

Laboratório de Modelagem, Análise e Controle de Sistemas Não-Lineares
Departamento de Engenharia Eletrônica
Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG Brasil
Fone: +55 3499-4866 - Fax: +55 3499-4850



Análise de Estabilidade e Desempenho de Técnicas de Paralelismo sem Comunicação Aplicadas a Sistemas UPS Não Idênticas

Everthon de Souza Oliveira

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Leonardo Antônio Borges Torres, PhD
Prof. Luis Antonio Aguirre, PhD

Belo Horizonte, fevereiro de 2012

Agradecimentos

Agradeço a Deus, Nosso Senhor e Esperança minha, pela Tua amizade fiel.

Agradeço ao Prof. Leonardo Tôres pela paciência, compreensão e pelo exemplo de profissional a ser seguido.

Agradeço ao Prof. Luis Aguirre por compartilhar o que possuía de mais valioso. De tantas coisas que poderia ter aprendido, de certo escolhi a melhor parte.

Agradeço à minha namorada Neila pelo amor cada dia mais perfeito.

Agradeço aos meus pais, por acreditarem em mim sempre e por suportarem as ausências. Aos meus irmão Welington e Patrícia pelo carinho e amizade.

Agradeço aos amigos do GCoM, especialmente aos professores Erivelton e Gleison, aos quais muito devo.

Agradeço aos amigos do MACSIN, especialmente a Rodrigo Ricco, Anny Verly, Alípio Monteiro e Suzane Tavares pelo companheirismo e cumplicidade.

Agradeço aos amigos do Ministério Universidades Renovadas e à Comunidade Palavra Viva, pelo acolhimento e vida fraterna tão necessários em todo este tempo.

Agradeço à Capes e CNPq pelo apoio financeiro.

Epígrafe

“O Senhor é um Deus eterno. Ele cria os confins da terra, sem jamais fatigar-se nem aborrecer-se; ninguém pode sondar sua sabedoria. Dá forças ao homem acabrunhado, redobra o vigor do fraco. Até os adolescentes podem esgotar-se, e jovens robustos podem cambalear, mas aqueles que contam com o Senhor renovam suas forças; ele dá-lhes asas de águia. Correm sem se cansar, vão para a frente sem se fatigar. ”

Isaías 40:28-31.

Resumo

O aumento da demanda por energia elétrica de qualidade e a necessidade crescente de se aproveitar fontes de energia alternativas, tem motivado inúmeros trabalhos sobre o paralelismo de sistemas UPS (*Uninterruptible Power Supply*). Neste contexto, técnicas tem sido desenvolvidas para o paralelismo e análise de estabilidade de sistemas UPS sem comunicação, os quais não trocam explicitamente informações entre si para o estabelecimento da condição de sincronismo no sistema. Contudo, a maioria dessas técnicas considera as UPS idênticas, o que na prática é quase impossível, uma vez que os valores reais dos componentes raramente são iguais. Este trabalho apresenta um estudo sobre a sincronização e estabilidade de UPS não idênticas (com pequenas divergências paramétricas) acopladas a um barramento de carga, assumindo cada unidade como um oscilador não linear. É feita uma breve revisão das técnicas de paralelismo de UPS sem comunicação baseadas no método de Curvas de Decaimento (Droop Method) e das metodologias de análise de sinais de potências ativa e reativa. Foram estipuladas métricas que permitiram comparar, por meio de análise Monte Carlo baseada em resultados de simulação, a robustez de alguns métodos de sincronização quanto à imprecisão paramétrica e presença de ruídos nas medições, e o quanto esses fatores alteram a qualidade da energia fornecida. As técnicas testadas se mostraram robustas para os níveis de incerteza e ruído testados. O método de análise de estabilidade utilizando multiplicadores de Floquet, adaptado para o caso não idêntico, é também apresentado neste trabalho, tendo como principais limitações a necessidade de se conhecer previamente a trajetória síncrona do sistema e a hipótese de erro de sincronismo periódico. Apesar disso, o fato do comportamento síncrono, para pequenas variações de parâmetros, ser diverso do comportamento alvo, não parece afetar significativamente a análise de estabilidade por meio desta técnica, o que permitiu obter numericamente faixas de parâmetros para as UPS correspondentes a regiões em que o comportamento síncrono é estável.

Abstract

The increase on the demand for high quality electrical energy supplies and the increasing use of alternative energy sources has motivated several works on the parallel operation of UPS (Uninterruptible Power Supply) systems. In this context, some techniques have been developed for the stability analysis of parallel operation, without communication, of UPS systems. In this specific case there is no explicit exchange of information among the UPS units to achieve the synchronization condition in the whole system. In the theoretical analysis of such systems, in most of these techniques, it is usual to consider that the UPS units are identical, which is a very restrictive condition in real applications. In this dissertation the stability analysis of the synchronization condition is presented taking into consideration small parametric mismatches among the UPS units, while they are connected to a common power bus supplying energy to the same load, and assuming that each unit behaves as a nonlinear oscillator. After a brief review of the UPS parallel operation techniques without communication, which are based on the so-called Droop Method that depends on estimates of the active and reactive powers delivered by each UPS unit, some metrics are proposed to compare, by means of Monte Carlo analysis based on simulation results, the performance robustness to parametric mismatch and presence of noise on the measurements. Finally, it is shown that the tested techniques, for the levels of parametric uncertainty and measurement additive noise considered, seems to be robust. The method of stability analysis using Floquet multipliers, adapted for the non identical UPS units case, is also presented in this work. The main limitations of this stability analysis technique is the necessity of prior knowledge on the synchronous trajectory of the system, and the assumption of periodic synchronization error. Although the synchronous behavior corresponding to small changes in the parameters is different from the target behavior, such fact seems to not affect the qualitative analysis based on this technique, and therefore synchronous stability regions in the UPS units parameter space could be obtained for the non identical case.

Sumário

Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xvi
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Símbolos	xix
Lista de Abreviações	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Paralelismo de UPS	4
1.3 Sincronismo de Sistemas Dinâmicos	6
1.4 Visão Geral do Problema	7
1.5 Objetivos do Projeto	7
1.6 Organização do Trabalho	8

2	Modelagem e Sincronismo de UPS: Uma Breve Revisão	9
2.1	Introdução	9
2.2	Sincronismo Aplicado ao Paralelismo de UPS	10
2.2.1	Definição de Sincronismo	11
2.2.2	Qualidade de sincronismo	12
2.2.3	Estabilidade de sincronismo	13
2.2.4	Sincronismo aplicado ao paralelismo sistemas UPS	13
2.3	Definição da Estrutura Adotada	14
2.4	Paralelismo Sem Comunicação	15
2.4.1	Relação das potências e o método <i>Droop</i>	15
2.4.2	Métodos de determinação das constantes de decaimento	17
2.4.3	Revisão dos métodos de estimação das potências	18
2.4.4	Modelo completo da UPS acoplada	22
2.5	Conclusão	24
3	Simulação Monte Carlo do Acoplamento entre UPS	27
3.1	Motivação	27
3.2	O Sistema Adotado	28
3.2.1	Definição do sistema	29
3.2.2	Modelo I	29
3.2.3	Modelo II	30
3.2.4	Definição dos parâmetros	31
3.3	Definição das Condições para Simulações Numéricas	31

3.3.1	Método de integração	31
3.3.2	Condições iniciais	32
3.3.3	Período transiente	32
3.3.4	Variação de parâmetros	33
3.3.5	Ruído nos sinais medidos	34
3.4	Métricas para Avaliação da Qualidade da Energia	34
3.4.1	Desvio da frequência	35
3.4.2	Desvio da tensão	36
3.4.3	THD - taxa de distorção harmônica	36
3.4.4	Gasto adicional de energia durante o regime transitório	37
3.4.5	Determinação das constantes k_{ω} e k_u	38
3.5	Resultados	38
3.6	Conclusão	42
4	Análise de Estabilidade do Sincronismo de UPS Não Idênticas	45
4.1	Introdução	45
4.2	Análise de Estabilidade Local	46
4.2.1	Revisão das técnicas de análise de estabilidade	47
4.3	Análise de Estabilidade por Multiplicadores de Floquet	49
4.3.1	Sistema linear variante no tempo	49
4.3.2	Sistemas periódicos e transformação de Floquet	50
4.3.3	Aplicação da teoria de Floquet	51
4.4	Análise da Estabilidade de Sincronismo de UPS	51

4.5	Estabilidade do Sincronismo de UPS Não Idênticas	54
4.5.1	Análise numérica para dois osciladores não idênticos	55
4.5.2	Determinação da solução síncrona	59
4.5.3	Definição dos limites de estabilidade	62
4.6	Conclusão	63
5	Conclusões	67
5.1	Conclusões Gerais	67
5.2	Contribuições	69
5.3	Trabalhos Futuros	69
	Bibliografia	73

Lista de Figuras

1.1	Problemas comuns no sinal de tensão da rede elétrica.	2
1.2	Composição do prejuízo industrial causados por problemas no fornecimento de energia.	2
1.3	Estrutura típica de aproveitamento de pequenas fontes.	3
1.4	Estruturas de paralelismo de UPS com e sem comunicação entre os agentes.	5
2.1	Circuito do inversor de frequência da UPS.	14
2.2	Modelo simplificado de uma UPS.	15
2.3	Desenho esquemático do método <i>Droop</i>	17
2.4	Leis de controle do método <i>Droop</i> tradicional.	18
2.5	Método de defasamento da tensão de saída.	20
2.6	Método de decomposição da corrente de saída.	21
2.7	Método da filtragem direta e função não linear.	22
2.8	Sistemas de n UPS conectadas a um barramento alimentando uma carga linear resistiva.	23
3.1	Sistemas de 3 UPS conectadas a um barramento alimentando uma carga linear resistiva.	29
3.2	Casos típicos das correntes de saída das <i>UPS</i>	39
3.3	Casos típicos da amplitude de tensão imposta sobre a carga.	39
3.4	Caso típico da frequência do sinal de tensão entregue a carga.	40
3.5	Resultado da simulação Monte Carlo para variação da amplitude da tensão.	40

