para uma microrrede de topologia qualquer. É necessário entender de maneira consistente e generalizada quais modificações são necessárias, dado um determinado projeto de microrrede, para que se possa aplicar a correção de compartilhamento e, caso não seja possível realizar modificações em um circuito ou sistema de controle já existente, quais os limites para introdução de variações paramétricas sem que haja instabilidades na operação. Nesse sentido, as investigações realizadas apontam que os métodos QV e Qn são de mais fácil aplicação, uma vez que modificam parâmetros da própria equação *droop* e não calculam seus termos de variação paramétrica com base em um valor de corrente, como o método QR. Na Seção 3.3 argumentou-se que a presença da corrente poderia oferecer uma vantagem para esse método, em termos do resultado do compartilhamento de potência, o que, em contrapartida, pode mais facilmente resultar em instabilidades, conforme sugerem as simulações deste capítulo. Além disso, diferentemente dos métodos QV e Qn, que somente alteram parâmetros na própria equação do *droop*, o método QR modifica a tensão instantânea de referência produzida, após o *droop*, inclusive alterando a fase da tensão resultante, o que também pode aumentar a propensão desse método a instabilidades. Apesar desses indícios, é necessário discernir, posteriormente, se as observações realizadas são genéricas, ou específicas para o circuito utilizado.

5 CONCLUSÕES

Os resultados alcançados ao final do Capítulo 4 finalizam a pesquisa realizada neste trabalho, oferecendo, ao mesmo tempo, um certo grau de validação das metodologias propostas bem como motivações para continuação dos estudos realizados. Por um lado, olhando aquilo que já se desenvolveu, este trabalho apresentou uma reabordagem teórica sobre o problema do compartilhamento de potência em microrredes sem comunicação e as estratégias de controle *droop*, propondo uma nova maneira de pensar a escolha dos coeficientes de inclinação da relação $Q - V$. Além disso, no embasamento teórico realizado no Capítulo 2, aprofundou-se o entendimento do método QZ, processo que, juntamente com as investigações em simulação, cujos principais resultados são apresentados na primeira seção do Capítulo 3, possibilitou a proposição, na seção 3.2, das três variantes metodológicas com base na ideia da perturbação de n : os métodos Qn, QV e QR.

O primeiro pode ser considerado como uma solução inicial à pergunta problema que finaliza o Capítulo 2, sobre como escolher o conjunto de valores de inclinação n que resultem em compartilhamento proporcional de potência reativa, considerando a não obrigatoriedade da escolha proporcional desses coeficientes de inclinação. Como ficou claro quando da execução sem parada do método QZ, existem várias soluções possíveis de impedância virtual que equilibram o compartilhamento de potência reativa. Da mesma forma acontece para os demais métodos, inclusive para o método Qn. Ficou claro, que existem vários conjuntos de valores de n possíveis para a resolução do problema proposto, cada um resultando em um perfil de tensão distinto na microrrede. O método Qn, portanto, é capaz de buscar automaticamente esses conjuntos de valores, mas, a priori, não diz qual é o mais adequado, o que pode ser ainda investigado, por exemplo, em termos de estabilidade. Inclusive, a implementação do critério de parada por hora estabelecida tem papel fundamental na definição da resposta final do método, sendo também um aspecto cujo estudo pode ser aprofundado, visando a otimalidade do conjunto paramétrico obtido como solução. Os mesmos comentários valem para os dois outros métodos, mudando apenas o parâmetro que está sendo variado.

O método QV, por sua vez, representa uma versão fundamental da metodologia de correção de Q com base na perturbação de n . Isso porque é, dentre todas as metodologias, inclusive a original, a que modifica diretamente e sem artifícios a variável relevante, que, quando desbalanceada, é capaz de prover o balanceamento de potência reativa: a tensão. Todos os outros métodos propostos, e também os já existentes na literatura, realizam, de alguma forma, essa modificação de tensão. É claro que a dependência de uma grandeza medida, como no termo nQ e no termo Ri confere às outras variantes resposta automática a mudanças na microrrede, conforme se verificou. Ainda assim, a essência desses termos não é outra senão a de uma modificação de tensão.