3.6	Resultado da simulação Monte Carlo para variação da frequência do sinal de tensão.	41
3.7	Resultados das simulações Monte Carlo para a amplitude da tensão com ruído nos dados de medição.	41
3.8	Resultados da simulações Monte Carlo para a frequência do sinal de tensão com ruído nos dados de medição.	42
3.9	Histogramas do desvio da amplitude da tensão com relação à nominal.	42
3.10	Histogramas do desvio da frequência fundamental da tensão com relação à nominal.	43
3.11	Histograma da distorção harmônica total resultante de cada método.	43
3.12	Histograma do gasto adicional de energia durante o regime transitório.	44
4.1	Sistemas de 2 UPS não idênticas conectadas a um barramento alimentando uma carga linear resistiva.	56
4.2	Projeção da evolução dos estados $x_{11} \times x_{12}$ (-) da relativos a UPS 1 e $x_{21} \times x_{22}$ (-) da relativos a UPS 1	57
4.3	Dinâmica das correntes para o caso não idêntico.	58
4.4	Multiplicadores de Floquet no plano complexo.	59
4.5	Módulo do maior dos multiplicador de Floquet com UPS idênticas analisando a sensibilidade do método ao parâmetro k_u e k_ω	60
4.6	Módulo do maior dos multiplicador de Floquet com UPS idênticas analisando a sensibilidade do método ao parâmetro k_u e k_ω para o caso não idêntico.	61
4.7	Módulo do maior dos multiplicador de Floquet com UPS idênticas analisando a sensibilidade do método ao parâmetro L_a para o caso idêntico.	61
4.8	Módulo do maior dos multiplicador de Floquet com UPS idênticas analisando a sensibilidade do método ao parâmetro L_a para o caso não idêntico.	62
4.9	Maior e menor multiplicador de Floquet em função das constantes k_u e k_ω	63
4.10	Maior e menor multiplicador de Floquet em função do valor nominal do indutor.	64
4.11	Curva que determina a região de estabilidade baseado em k_u e k_ω e L_a	65

Lista de Tabelas

3.1	Valores dos parâmetros utilizados nas simulações para realização de testes numéricos.	32
3.2	Classificação das variações de tensão de curta duração.	36
4.1	Conjuntos de parâmetros utilizados para a análise numérica de dois osciladores não idênticos.	57
4.2	Valores dos parâmetros utilizados nas simulações para os testes de estabilidade.	60

Lista de Símbolos

A, B, C, K	Matriz genérica;
D_f	Matriz Jacobiana em relação ao campo vetorial f ;
e	Erro de sincronismo;
E	Fasor de Tensão;
E_a	Gasto adicional de energia durante o regime transitório;
$f, g, h, v, s, \psi, \Psi, \Gamma$	Função genérica;
I	Fasor de Corrente;
I_n	Matriz identidade de ordem n ;
i	Sinal de corrente elétrica;
J	Função custo para otimização;
\vec{K}_k	Conjunto de parâmetros k ;
\vec{K}_p	Conjunto de parâmetros padrão;
k_ω	Inclinação curva decaimento da potência ativa;
k_u	Inclinação curva decaimento da potência reativa;
L_a	Indutor de acoplamento;
\mathbf{M}	Matriz Monodromia;
\mathbf{N}	Conjunto dos números naturais;
P	Potência ativa;
P_e	Potência ativa estimada;
P_{inst}	Potência Instantânea;

Q	Potência reativa;
Q_e	Potência reativa estimada;
R_c	Carga linear;
\mathbb{R}	Conjunto dos números reais;
R_a	Resistor de acoplamento;
S	Potência aparente;
u	Sinal de Entrada;
u, v	Sinais de tensão;
u_{or}	Tensão de referência;
u_o	Tensão de saída;
\vec{x}_s	Solução síncrona;
\vec{x}_{sp}	Solução síncrona padrão;
\vec{x}_s	Estado Síncrono;
X	Reatância de acoplamento;
x_{ij}	Variável de estado j do sistema i ;
\vec{x}	Vetor de Estado;
\vec{y}	Sinal de Saída;
\mathbb{Z}	Conjunto dos números inteiros;
Z_a	Impedância de acoplamento;
α, β	Parâmetros que caracterizam o acoplamento de cada UPS;
θ	Ângulo de fasor;
λ	Multiplicador de Floquet;
v_i	Sinais de ruído de corrente;
v_v	Sinais de ruído de tensão;
ρ	Expoente de Lyapunov;
Σ_n	Sistema dinâmico n ;
σ_{v_i}	Desvio padrão do ruído de corrente;

- σ_{v_v} Desvio padrão do ruído de tensão ;
- Φ Matriz de transição de estados;
- ϕ Ângulo de carga;
- ω Frequência angular;
- ω_c Frequência de corte;
- ω_{or} Frequência de referência.

Lista de Abreviações

CA	Corrente Alternada;
CC	Corrente Contínua;
FBP	Filtro Passa-Baixas;
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>);
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>);
LC	Filtro passivo do tipo indutivo L e capacitivo C;
PI	Controlador do tipo Proporcional e Integral;
PLL	Malha de Fase Travada (<i>Phase-Locked Loop</i>);
PWM	Modulação por Largura de Pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>);
SEP	Sistema Elétrico de Potência;
THD	Taxa de Distorção Harmônica (<i>Total Harmonic Distortion</i>);
UPS	Fonte de energia ininterrupta (<i>Uninterruptible Power Supply</i>);
VSVC	Fonte de tensão controlada por tensão (<i>Voltage Controlled-Voltage Source</i>).

Introdução

“Se chegaram a tão vasta ciência, a ponto de investigarem o universo, como que não encontraram mais facilmente o seu Senhor?”

Livro da Sabedoria 13,1-9

1.1 Motivação

A demanda por energia elétrica tem crescido exponencialmente em todo o mundo. Além da necessidade de uma maior geração tem aumentado a exigência por uma energia de maior qualidade. Isso se deve à crescente demanda por cargas consideradas críticas, tais como hospitais, centrais de segurança, dados e comunicações dentre outras, que necessitam de uma redundância de proteção do fornecimento de energia elétrica.

Espera-se que as novas tecnologias sejam capazes de responder a essas necessidades: o aumento da capacidade geradora de forma inteligente e sustentável, e a melhoria da energia fornecida a um nível maior de qualidade e confiabilidade.

Atualmente são mais críticos os riscos e prejuízos derivados de um fornecimento de energia de má qualidade.

A qualidade de energia está associada a permanência do fornecimento e ao índice de distorção do formato e amplitude do sinal de tensão. Os principais problemas de fornecimento de energia são:

- picos (elevações temporárias ou momentâneas da amplitude da tensão);
- afundamentos (reduções temporárias ou momentâneas da amplitude da tensão);
- variação de frequência;
- interrupção;
- transientes.

O efeito desses fenômenos no sinal de tensão é ilustrado na Figura 1.1.

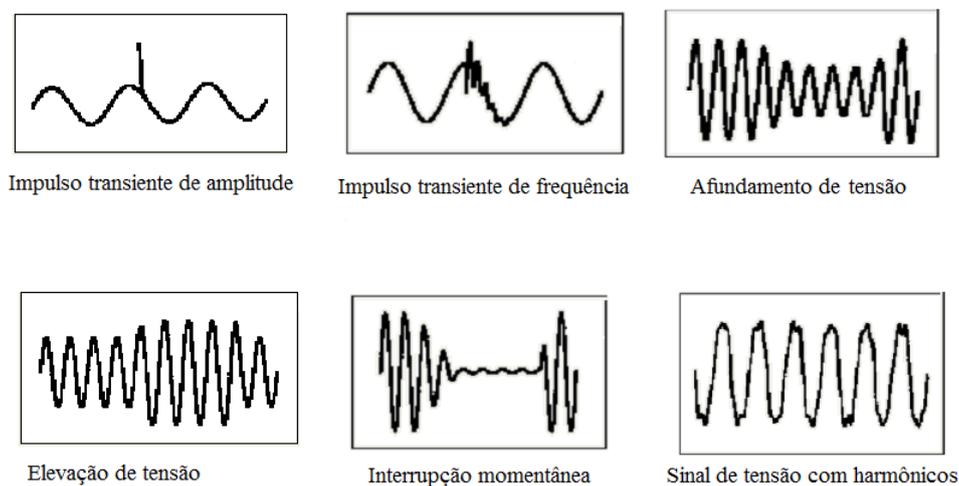


Figura 1.1: Problemas comuns no sinal de tensão da rede elétrica.

Os problemas na alimentação podem causar: queima de equipamentos, falha de programas, parada em processos produtivos, erros de processamento ou transmissão de dados. Por isso é importante que o fornecimento de eletricidade seja estável e de qualidade.

A maioria dos problemas enfrentados na qualidade do fornecimento de energia está relacionado com os afundamentos de tensão. A Figura 1.2 mostra a estatística dos problemas de qualidade mais comuns.

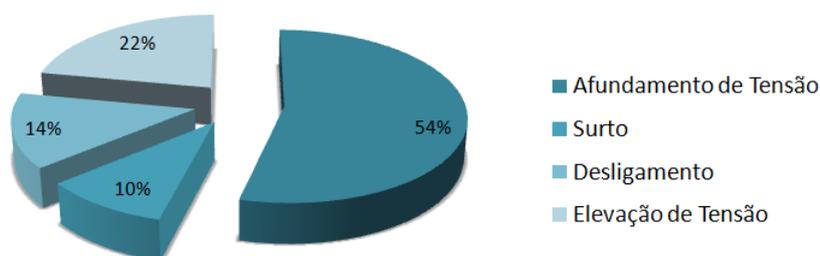


Figura 1.2: Composição do prejuízo industrial causados por problemas no fornecimento de energia.

Uma solução para esses desafios que vem ganhando cada vez mais notoriedade é a utilização de sistemas UPS¹ ou fontes ininterruptas de energia. Sistemas UPS são geralmente conversores estáticos, com atuação rápida em caso de falha no fornecimento principal.

Sistemas UPS fornecem proteção contra diversos tipos de falha da rede elétrica e também são capazes de filtrar uma vasta gama de perturbações encontradas no fornecimento de energia, podendo alimentar cargas mais sensíveis com uma energia elétrica de qualidade.

O caso de UPS protegendo cargas críticas é a aplicação mais comum desses equipamentos e podem ser vistas como uma interface rede-carga que funciona como filtro e fonte secundária de energia. Contudo, o desenvolvimento científico e tecnológico desta aplicação contribui indiretamente para a solução de outra questão atual e relevante: a utilização de diversas fontes energéticas.

Dada a escassez de grandes fontes na matriz energética, torna-se cada vez mais necessário a utilização de pequenas centrais geradoras que estejam conectadas ao sistema elétrico fornecendo energia conforme sua capacidade máxima. Uma tendência bastante atual dentro da Engenharia Elétrica que visa alcançar isto, são as *Smart-Grids*, ou redes inteligentes. Sistemas geradores capazes de sincronizar com a rede a partir de qualquer ponto de interconexão trazem uma série de aplicações promissoras. Entre elas, o aproveitamento das mais diversas fontes de energia disponíveis para fornecimento do sistema elétrico ou a um subsistema qualquer, capazes de conectar-se conforme a demanda e distâncias das fontes geradoras (Quintero, 2009). A Figura 1.3 mostra uma estrutura de uma rede *Smart-Grids* que utiliza diversas fontes primárias.

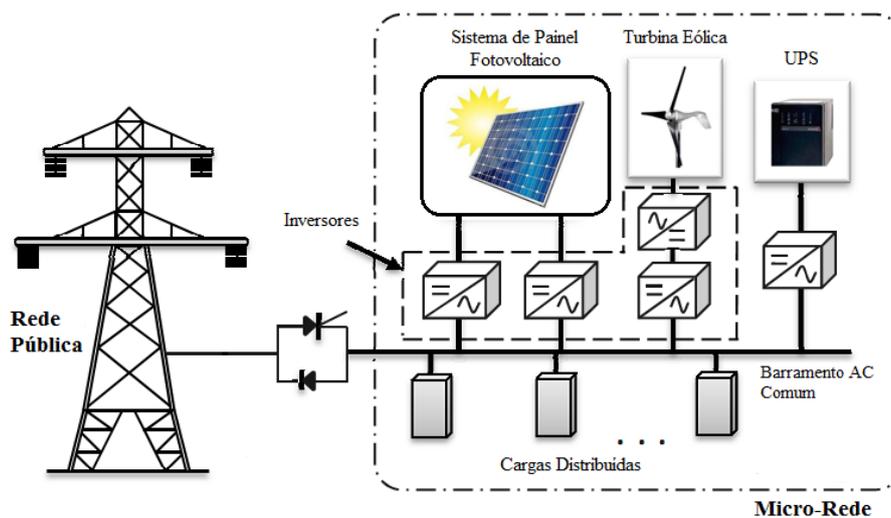


Figura 1.3: Estrutura típica de aproveitamento de pequenas fontes.

¹Em inglês *Uninterruptible Power Supply*.

Seja para conectar pequenas fontes de energia quanto para filtrar imperfeições na rede, o paralelismo de inversores se mostra como uma solução do ponto de vista de melhoria da robustez e sincronismo de fontes diversas. Entretanto, do ponto de vista da engenharia é um problema desafiador que engloba várias áreas da engenharia elétrica.

1.2 Paralelismo de UPS

O paralelismo de UPS é muito investigado com o interesse de melhorar a qualidade de energia e segurança de uma dada fonte de energia elétrica além de aumentar a aplicabilidade de tais sistemas.

No caso de falhas da rede, as unidades acopladas podem atuar como fonte de energia evitando a interrupção do fornecimento. As principais vantagens do paralelismo de UPS são:

- Aumento na segurança da rede, melhorando a robustez do sistema no caso de falhas.
- A conexão em paralelo também possibilita a divisão da energia por cada UPS sem sobrecarregá-las, conferindo um aumento modular da potência máxima de acordo com o número de UPS.
- Simplicidade e flexibilidade de operação, proteção, manutenção.

A conexão em paralelo de UPS é mais complexo que o paralelismo de fontes CC, uma vez que além da correta divisão da carga, as unidades devem se manter sincronizadas.

O uso de sistemas UPS distribuídos presume o desenvolvimento tecnológico para o problema do paralelismo de inversores. Na literatura são apresentadas diversas técnicas para esse fim, diferindo entre o uso ou não de comunicação para alcançar o sincronismo entre as unidades.

Comunicação entre os agentes

Existem dois tipos de paralelismo no que diz respeito ao tipo de conexão: Paralelismo com e sem comunicação direta entre os agentes, como pode ser visto na Figura 1.4.

Com comunicação: neste tipo de paralelismo de UPS existe uma troca ativa de informação, geralmente por uma unidade mestre ou por conexões extras, interligando cada unidade por onde são transmitidas e recebidas informações dos valores de estados para ações de controle. A maioria das técnicas de paralelismo com comunicação é derivada de esquemas de controle de conversores cc-cc conectados em paralelo (Guerrero et al., 2008). As configurações mais comuns são: *Controle centralizado* (Martins

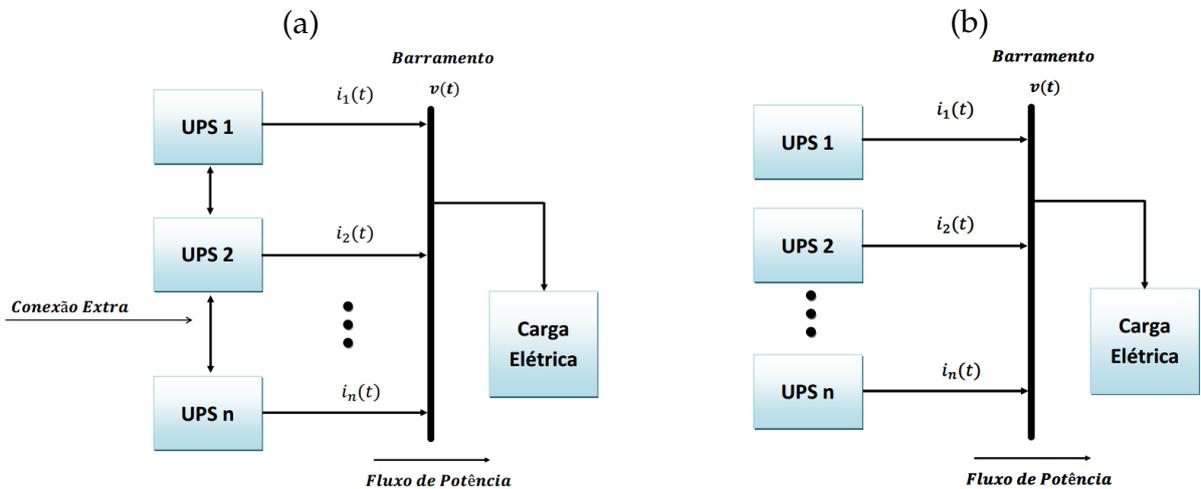


Figura 1.4: Estruturas de paralelismo de UPS a) com comunicação entre os agentes, b) sem comunicação entre os agentes. No esquema com comunicação é requerido uma conexão extra para troca de informações como corrente fornecida, defasamento angular e potência instantânea.

et al., 1995), *Controle Mestre escravo* (Holtz e Werner, 1988; Cheng et al., 2006), e *Controle tipo Cadeia Circular* (Wu et al., 2000). Embora esses esquemas alcancem bons resultados no sincronismo de tensão e compartilhamento de carga, a dependência de linhas de conexão² seguras é muito crítica, podendo no caso de falha trazer graves consequências à rede de UPS. Além disso, a dependência da comunicação limita a expansão geográfica e do número de unidades na rede UPS. Pode ainda tornar a implementação prática extremamente complexa, se o número de unidades for excessivamente grande. Coelho (2000) afirma que o uso de comunicação é interessante quando usado na redundância de informação sem a dependência crítica da comunicação.

Sem comunicação: representa as técnicas de controle de paralelismo de UPS que não utilizam troca de informação diretamente entre os agentes. O controle é feito utilizando as informações locais de tensão e corrente de saída de UPS. Portanto, cada UPS é um agente autônomo com controle independente e pode teoricamente, sincronizar à rede a partir de qualquer ponto de conexão. Um exemplo de controle sem comunicação é obtido pela técnica *Decomposição das Correntes de Saída* (Sato et al., 2003), contudo, o principal método de controle para o paralelismo sem comunicação é o *método Droop* (Tuladhar et al., 1997). Esta técnica consiste em ajustar a frequência e amplitude de tensão de saída em função das potências ativa e reativa entregue pelo inversor. O método *Droop* alcança maior confiabilidade e flexibilidade na localização física dos módulos, uma vez que usa apenas medições locais. Contudo, o método *Droop* mostra vários inconvenientes que limitam sua área de aplicação, tais como lenta resposta transitória, divisão não proporcional de harmônicos de corrente e erro em regime permanente dos valores de frequência e amplitude de tensão de saída.

Algumas dessas desvantagens foram minimizadas por vários pesquisadores que

²Há também esquemas de conexão por redes sem fio, mas o sentido é o mesmo, também sujeitas a falhas.

apresentaram melhorias ao método *Droop* (Guerrero et al., 2006; Santos Filho, 2009).

Embora existam diversas técnicas divulgadas, considera-se que tais técnicas ainda não foram suficientemente exploradas, no que diz respeito às suas limitações teóricas e práticas.

O paralelismo sem comunicação vem sendo utilizado como uma das principais formas de sincronismo de UPS. Desta forma foi adotado neste trabalho o paralelismo sem comunicação utilizando o método *Droop* como tema de estudo e investigação. Os métodos de paralelismo, bem como as técnicas de análise que serão estudadas neste trabalho, baseiam-se no método *Droop* e por esse motivo tal método será melhor descrito no Capítulo 2.

1.3 Sincronismo de Sistemas Dinâmicos

O paralelismo de diferentes fontes de energia pode ser entendido como um problema de controle na área de sincronismo. Um estudo propondo essa análise foi feito em Furtado (2009).

O objetivo principal da sincronização é alcançar um estado de coerência entre propriedades de interesse dos sistemas em questão a partir de um acoplamento entre eles. Existem dois objetivos principais no sincronismo de UPS:

- Sincronismo de tensão, igualando amplitude, frequência e fase;
- Correta divisão de carga, a fim de não sobrecarregar nenhuma unidade (igualdade da potência fornecida).

A teoria de sincronização de sistemas dinâmicos tem desenvolvido diversas técnicas que possibilitam a análise da operação conjunta de sistemas, bem como o projeto de acoplamentos que sejam estáveis. Isso torna interessante a tentativa de explorar o relacionamento entre essa área e a área de Eletrônica de Potência, a fim de buscar possíveis contribuições.

Estabilidade de Sincronismo

A análise de estabilidade é parte relevante da teoria de sistemas dinâmicos. Um sistema pode ser avaliado segundo sua estabilidade de duas formas: estabilidade estrutural e estabilidade de solução. A estabilidade estrutural avalia a dinâmica qualitativa do sistema sob pequenas variações na transformação que o define. A estabilidade de solução (ou numérica) diz se o sistema é estável em torno de uma solução se a partir de uma dada condição inicial os estados desse sistema convergem para essa mesma solução.

A maioria dos trabalhos sobre a estabilidade de um sistema elétrico de potência trata da análise da estabilidade de solução (ou numérica) e normalmente é considerada em duas categorias. A primeira é a estabilidade para pequenos sinais, onde são consideradas pequenas perturbações em torno de um ponto de equilíbrio (Coelho, 2000; Xinchun et al., 2003). O sistema é linearizado em torno do ponto de equilíbrio e então são aplicadas as ferramentas usuais para análise de sistemas lineares. Outra categoria de análise é a estabilidade transitória, utilizada para o estudo de grandes perturbações, onde há a necessidade de se considerar as equações não lineares completas do sistema (Furtado, 2009). Neste caso, é interessante considerar modelos ou estruturas de menor ordem.

1.4 Visão Geral do Problema

Neste trabalho será feito o paralelismo de osciladores senoidais encarando-o como um problema da teoria de sincronismo.

O objetivo é investigar uma rede de osciladores senoidais não idênticos que possam interagir unicamente pelo barramento. Além disso, esses geradores devem permitir o controle da amplitude e frequência da tensão de saída de cada oscilador. Não será testado paralelismo de UPS com a rede, mas apenas entre UPS alimentando uma única carga.