Por fim, o método QR pode ser considerado como um sucessor semântico do método QZ, oferecendo uma reformulação da ideia de adicionar impedâncias virtuais. Embora não tenham desempenho idêntico, o que já enseja estudos comparativos, essas três variantes possuem uma quase-equivalência teórica, representando várias maneiras diferentes de se resolver o mesmo problema. Por outro lado, as simulações HIL realizadas no Capítulo 4 começaram a evidenciar que a aplicação dessas metodologias pode requerer especificidades para cada uma delas, a depender da microrrede. Os indícios obtidos apontam que o método QR pode ser mais propenso a instabilidades que os outros dois, requerendo modificações no circuito da microrrede que, para o caso realizado, consistiram na separação elétrica de cargas locais de seus pontos de conexão com os respectivos conversores. Além disso, remanescem outras questões referentes ao próprio processo da perturbação de parâmetros e que podem se tornar problemas relevantes em futuras aplicações experimentais das metodologias desenvolvidas: o estabelecimento de procedimentos bem definidos para o dimensionamento da constante h ; e a necessidade de sincronia entre as ondas de perturbação de n de cada conversor.

A pesquisa realizada teve maior foco na solução do problema de compartilhamento do ponto de vista do regime permanente, não tendo sido realizados estudos dinâmicos ou de estabilidade. A continuação de estudos seguindo esse viés poderá inclusive assegurar a generalidade dos métodos propostos, embora já se tenha bons indícios disso, além de colocá-los em condições de serem comparados com as demais metodologias de correção de compartilhamento existentes na literatura. Esse movimento poderá tornar as propostas estabelecidas neste trabalho mais próximas da aplicação, apontando suas vantagens, desvantagens e aspectos que podem ser melhorados. A premissa básica desta pesquisa e das vindouras é a proposição de resoluções de ampla e simples aplicação ao problema de compartilhamento de potência, tendo sido objeto deste trabalho as técnicas baseadas na perturbação de parâmetros. Nada impede, entretanto, que outras estratégias também sejam adotadas posteriormente, aproveitando os conhecimentos aqui já produzidos, para propor novas ideias. Com esses propósitos, são sugeridas a seguir, com base nas questões que ainda remanescem, algumas ideias para trabalhos futuros.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Explorar outras possibilidades metodológicas para a obtenção de conjuntos de valores de n que resultem em bom compartilhamento de potência em uma microrrede genérica, partindo do princípio da não obrigatoriedade da escolha proporcional desses coeficientes;
- Demonstrar que sempre é possível encontrar um tal conjunto de valores de n , para qualquer microrrede;
- Investigar a possibilidade de implementação de um critério auxiliar que permita discernir qual dos possíveis conjuntos paramétricos de solução para o problema de compartilhamento de potência reativa provoca as menores alterações nas tensões do sistema. Em outras

palavras, identificar o conjunto solução para o qual as tensões produzidas pelos conversores ficam o mais próximo possível da tensão nominal;

- Reabordar metodologias de compartilhamento de potência já existentes na literatura sob a ótica da não obrigatoriedade da escolha proporcional dos coeficientes n ;
- Demonstrar a validade do método QZ (e variantes) para uma microrrede genérica, evidenciando possíveis limitações;
- Comparar as metodologias propostas entre si e também com as demais metodologias existentes, estabelecendo, para isso, figuras de mérito adequadas;
- Estudar o comportamento das microrredes com relação à estabilidade quando sujeitas à aplicação dos métodos baseados na perturbação de parâmetros, inclusive, para possibilitar a comparação também nesse aspecto com outras metodologias mais amadurecidas;
- Projetar o controle dos conversores levando em conta a adição paramétrica realizada pelos métodos propostos e visando a obtenção de operação estável;
- Estudar e expandir os métodos abordados para aplicação em microrredes que possuam cargas não lineares;
- Explorar outras possibilidades para a perturbação do sistema com base em outro parâmetro (por exemplo V_0);
- Explorar outras formas de cálculo para as variações paramétricas; e
- Aprimorar o critério de parada e compreender melhor a sua relação com a constante h .