Pretende-se avaliar as consequências das diferenças paramétricas entre os modelos na qualidade da energia fornecida e analisar a estabilidade do sincronismo neste caso.

Esse tema, embora muito estudado, deve ser constantemente revisitado, pois há muito o que avançar tanto em estudos aprofundados quanto em utilização de novas tecnologias. Além disso, o surgimento incessante de tecnologias mais avançadas motivam a releitura de problemas com essa complexidade.

Este trabalho se insere num problema de várias faces da Engenharia Elétrica, concatenando conceitos da teoria de controle, métodos numéricos e Eletrônica de Potência, fazendo análises não somente dos regimes estacionários, mas também dos regimes transientes por meio da teoria de sistemas dinâmicos.

Outra motivação importante consiste na direta aplicação dos resultados deste trabalho em geração distribuída, na qual diversas fontes de energia podem ser sincronizadas, no sentido de fornecer potência proporcional às suas respectivas capacidades, para as cargas conectadas a um barramento.

1.5 Objetivos do Projeto

Os objetivos específicos deste projeto são:

- Investigar o paralelismo de osciladores senoidais encarando-o como um problema da teoria de sincronismo.
- Revisar os métodos de análise de estabilidade e controle do paralelismo de UPS.
- Investigar a influência da incerteza paramétrica das UPS no sincronismo, considerando essa incerteza como um caso de sincronismo não idêntico. Por meio de simulação Monte Carlo, pretende-se comparar o desempenho de dois modelos de UPS diante deste cenário.
- Estudar a estabilidade de unidades UPS não idênticas alimentando uma carga linear considerando a diferença paramétrica entre as unidades e determinado os limites dos parâmetros que garantem estabilidade para esse caso.

1.6 Organização do Trabalho

No Capítulo 2, será descrito o problema de paralelismo de UPS visto como um problema de sincronismo de sistemas dinâmicos. Uma pequena revisão sobre esta área será feita a fim de fornecer algumas bases para este trabalho. É feita uma revisão sobre o paralelismo de UPS sem comunicação.

Será feita uma comparação das técnicas de paralelismo de UPS propostas por Coelho (2000) e Furtado (2009) no Capítulo 3. Para tanto são definidas métricas de comparação visando mensurar a qualidade de energia fornecida pelas UPS conectadas em paralelo controladas por cada técnica. As resoluções normativas definidas em ANEEL (2010) são utilizadas para definição dos critérios de comparação. Os testes numéricos são feitos para o caso não idêntico em que são consideradas pequenas diferenças nos parâmetros de acoplamento. É feita a simulação tipo monte Carlo para avaliar vários cenários de diferença entre as unidades e suas consequências na qualidade da energia. Neste capítulo não se atem às condições de estabilidade. É definida uma metodologia para determinação das constantes do método *Droop*.

No Capítulo 4 é feita uma revisão das técnicas de estabilidade e um enfoque é dado na técnica de análise por meio de multiplicadores de Floquet que considera a estabilidade do transitório. É apresentado o problema para o caso não idêntico e levantado os limites de estabilidade nesse caso.

Por fim, tem-se algumas considerações finais do trabalho e propostas de trabalhos futuros no Capítulo 5.

Modelagem e Sincronismo de UPS: Uma Breve Revisão

“O Senhor completará o que em meu auxílio começou. Senhor, eterna é a vossa bondade: não abandoneis a obra de vossas mãos.”

Salmos 138:7-8

2.1 Introdução

O uso de UPS vem crescendo pelo aumento de cargas consideradas críticas. Os engenheiros e pesquisadores da área têm percebido o paralelismo de UPS como uma solução interessante para alimentar tais cargas, por aumentar significativamente a confiabilidade do fornecimento.

As técnicas de paralelismo de UPS se dividem em duas categorias principais: controle com comunicação e controle sem comunicação. O controle sem comunicação vem se destacando por possibilitar o projeto modular da rede de UPS e facilidade de manutenção, uma vez que uma unidade pode ser desligada sem comprometer a rede e por não depender de centrais ou cabos de comunicação (Coelho, 2000). Entretanto, o paralelismo de UPS sem comunicação, em geral, é mais complexo, uma vez que não se conhece o número de unidades acopladas à rede e, tampouco o valor da potência solicitada pela carga.

Dentre as técnicas de paralelismo sem comunicação se destaca o método *Droop* que controla o sinal da tensão de saída de acordo com a medição local da potência demandada. Recentemente, muitos autores propuseram melhorias relevantes a esse método de controle (Guerrero et al., 2006; Santos Filho, 2009).

O método *Droop* abre espaço para proposição de novas formas de estimar as potências que saem da UPS como também suas relações com as variáveis amplitude e frequência da tensão.

Baseado neste método Furtado (2009) reescreveu o problema do paralelismo de UPS partindo da teoria de sincronismo de sistemas dinâmicos. Assim, foi possível propor

uma nova forma de análise do problema como será mostrado no Capítulo 4. Esta formulação proposta por Furtado (2009) é de grande interesse neste trabalho, por isso, neste capítulo será feita uma revisão sobre a teoria de sincronismo.

São apresentados ainda, os modelos e estruturas de UPS, dando especial atenção aos modelos descritos em Furtado (2009) e Coelho (2000). É apresentado o método *Droop* e algumas técnicas de estimação das potências ativa e reativa aplicadas ao paralelismo de inversores sem comunicação.

A estrutura deste capítulo se divide da seguinte forma: na Seção 2.2 é feita uma revisão dos conceitos e definições de sincronismo de sistemas dinâmicos. A estrutura da UPS adotada é descrita na Seção 2.3. Na Seção 2.4 será apresentado o método *Droop* e algumas técnicas de estimação das potências.

2.2 Sincronismo Aplicado ao Paralelismo de UPS

O relato científico mais antigo sobre sincronização data de 1657, quando Christian Huygens estudou o movimento de dois pêndulos oscilando na mesma base de madeira. Ele observou que, após um período de aproximadamente meia hora, os pêndulos passavam a oscilar em fase, isto é, com a mesma frequência.

A sincronização é o processo onde dois ou mais sistemas interagem entre si e começam a se comportar de modo semelhante. Essa interação é chamada de acoplamento e é necessária para que sistemas, mesmo idênticos, possam aproximar suas variáveis de estado. No exemplo acima, esse acoplamento era dado pela base de madeira.

Em sistemas dinâmicos o sincronismo é visto como concordância espaço temporal entre propriedades desses sistemas, tais como: frequência, fase, atraso, entre outras. Nesse contexto pode-se abordar o sincronismo de osciladores senoidais (Monteiro et al., 2003). Essa aplicação é de grande utilidade, pois o acoplamento de osciladores é amplamente empregado em sistemas elétricos de potência.

Embora seja extremamente comum o acoplamento ou paralelismo de geradores senoidais de tensão, são poucos os trabalhos que tratam desse assunto sob a ótica da teoria de sincronismo. Furtado (2009) usou essa teoria para alcançar o sincronismo de geradores senoidais tipo UPS.

A fim de relacionar o problema do paralelismo de UPS com a teoria de sincronismo e ainda estabelecer alguns conceitos que serão utilizados ao longo deste trabalho, será feita uma breve revisão sobre a área de sincronismo de sistemas dinâmicos na Seção a seguir.

2.2.1 Definição de Sincronismo

A teoria de sincronização de sistemas dinâmicos concatena técnicas de projeto e de análise de estruturas de acoplamento, as quais visam responder se a partir de uma dada forma de acoplamento é possível se estabelecer um comportamento harmonioso e cooperativo entre os sistemas (Tôrres, 2001).

O sincronismo de sistemas dinâmicos pode ser visto como um problema de controle em que dois sistemas são realimentados por uma função dependente do erro existente entre os estados do sistema.

Dessa forma, sejam os sistemas a seguir:

$$\begin{aligned} \Sigma_1 &= \begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(y_1, y_2), \\ y_1 = h_1(x_1), \end{cases} \\ \Sigma_2 &= \begin{cases} \dot{x}_2 = f_2(x_2) + g_2(y_2, y_1), \\ y_2 = h_2(x_2). \end{cases} \end{aligned} \quad (2.1)$$

As funções g_1 e g_2 definem a forma de acoplamento entre os sistemas. Essas funções são necessárias para que ocorra o sincronismo¹. Por meio delas os sistemas tentam se aproximar dinamicamente. Pode-se dizer que o sincronismo entre eles é possível se existe um acoplamento g_1 e g_2 tal que possa igualar y_1 e y_2 .

A ideia intuitiva de sincronismo é a igualdade da evolução temporal de dois sistemas. Contudo o conceito de sincronismo é um tanto mais geral e normalmente entendido como a aproximação de uma ou mais propriedades de dois sistemas. Ou de maneira mais formal:

Definição 1 (Brown e Rulkov, 1997) Os sistemas definidos por f_1 e f_2 na Equação 2.1 estão sincronizados, com respeito às propriedades $h_1(x_1)$ e $h_2(x_2)$, se existe um mapeamento, independente do tempo, $\Gamma : \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^p$, tal que $\|\Gamma[h(x_1, t), h(x_2, t)]\| = 0$ é válido para todas as trajetórias.

A forma como os sistemas se influenciam mutuamente define o tipo de acoplamento entre eles. Quando apenas um sistema sofre influência do outro diz-se que o acoplamento é unidirecional ou *mestre-escravo*. Nesse tipo de acoplamento tem-se $g_1 = 0$ ou $g_2 = 0$. Na configuração *mestre-escravo* o sistema pode ser entendido como um problema de controle em que o sinal de referência a ser seguido pelo sistema escravo é a saída do sistema mestre. Para o caso em que os sistemas sofrem influência mútua dos sinais de acoplamento, tem-se que $g_1 \neq 0$ e $g_2 \neq 0$ e o acoplamento é chamado bidirecional.

O objetivo nos dois casos é anular a diferença entre uma ou mais propriedades dos sistemas. Em Pikovsky et al. (2003) são descritas várias formas de acoplamento dentro dessas duas modalidades citadas.

¹Para o caso em que $f_1 = f_2$ e $h_1 = h_2$ e as condições iniciais sejam iguais, os sistemas permanecem em sincronismo independente de g_1 e g_2 existirem.

A determinação das funções de acoplamento g_1 e g_2 é de suma importância para o sincronismo dos sistemas e é fonte de muita investigação na área.

A estrutura das funções g_1 e g_2 determinam o tipo de sincronismo que se deseja alcançar. Essas estruturas podem ser estáticas ou dinâmicas, lineares ou não lineares, conforme a dinâmica inerente aos sistemas.

O tipo de sincronismo está relacionado à propriedade dos sistemas que se deseja sincronizar. A modalidade mais geral é chamada de sincronismo generalizado.

Outros tipos são (Rosenblum et al., 1997):

- *Sincronismo de fase*: ocorre quando a diferença proporcional entre as fases está limitada abaixo de um valor constante. O sincronismo de fase pode ocorrer para sistemas não idênticos e a medição de fase precisa ser definida para cada caso.
- *Sincronismo de frequência*: é o caso mais geral do sincronismo de fase, pois é possível que as frequências estejam em sincronismo sem que as fases o estejam. Contudo, o contrário não é possível.
- *Sincronismo com atraso de tempo*: pode ser considerado um tipo de sincronismo intermediário entre o sincronismo de fase e o sincronismo idêntico. As amplitudes dos estados são quase idênticas entretanto possuem um atraso no tempo uma em relação a outra.
- *Sincronismo idêntico*: também chamado de sincronização completa ocorre quando todos os estados do sistema evoluem para o mesmo valor, estabelecendo uma relação de identidade entre os sistemas.

Uma constatação interessante evidenciada por Rosenblum et al. (1997) é que o tipo de sincronismo alcançado está fortemente relacionado à força do acoplamento, ou seja, o quanto cada sistema influencia e é influenciado pelos demais. Quanto mais forte é o acoplamento, tanto mais o sincronismo se aproxima da modalidade idêntico.

2.2.2 Qualidade de sincronismo

Em muitos casos o erro entre as propriedades de interesse não se anula após os sistemas serem acoplados e decorrido o transiente de sincronização. Todavia, esse erro mantém-se confinado numa região limitada do espaço de estados, de forma a garantir o nível máximo de erro permitido.

Em Furtado (2004) é proposto uma forma de quantificar a qualidade de sincronismo de acordo com dois parâmetros dependentes do erro: o custo de sincronização e a classe de sincronismo. Nesse trabalho o autor mostra que é possível dizer que os sistemas estão de algumas forma sincronizados, embora a propriedade de interesse dos sistemas não estejam em sincronismo idêntico.

A qualidade de sincronismo neste trabalho está associada a propriedade de interesse no paralelismo de UPS, qual seja a qualidade da energia fornecida e é descrita no Capítulo 3.

2.2.3 Estabilidade de sincronismo

Uma questão importante em se tratando de controle de sistemas dinâmicos é a estabilidade do sistema. No problema de estabilidade duas questões são investigadas: A estabilidade estrutural e a estabilidade de solução (Monteiro, 2002). A primeira trata da robustez do sistema a pequenas variações dos parâmetros, não alterando muito a dinâmica do sistema. Neste tipo de análise se destaca a técnica de análise utilizando funções de Lyapunov. No segundo tipo de estabilidade é investigado se os estados do sistema convergem para uma solução se lançados próximos a essa solução.

Podemos associar a estabilidade de um determinado sistema dinâmico em torno de uma solução se a partir de uma dada condição inicial os estados desse sistema convergem para essa mesma solução.

A estabilidade da solução de um problema de sincronização pode ser resumida como sendo a possibilidade da função erro entre os estados de dois sistemas se anular, dada uma condição. Esse conceito será melhor discutido no Capítulo 4.

2.2.4 Sincronismo aplicado ao paralelismo sistemas UPS

Sincronismo é um assunto de interesse em várias áreas da engenharia (Pikovsky et al., 2003; Boccaletti et al., 2002). Uma aplicação comum de sincronismo está na área de telecomunicações (Monteiro et al., 2003). Mais recentemente foi utilizado em identificação de sistemas para estimação de parâmetros (Freitas et al., 2005) e mesmo para validação de modelos (Aguirre et al., 2006).

Como dito o problema de sincronismo de sistemas pode ser visto como um problema de controle. Para o caso de sistemas UPS não é diferente. Furtado (2009) investigou o problema do paralelismo de UPS sob a ótica da teoria de sincronismo.

Para estudar o paralelismo de UPS como um problema de sincronismo é necessário antes de tudo definir o modelo em espaço de estado de cada unidade e o acoplamento entre elas. O acoplamento entre os dois sistemas é bem definido. Aproveita-se a conexão com a própria rede para troca de informações. Esse acoplamento deve estar incluso no modelo do sistema total.

2.3 Definição da Estrutura Adotada

Uma Unidade de Alimentação Ininterrupta é um equipamento que serve como forma de aumentar a robustez de um sistema elétrico. É um sistema capaz de fornecer alimentação elétrica de alta qualidade sem interrupções.

As UPS estáticas são essencialmente compostas por: uma fonte c.c., um inversor de frequência, um filtro LC e uma impedância de acoplamento com a carga. Esta estrutura pode ser vista na Figura 2.1.

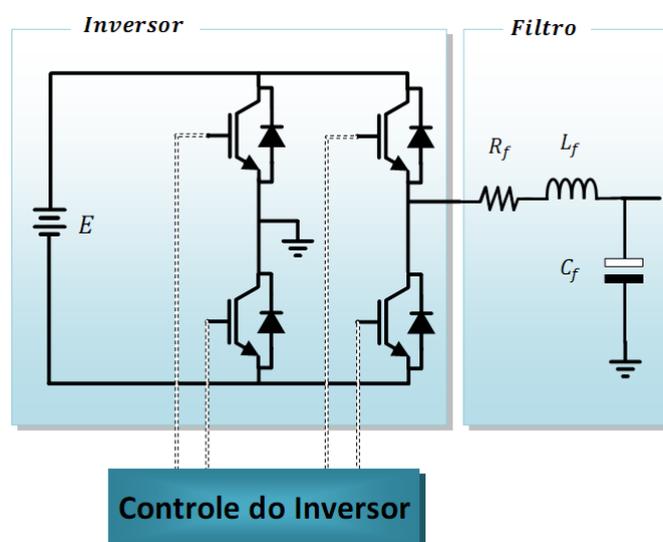


Figura 2.1: Circuito do inversor de frequência da UPS.

A fonte CC pode ser entendida como uma bateria recarregada constantemente pela rede principal no caso de uma UPS para melhoramento da qualidade e confiabilidade da energia fornecida ou alimentada por um gerador de energia local como micro usinas de energias renováveis (eólicas, hidrelétricas, solares) ou um gerador de emergência. De toda forma, a bateria está sempre presente neste tipo de equipamento.

O inversor de frequência é um conversor CC/CA, composto por chaves estáticas, geralmente do tipo IGBT acionadas por um comando PWM, a fim de fornecer uma tensão de saída senoidal. Um circuito de comando PWM de baixa potência aciona as chaves estáticas gerando uma série de pulsos de largura modulada. O sinal resultante é uma senoide com várias componentes de frequências que são filtradas pelo filtro LC, permanecendo a frequência de interesse para alimentação da carga.

As chaves estáticas operam em frequência elevada que após a filtragem permite desprezar a dinâmica do inversor e considerá-lo como uma fonte senoidal controlada em amplitude e frequência.

Essa simplificação será considerada no restante do trabalho e o conjunto fonte-

inversor-filtro, visto como uma fonte ideal de tensão controlada por tensão em que serão fornecidos os valores de amplitude u e frequência ω da tensão a ser gerada. Os valores de u e ω são determinados pelos métodos de controle que serão explicitados na seção a seguir.

O modelo simplificador da UPS é mostrado na Figura 2.2 com a fonte de tensão controlada em série com uma impedância de acoplamento.

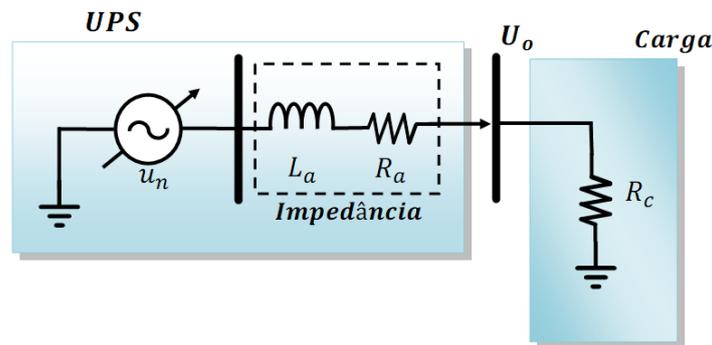


Figura 2.2: Modelo simplificado de uma UPS. Pode ser vista como uma fonte de tensão controlada por tensão (Voltage Controlled-Voltage Source, VCVS).

2.4 Paralelismo Sem Comunicação

O grande desafio do paralelismo de UPS sem comunicação está em sincronizar as unidades conectadas à carga, com a correta divisão de potência aproximando a tensão de saída ao sinal de referência.

Cada UPS desconhece a informação da quantidade de unidades acopladas e do valor da carga. Todavia, deve estabelecer uma relação tal que, a partir dos valores de tensão e corrente de saída medidos, bem como valores de referência da amplitude e frequência da tensão, possam fornecer a energia demandada pela carga.

Um dos métodos mais conhecidos para realização do paralelismo sem comunicação é o método *Droop*. Os modelos de paralelismo de UPS, bem como as técnicas de análise que serão estudadas neste trabalho, baseiam-se nesse método e, por isso, será descrito na seção a seguir.

2.4.1 Relação das potências e o método *Droop*

Considerando o circuito na Figura 2.2, o fluxo de potência ativa P e reativa Q que sai da UPS para o caso monofásico, periódico e sem harmônicos é dada por:

$$P = \frac{u_n u_o}{|Z_a|} \cos(\theta - \phi) - \frac{u_n^2}{|Z_a|} \cos(\theta), \quad (2.2)$$

$$Q = \frac{u_n u_o}{|Z_a|} \sin(\theta - \phi) - \frac{u_n^2}{|Z_a|} \sin(\theta), \quad (2.3)$$

em que ϕ é o ângulo da carga e Z_a é a impedância de acoplamento de característica resistiva e indutiva, módulo $|Z_a| = \sqrt{R_a^2 + (2\pi f L_a)^2}$ e fase $\theta = \arctan\left(\frac{R_a}{2\pi f L_a}\right)$, sendo f a frequência de operação.

Se considerarmos que a UPS alimenta carga resistiva, tendo $\phi \approx 0$ e a impedância da linha é indutiva, então $\theta = 0$, e $\sin \theta \approx \theta$ e $\cos \theta \approx 1$. Assim a equação acima torna-se:

$$P = \frac{u_n u_o}{X} \sin \phi \approx \frac{u_n u_o}{X} \phi, \quad (2.4)$$

$$Q = \frac{u_n u_o \cos \phi - u_o^2}{X} \approx \frac{u_o}{X} (u_n - u_o). \quad (2.5)$$

Considerando as Equações 2.4 e 2.5, Tuladhar et al. (1997) propôs uma lei de controle local de forma a estabelecer o paralelismo de UPS relacionando o fluxo de potência entre a UPS e a carga, e as variáveis de interesse. Essa lei é dada por:

$$\omega(t) = \omega_{or} - k_\omega P(t), \quad (2.6)$$

$$u(t) = u_{or} - k_u Q(t), \quad (2.7)$$

em que ω_{or} e u_{or} representam a frequência e amplitude da tensão de referência da UPS. Vale lembrar que as relações das Equações 2.4 e 2.5 são válidas quando a linha tem característica predominantemente indutiva. Para garantir tal característica, normalmente é adicionado um indutor de acoplamento em cada unidade uma vez que, em muitos casos, as conexões são curtas e assim de característica resistivas.