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, G. M. de S. *Controle e Operação de Conversores em Microrredes*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, Agosto 2011. Citado 9 vezes nas páginas 27, 30, 31, 35, 39, 40, 41, 42 e 132.
- AZEVEDO, G. M. S. et al. Comparative study of the power sharing techniques for microgrids in autonomous mode. In: *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. Santos, Brazil: IEEE, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 43.
- CHAPMAN, S. J. *Electric Machinery Fundamentals*. 5th. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2012. Citado na página 27.
- COELHO, E. A. A.; CORTIZO, P. C.; GARCIA, P. F. D. Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone ac supply systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 38, n. 2, p. 533–542, March 2002. Citado na página 27.
- COHN, L. History of microgrids in the us: From pearl street to plug-and-play. *Microgrid Knowledge*, July 2019. Disponível em: <<https://www.microgridknowledge.com/about-microgrids/article/11429549/history-of-microgrids-in-the-us-from-pearl-street-to-plug-and-play>>. Acesso em: 13 dez. 2024. Citado na página 21.
- De Brabandere, K. et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 22, n. 4, p. 1107–1115, July 2007. Citado 4 vezes nas páginas 34, 35, 42 e 43.
- D'ARCO, S.; SUUL, J. A. Equivalence of virtual synchronous machines and frequency-droops for converter-based microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 5, n. 1, p. 394–395, January 2014. Citado na página 27.
- EPE. *Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo*: Documento de apoio ao pne 2050. 2018. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-energia/plano-nacional-de-energia-2050/notas-para-discussao/consideracoes-sobre-a-expansao-hidreletrica-nos-estudos-de-planejamento-energetico-de-longo-prazo.pdf/view>>. Acesso em: 26 dez. 2024. Citado na página 21.
- GIRALDO, N. I. M. et al. Comparative study of microgrid power-sharing techniques based on synchronous machine emulation carried out in real-time simulation. In: *2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP)*. Florianópolis, Brazil: IEEE, 2023. Citado na página 43.
- GUERRERO, J. M. et al. A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 19, n. 5, p. 1205–1213, September 2004. Citado na página 41.
- GUERRERO, J. M. et al. Output impedance design of parallel-connected ups inverters with wireless load-sharing control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 52, n. 4, p. 1126–1135, August 2005. Citado na página 29.

GUERRERO, J. M. et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 54, n. 2, p. 994–1004, April 2007. Citado 4 vezes nas páginas 30, 33, 34 e 43.

HAN, Y. et al. Review of active and reactive power sharing strategies in hierarchical controlled microgrids. *IEEE transactions on Power Electronics*, v. 32, n. 3, p. 2427 – 2451, March 2017. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 38.

HE, J.; LI, Y. W. An enhanced microgrid load demand sharing strategy. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, v. 27, n. 9, p. 3984–3995, September 2012. Citado 6 vezes nas páginas 24, 30, 33, 34, 42 e 49.

IEA. Global energy review 2020: The impacts of the covid-19 crisis on global energy demand and co2 emissions. *IEA reports*, April 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>>. Acesso em: 23 dez. 2024. Citado na página 20.

IEA. What the data centre and ai boom could mean for the energy sector. *IEA*, October 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org/commentaries/what-the-data-centre-and-ai-boom-could-mean-for-the-energy-sector>>. Acesso em: 23 dez. 2024. Citado na página 20.

JAFARI, M.; GHAREHPETIAN, G. B.; ANVARI-MOGHADDAM, A. On the role of virtual inertia units in modern power systems: A review of control strategies, applications and recent developments. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 159, August 2024. Citado na página 27.

KOSARI, M.; HOSSEINIAN, S. H. Decentralized reactive power sharing and frequency restoration in islanded microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 32, n. 4, p. 2901–2912, July 2017. Citado 9 vezes nas páginas 13, 24, 30, 33, 49, 103, 131, 132 e 134.