A frequência de operação é controlada pela potência ativa. Assim quanto maior for a potência demandada menor será a frequência da tensão de saída. Da mesma forma a amplitude da tensão de saída do oscilador é controlada de acordo com a variação da potência reativa. As constantes que relacionam essas grandezas, k_ω e k_u serão descritas mais a frente. A Figura 2.3 mostra o esquema de ligação da UPS controlada pelo método *Droop*.

Esse método é explicitamente dependente da correta estimativa das potências ativa e reativa a partir dos valores de tensão e corrente. Isso contudo não é uma tarefa simples e faz com que o método apresente uma baixa eficiência em transitórios, como por exemplo, no chaveamento de cargas conectadas ao barramento.

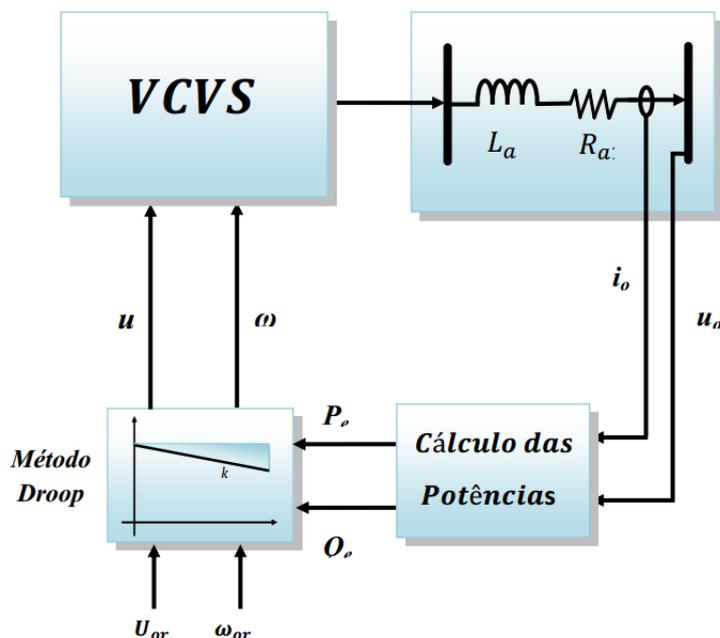


Figura 2.3: Desenho esquemático do método *Droop*.

As pesquisas de paralelismo de UPS sem comunicação tem se voltado principalmente em encontrar métodos de determinação das constantes do método *Droop*, da medição das potências, e novas aproximações das relações entre elas às variáveis de tensão e frequência.

2.4.2 Métodos de determinação das constantes de decaimento

Normalmente as constantes k_ω e k_u são definidas de acordo com as potências máximas que cada fonte pode fornecer. De fato, para uma divisão proporcional da energia as UPS com maior capacidade devem responder mais rapidamente a um aumento de demanda pela carga. A Figura 2.4 mostra a relação direta entre as variáveis de entrada e saída determinadas pelas constantes.

Nos trabalhos de Coelho (2000) e Andrade (2005) é sugerido que as constantes sejam determinadas pelas relações:

$$k_\omega = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{P_{max}}, \quad (2.8)$$

$$k_u = \frac{u_{max} - u_{min}}{Q_{max}}. \quad (2.9)$$

Em Chandorkar e Divan (1996) o autor mostra que para uma divisão proporcional

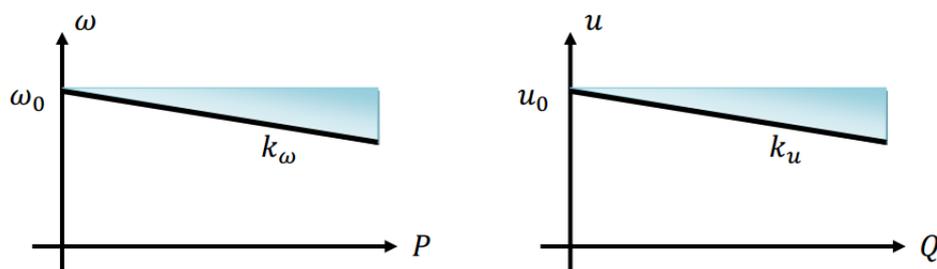


Figura 2.4: Leis de controle do método *Droop* tradicional.

da potência para um sistema de n UPS, as constantes devem obedecer às seguintes relações:

$$k_{\omega 1}P_1 = k_{\omega 2}P_2 = \dots = k_{\omega n}P_n; \quad (2.10)$$

$$k_{u1}Q_1 = k_{u2}Q_2 = \dots = k_{un}Q_n. \quad (2.11)$$

Em Guerrero et al. (2009), sugere-se que o valor da potência máxima seja ajustado para a carga máxima da bateria da UPS. Alguns trabalhos definiram faixas de valores para k_{ω} e k_u por meio de técnicas de análise de estabilidade para sistemas idênticos, determinando para quais valores das constantes os sistema atingem sincronismo (Coelho, 2000; Furtado, 2009; Santos Filho, 2009).

No Capítulo 4 os limites de k_u e k_{ω} são definidos a partir da análise de estabilidade de sistemas não idênticos.

2.4.3 Revisão dos métodos de estimação das potências

Como foi visto anteriormente, a estimação das potências utilizando informações locais é de vital importância no paralelismo de inversores monofásicos sem comunicação. O método *Droop* é fortemente dependente dos valores instantâneos das potências ativa e reativa. Contudo, a medição precisa e rápida dessas grandezas não é uma tarefa trivial. Até mesmo a conceituação dessas potências diverge entre alguns autores para o caso monofásico.

São apresentados alguns conceitos básicos sobre esse tema e as técnicas principais empregadas para a medição de potência na implementação do paralelismo sem comunicação.

A potência instantânea P_{inst} é dada por:

$$P_{inst}(t) = v(t)i(t), \quad (2.12)$$

$$P_{inst}(t) = \sum_{h=0}^{\infty} \frac{v_h \dot{i}_h}{2} \cos \phi_h [1 - \cos(2h\omega t)] + \sum_{h=1}^{\infty} \frac{v_h \dot{i}_h}{2} \sin \phi_h \sin(2h\omega t) + \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}}^{\infty} v_m \dot{i}_n \sin(m\omega t + \alpha_m) \sin(n\omega t + \beta_n), \quad (2.13)$$

em que $\phi_h = \alpha_h + \beta_h$ e $h, m, n \in \mathbb{N}$.

Para o caso em que a carga é linear e considerando apenas a onda fundamental da tensão e corrente, tem-se:

$$\begin{aligned} P_{inst}(t) &= \frac{v_1 \dot{i}_1}{2} \cos \phi [1 - \cos(2\omega t - \phi)], \\ &= \frac{v_1 \dot{i}_1}{2} \cos \phi [1 - \cos(2\omega t)] - \frac{v_1 \dot{i}_1}{2} \sin \phi \sin(2\omega t). \end{aligned} \quad (2.14)$$

Nesse contexto, a potência ativa é dada por:

$$P = \frac{v_1 \dot{i}_1}{2} \cos \phi, \quad (2.15)$$

e a potência reativa dada por:

$$Q = \frac{v_1 \dot{i}_1}{2} \sin \phi. \quad (2.16)$$

É importante ressaltar que essas definições de potência ativa e reativa pressupõe sinais periódicos em regime permanente e sem componentes c.c. ou harmônicas. Baseado nessas considerações serão apresentados alguns métodos de estimação dessas duas potências, cujo valor é essencial para utilização do método *Droop*.

Filtragem direta e defasagem de 90°

Uma forma simples e eficiente de calcular uma aproximação da potência ativa é pela filtragem direta da potência instantânea por meio de um filtro passa-baixa de frequência de corte f_c . Este método é talvez um dos mais utilizados para encontrar um valor estimado da potência ativa.

Analogamente, pode-se encontrar a potência reativa recalculando-se a potência

instantânea com a tensão defasada de 90° . Esse defasamento pode ser implementado de forma digital ou por meio de um integrador. Após o defasamento é realizada a filtragem e o sinal de saída desse filtro é uma aproximação da potência reativa.

A Figura 2.5 mostra o esquema do cálculo estimado das potências ativa e reativa pelo método de defasamento e filtragem direta.

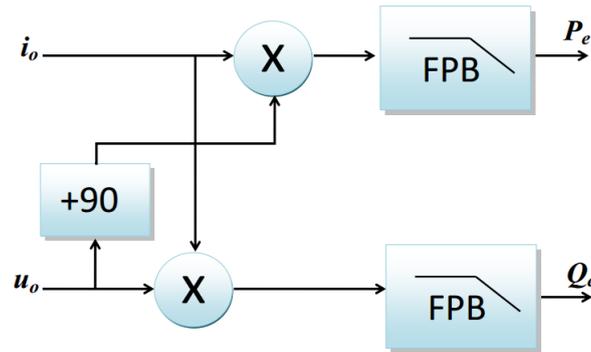


Figura 2.5: Método de defasamento da tensão de saída. Diagramas de blocos da estratégia para a estimação de potências baseada na filtragem direta do sinal de potência instantânea e do sinal de potência instantânea obtido com a tensão defasada de 90° .

Decomposição das correntes

Tuladhar et al. (1997) desenvolveu um método para estimação das potências a partir da decomposição das componentes da corrente de saída i_o em três partes:

$$i_l = i_p(t) + i_q(t) + i_d(t), \quad (2.17)$$

em que i_p é a componente em fase com a tensão, i_q é a componente em quadratura com a tensão e i_d a componente de distorção.

Essa decomposição é feita multiplicando-se o sinal de corrente por uma cossenoide em fase e em quadratura com o sinal de tensão de frequência ω a fim de se obter i_p e i_q respectivamente. Após isso são filtradas e passam por um controlador tipo proporcional integral (PI). A frequência ω é determinada por uma PLL². A componente de distorção é a diferença das duas primeiras com a corrente de saída i_o .

A partir dos sinais de corrente encontrados podem-se calcular as potências ativa estimada P_e e a potência reativa estimada Q_e da seguinte forma:

$$P_e = i_p(t)u_o(t), \quad (2.18)$$

e

$$Q_e = i_q(t)u_o(t), \quad (2.19)$$

²Do inglês *phase-locked loops* (malha de sincronismo de fase).

em que P_e e Q_e são respectivamente a potência ativa e reativa determinadas pelo método de decomposição das correntes de Tuladhar.

O esquema desse método é mostrado na Figura 2.6.

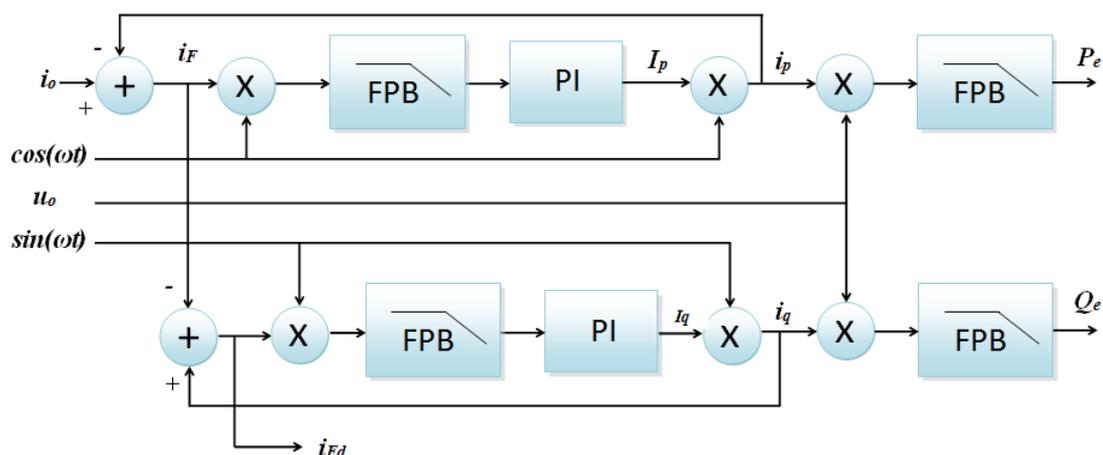


Figura 2.6: Método de decomposição da corrente de saída. Diagrama de blocos da estratégia para estimação de potências baseada decomposição das correntes e filtragem, proposta por Tuladhar et al. (1997).

Uma vantagem deste método é a consideração da componente harmônica, embora simplificado. Desta forma é melhorada a robustez para o caso em que as UPS em paralelo alimentam cargas não lineares. Uma desvantagem desse método é a necessidade de uma PLL para estimação de ω e da necessidade de ao menos 4 filtros passa baixa para estimação das potências, tornando lenta a resposta do controlador.

Filtragem direta e função não linear

A fim de simplificar o cálculo das potências foi proposto por (Furtado, 2009) um método de estimação da potência reativa por meio de uma função estática não linear.

A potência ativa é determinada por meio de filtragem direta do sinal da potência instantânea utilizando um filtro passa-baixa de frequência de corte f_c e a potência reativa, considerando a Equação 2.14, a partir da seguinte relação:

$$Q(t) = \frac{P(t) [1 - \cos(2\omega t)] - P_{inst}(t)}{\sin(2\omega t)}, \quad (2.20)$$

Esta definição contém alguns pontos de singularidade. Para contornar esse problema (Furtado, 2009) propõe uma aproximação da função cossecante e assim

consegue aproximar tanto quanto queira da função original a partir de uma constante k . Ou seja o comportamento da função $\cos(2\omega t)$ é suavizado em torno de tais pontos de acordo com a função:

$$h_s = \frac{k^2 \sin(2\omega t)}{1 + (k \sin(2\omega t))^2} \approx \frac{1}{\sin(2\omega t)}. \quad (2.21)$$

Com essa aproximação e considerando $P_e \approx P$ é possível reescrever a Equação 2.20 da seguinte forma:

$$Q_e(t) \triangleq (P_e [1 - \cos(2\omega t)] - P_{inst}(t)) \left(\frac{k^2 \sin(2\omega t)}{1 + (k \sin(2\omega t))^2} \right) \quad (2.22)$$

O esquema desse método é mostrado na Figura 2.7.

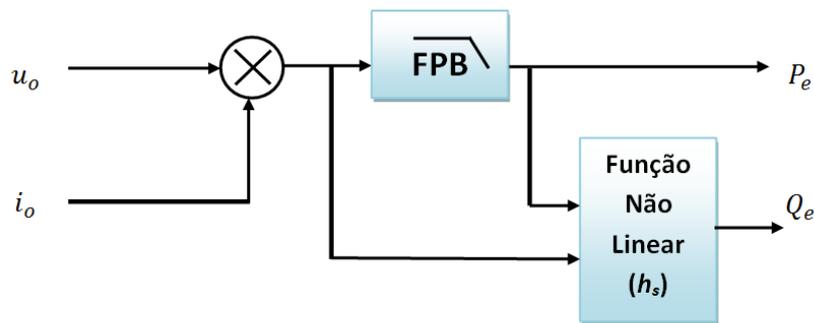


Figura 2.7: Método da filtragem direta e função não linear. Diagrama de blocos da estratégia para estimativa de potências baseada na filtragem direta e função não linear, proposta por Furtado (2009).

A vantagem dessa formulação consiste na dispensa da necessidade de se implementar processos de filtragem para se obter a potência reativa. Desta forma é obtida a redução na ordem dinâmica do modelo da UPS e, por conseguinte, menor complexidade na estrutura do controle do paralelismo. Por outro lado, a implementação em controladores digitais demandará um esforço maior no que tange a utilização de funções trigonométricas.

Uma desvantagem dessa abordagem é que não é considerada a medição da potência de distorção originada dos harmônicos o que limita o uso da técnica ao caso de UPS alimentando cargas lineares.

2.4.4 Modelo completo da UPS acoplada

Considerando o modelo de cada unidade UPS descrito na Seção 2.3 e as técnicas apresentadas na Subseção 2.4.3 é possível descrever um modelo completo em espaço

de estados do sistema de n UPS acopladas a um barramento alimentando uma carga linear como mostrado na Figura 2.8.

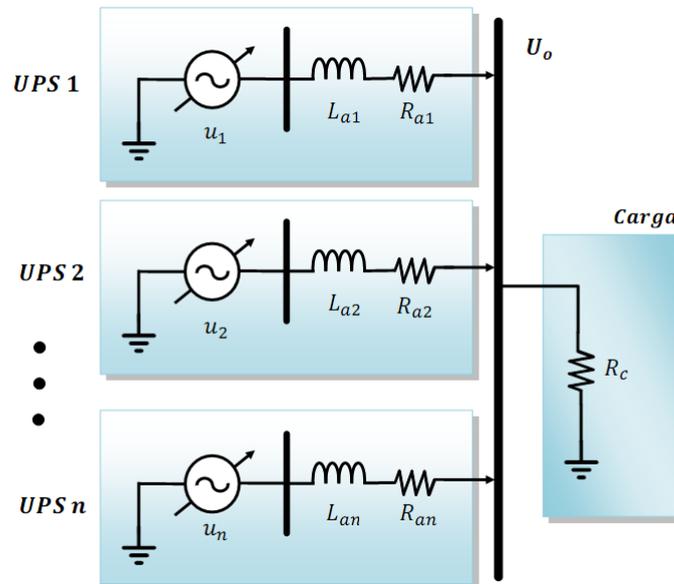


Figura 2.8: Sistemas de n UPS conectadas a um barramento alimentando uma carga linear resistiva.

Serão adotados neste trabalho dois modelos que diferem entre si no cálculo das potências. O método de estimação das potências será considerado em cada modelo.

A tensão de saída medida no barramento u_o é dada pelo somatório das correntes de saída das UPS sobre a carga R_c e pode ser definida por:

$$u_o = R_c \sum_{k=1}^n i_k, \quad (2.23)$$

em que i_k é a corrente no indutor L_{ak} e é igual a corrente de saída da k -ésima UPS.

Modelo I do Sistema Adotado

O Modelo I adotado foi descrito por Coelho (2000) utilizando o método de estimação proposto por Tuladhar et al. (1997).

As potências são calculadas por uma série de filtros PB e controladores PI. O modelo

final desse método é:

$$\Sigma_n = \begin{cases} \dot{x}_{n1} = -\beta x_{n1} + \alpha u_n - \alpha u_o, \\ \dot{x}_{n2} = -\omega_f x_{n2} + \omega_f \cos(\omega_n t) u_o, \\ \dot{x}_{n3} = -\omega_f x_{n3} + \omega_f \text{sen}(\omega_n t) u_o, \\ \dot{x}_{n4} = -\omega_f x_{n4} + \omega_f \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) [x_{n1} - x_{n5} \text{sen}(\omega_n t + \theta_n)], \\ \dot{x}_{n5} = k_p x_{n4} - k_i \omega_f [x_{n4} - x_{n1} \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) + x_{n5} \text{sen}^2(\omega_n t + \theta_n)], \\ \dot{x}_{n6} = -\omega_f x_{n6} + \omega_f \cos(\omega_n t + \theta_n) [-x_{n1} + x_{n5} \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) - x_{n7} \cos(\omega_n t + \theta_n)], \\ \dot{x}_{n7} = x_{n6} (k_p - k_i \omega_f) - k_i \omega_f \cos(\omega_n t + \theta_n) [x_{n1} - x_{n5} \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) + x_{n7} \cos(\omega_n t + \theta_n)], \\ \dot{x}_{n8} = -\omega_f x_{n8} + \omega_f x_{n5} \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) (u_o), \\ \dot{x}_{n9} = -\omega_f x_{n9} + \omega_f x_{n7} \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) (u_o), \end{cases} \quad (2.24)$$

$$u_n = u_m \text{sen}(\omega t),$$

em que $u_m = u_{or} - k_u x_{n9}$, $\omega = \omega_{or} - k_\omega x_{n8}$ e $\theta = \arctan\left(\frac{x_{n2}}{x_{n3}}\right)$. O índice n nos estados e agora nos parâmetros indica que são pertencentes ao n -enésimo agente. A variável u_n é a tensão de saída do inversor de frequência da UPS n e u_o a tensão do barramento, comum a todas as UPS. Por fim, $\alpha = 1/L_a$ e $\beta = R_a/L_a$ são os parâmetros que caracterizam o acoplamento de cada UPS.

Modelo II do Sistema Adotado

O Modelo II do sistema adotado foi desenvolvido por Furtado (2009).

O modelo apresenta uma boa aproximação da dinâmica real e apenas 4 estados e é definido por:

$$\Sigma_n = \begin{cases} \dot{x}_{n1} = -\beta x_{n1} - \alpha u_o + \alpha u_n, \\ \dot{x}_{n2} = -\omega_f x_{n2} + \omega_f u_o x_{n1}, \\ \dot{x}_{n3} = \omega_{0r} x_{n4} - k_\omega x_{n2} x_{n4}, \\ \dot{x}_{n4} = -\omega_{0r} x_{n3} - k_\omega x_{n2} x_{n3}, \end{cases} \quad (2.25)$$

$$u_n = u_{0r} x_{n3} - \frac{k_u}{2} [u_o x_{n1} - 2x_{n2} x_{n3}^2] \left(\frac{k^2 x_{n4}}{1 + (k x_{n4})^2} \right),$$

em que u_n representa a tensão de saída do inversor da UPS n .