LASSETER, R. H. Microgrids. In: *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*. New York, NY, US: IEEE, 2002. Citado na página 21.

LEE, C.-T.; CHU, C.-C.; CHENG, P.-T. A new droop control method for the autonomous operation of distributed energy resource interface converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 28, n. 4, p. 1980–1993, April 2013. Citado 3 vezes nas páginas 24, 30 e 33.

LI, Y. W.; KAO, C.-N. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 24, n. 12, p. 2977–2988, December 2009. Citado na página 49.

LIMA, W. C. *Desenvolvimento de Metodologias de Equivalentes de Sistemas Elétricos para Aplicação em ANAREDE*. 121 p. Monografia (Graduação) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022. Citado na página 38.

LIU, Y. et al. A reactive power-voltage control strategy of an ac microgrid based on adaptive virtual impedance. *Energies - Advanced Control in Microgrid Systems*, August 2019. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 52.

MARTINS, N.; DINIZ, A. L.; BARROS, J. C. G. A grid of microgrids: Is it the right answer? In: *Proceedings of the IEEE*. [S.l.]: IEEE, 2020. v. 18, n. 2. Citado na página 22.

MATLAB, version R2021a. [S.l.]: Mathworks, 2021. Programa de computador. Nenhuma citação no texto.

MUQEET, H. A. et al. An energy management system of campus microgrids: State-of-the-art and future challenges. *Energies*, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en14206525>>. Citado na página 23.

POGAKU, N.; PRODANOVIC, M.; GREEN, T. C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 22, n. 2, p. 613–625, March 2007. Citado 5 vezes nas páginas 13, 41, 131, 133 e 134.

ROSINI, A. et al. A review of reactive power sharing control techniques for islanded microgrids. *Energies - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 141, n. 3, May 2021. Citado 3 vezes nas páginas 23, 38 e 39.

SAHEBI, R. et al. A wavelet-based droop control of reactive power sharing and frequency regulation in islanded microgrids. In: *2023 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*. Istanbul, Turkiye: IEEE, 2023. Citado na página 103.

SHUWEI, Z. Why china's renewables push fuels coal power investment. *Dialogue Earth*, March 2023. Disponível em: <<https://dialogue.earth/en/energy/chinas-renewables-push-fuels-coal-power-investment/>>. Acesso em: 24 dez. 2024. Citado na página 21.

SMADI, I. A.; SHEHADEH, L. I. An improved reactive power sharing in an isolated microgrid with a local load detection. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, v. 9, n. 2, p. 14–26, June 2023. Citado na página 49.

SOARES, R. M.; OLIVEIRA, M. E. de. Microrredes: o conceito através da história, incentivos e o mercado brasileiro. In: *IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2022*. Santa Maria, RS, Brazil: SBA, 2022. Citado na página 21.

TULADHAR, A. et al. Control of parallel inverters in distributed ac power systems with consideration of line impedance effect. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, v. 36, n. 1, p. 131–138, January 2000. Citado na página 47.

TYPHOON HIL 404 Brochure. Typhoon HIL Company, 2024. Disponível em: <<https://typhoon-hil.com/doc/brochures/Typhoon-HIL404-Brochure.pdf>>. Citado na página 131.

TYPHOON HIL Control Center, version 2024.1. Typhoon HIL Company, 2024. Programa de computador. Disponível em: <<https://www.typhoon-hil.com/support/software-releases/>>. Nenhuma citação no texto.

WARD, J. B. Equivalent circuits for power flow studies. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 68, n. 1, p. 373 – 382, July 1949. Citado na página 38.

WU, X.; ZHANG, X.; ZHAN, D. L. X. A reactive power sharing strategy of parallel inverters based on parameter perturbation. In: *2023 IEEE 2nd International Power Electronics and Application Symposium (PEAS)*. Guangzhou, China: IEEE, 2023. Citado 9 vezes nas páginas 25, 26, 69, 70, 72, 74, 79, 111 e 130.