2.5 Conclusão

O paralelismo de UPS tem se tornado um grande foco na área de pesquisa em eletrônica de potência e controle, pois garantem uma energia de melhor qualidade e contribuem para o desenvolvimento de geração distribuída, parte importante da pesquisa com *Smart Grids*.

Neste capítulo foi apresentado o problema do paralelismo de UPS sem comunicação,

como um problema de sincronismo de sistemas dinâmicos. Foram introduzidos alguns conceitos sobre sincronismo, alguns dos quais serão utilizados ao longo do texto.

Fez-se uma breve revisão sobre o funcionamento de sistemas UPS, sua estrutura básica e o esquema geral do paralelismo sem comunicação baseado no fluxo de potência.

O principal método sobre o paralelismo de UPS sem uso de comunicação encontrado na literatura é o método de *Droop*. Contudo, o mesmo mostra vários inconvenientes que limitam sua área de aplicação, tais como lenta resposta transitória, dificuldade em garantir correto compartilhamento de carga e os desvios de frequência e tensão em regime permanente e alta dependência da característica indutiva da impedância de acoplamento.

Fez-se uma revisão de algumas técnicas de estimação das potências ativa e reativa apresentando pontos positivos e negativos de cada uma. Ao fim foram definidos dois modelos de UPS acopladas que serão utilizados neste trabalho.

Simulação Monte Carlo do Acoplamento entre UPS

“Considerai que é suma alegria, meus irmãos, quando passais por diversas provações, sabendo que a prova da vossa fé produz a paciência. Mas é preciso que a paciência efetue a sua obra, a fim de serdes perfeitos e íntegros, sem fraqueza alguma.”

Tiago 1:2-4

3.1 Motivação

A busca por sincronização em sistemas idênticos é mais frequente e encontra-se um maior número de resultados teóricos na literatura. Contudo, muitos trabalhos têm revelado que também é possível a “sincronização” de sistemas não idênticos, definidos por leis de evolução que apenas diferem por pequenos desajustes paramétricos ou que são mesmo distintas, podendo até diferir em dimensão (Boccaletti et al., 2002; Aguirre et al., 2006).

Sistemas podem ser considerados não idênticos entre si quando as expressões matemáticas que os definem diferem por pequenas diferenças paramétricas, ou até mesmo quando representam diferentes leis de evolução. Nesses casos, a sincronização traduz-se numa relação funcional entre os sinais gerados que não é necessariamente a identidade de estados. Para o caso de parâmetros não idênticos, o erro entre os estados dos sistemas não necessariamente converge a zero, mas pode exibir valores não nulos (Pecora e Carroll, 1990).

É importante destacar que a análise de sistemas com diferenças paramétricas não se assemelha simplesmente a uma análise da estabilidade local do sistema, uma vez que existe a possibilidade de mudanças qualitativas/topológicas no comportamento dinâmico dos elementos de uma família de sistemas dinâmicos, indicadas pelos possíveis pontos de bifurcação, mesmo que diferindo por pequenos desajustes paramétricos. Ou seja, um desvio infinitesimal em qualquer um dos parâmetros pode conduzir a dinâmicas qualitativamente distintas. Em alguns desses casos ter-se-ia um

alto custo ou mesmo impossibilidade de atingir o sincronismo.

A maioria das abordagens sobre paralelismo de UPS assume que todas as unidades são idênticas (Furtado, 2009). Essa aproximação facilita as análises e são, na maioria dos casos, satisfatórias, tendo em vista a comprovação experimental de algumas dessas simulações (Tuladhar et al., 1997; Coelho, 2000; Santos Filho, 2009).

Contudo, é sabido que UPS reais, mesmo fabricadas em série, e com padrões de fabricação rigorosos, inevitavelmente apresentam diferenças paramétricas cuja influência deve ser investigada. Alguns fabricantes garantem uma discrepância máxima dos valores nominais dos parâmetros de até $\pm 20\%$, o que pode gerar uma diferença de até 40% entre os componentes construtivos das unidades UPS.

No contexto de paralelismo de UPS é de grande importância saber a influência da incerteza paramétrica na qualidade do sincronismo, uma vez que um dos principais objetivos ao se utilizar sistemas UPS em paralelo é aumentar a qualidade da energia fornecida. Nesse caso o sincronismo entre os sistemas não mais será definido como sendo a identidade dos estados dos sistemas, mas antes uma aproximação da amplitude e frequência desejadas para o sinal de tensão no barramento.

Neste capítulo pretende-se avaliar, por meio de simulação Monte Carlo, a influência de discrepância nos parâmetros de acoplamento na qualidade de energia fornecida por um sistema composto por 3 UPS acopladas a uma carga resistiva. Os parâmetros de acoplamento serão considerados incertos. A incerteza será descrita como um processo gaussiano com média e variância conhecidas. Para essa análise serão utilizados os métodos de controle de UPS apresentados no Capítulo 2, possibilitando uma comparação entre os mesmos quanto à robustez à incerteza paramétrica.

Outra questão abordada neste capítulo é a presença de ruído nos dados medidos. Praticamente todos os métodos de paralelismo de UPS sem comunicação utilizam medições locais para o controle. Contudo, a análise da influência de ruído nem sempre é discutida.

Na Seção 3.2 serão descritos os métodos de paralelismos de UPS considerando a incerteza paramétrica para o sistema adotado. As condições de simulação às quais serão submetidos ambos os modelos são apresentadas na Seção 3.3. Na Seção 3.4 são definidas métricas a fim de se indicar a qualidade de sincronismo alcançado nos vários cenários, por meio das simulações. Ao final, é feita uma análise apresentando os efeitos da incerteza paramétrica e da presença de ruído nas medições, bem como, indicando a robustez de cada uma das técnicas.

3.2 O Sistema Adotado

Será analisada a robustez de dois métodos de paralelismo de UPS para diferenças paramétricas entre as unidades. Esses métodos diferem entre si quanto ao cálculo das potências ativa e reativa. Os modelos que serão avaliados foram definidos no Capítulo

2, qual sejam, o método por curvas de decaimento adaptado desenvolvido por Furtado (2009), e um segundo desenvolvido no trabalho de Coelho (2000), descritos a seguir.

3.2.1 Definição do sistema

Foi considerado um sistema de 3 UPS conectadas a uma carga linear resistiva por meio de um barramento de tensão. Em cada agente é considerada uma impedância de acoplamento $Z_a = R_a + j\omega L_a$. A Figura 3.1 ilustra o sistema adotado para as simulações neste capítulo.

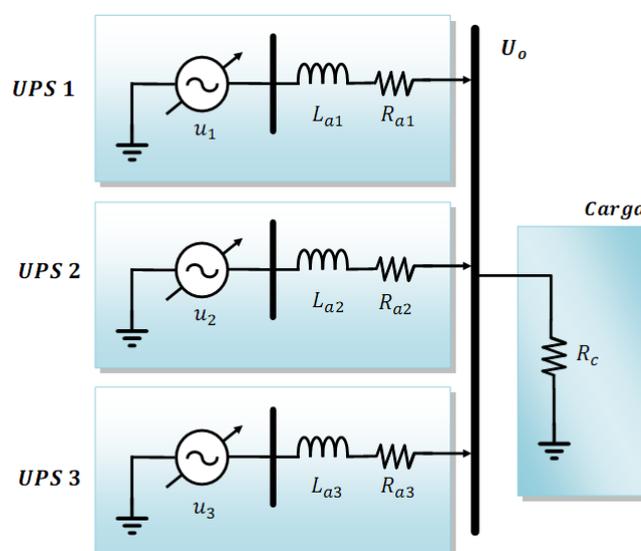


Figura 3.1: Sistemas de 3 UPS conectadas a um barramento alimentando uma carga linear resistiva.

Como foi dito no Capítulo 2, a dinâmica do inversor de frequência pode ser desprezada e o mesmo será considerado como uma fonte de tensão senoidal controlada por tensão.

No sistema todos os parâmetros internos dos controladores do inversor foram definidos no Capítulo 2, e nas simulações do presente capítulo são iguais e invariantes para todos os agentes. Apenas serão alterados os parâmetros de acoplamento das UPS (L_a e R_a) e o ângulo da tensão θ_t no instante $t_0 = 0$. Os valores dos parâmetros comuns aos dois métodos serão iguais, com exceção das constantes das curvas de decaimento.

3.2.2 Modelo I

O Modelo I adotado foi proposto por Coelho (2000) e mostrado no Capítulo 2. As potências são calculadas por uma série de filtros *passa-baixa* (PB) e controladores

proporcional-integral (PI). O modelo final desse método é:

$$\Sigma_n^I = \begin{cases} \dot{x}_{n1} = -\beta_n x_{n1} + \alpha_n u_n - \alpha_n u_o, \\ \dot{x}_{n2} = -\omega_f x_{n2} + \omega_f \cos(\omega_n t) u_o, \\ \dot{x}_{n3} = -\omega_f x_{n3} + \omega_f \text{sen}(\omega_n t) u_o, \\ \dot{x}_{n4} = -\omega_f x_{n4} + \omega_f \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) [x_{n1} - x_{n5} \text{sen}(\omega_n t + \theta_n)], \\ \dot{x}_{n5} = k_p x_{n4} - k_i \omega_f [x_{n4} - x_{n1} \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) + x_{n5} \text{sen}^2(\omega_n t + \theta_n)], \\ \dot{x}_{n6} = -\omega_f x_{n6} + \omega_f \cos(\omega_n t + \theta_n) [-x_{n1} + x_{n5} \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) - x_{n7} \cos(\omega_n t + \theta_n)], \\ \dot{x}_{n7} = x_{n6} (k_p - k_i \omega_f) - k_i \omega_f \cos(\omega_n t + \theta_n) [x_{n1} - x_{n5} \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) + x_{n7} \cos(\omega_n t + \theta_n)], \\ \dot{x}_{n8} = -\omega_f x_{n8} + \omega_f x_{n5} \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) (u_o), \\ \dot{x}_{n9} = -\omega_f x_{n9} + \omega_f x_{n7} \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) (u_o), \end{cases} \quad (3.1)$$

$$u_n = u_m \text{sen}(\omega t),$$

em que $u_m = u_{or} - k_u x_{n9}$, $\omega = \omega_{or} - k_\omega x_{n8}$ e $\theta = \arctan\left(\frac{x_{n2}}{x_{n3}}\right)$. O índice n nos estados e em alguns dos parâmetros indica que são pertencentes ao n -ésimo agente. A variável u_n é a tensão de saída do inversor de frequência da UPS n e u_o a tensão do barramento, comum a todas as UPS. Por fim, $\alpha_n = 1/L_{an}$ e $\beta_n = R_{an}/L_{an}$ são os parâmetros que caracterizam o acoplamento de cada UPS ao barramento.

3.2.3 Modelo II

O Modelo II do sistema adotado foi desenvolvido por Furtado (2009) e é definido por:

$$\Sigma_n^{II} = \begin{cases} \dot{x}_{n1} = -\beta_n x_{n1} - \alpha_n u_o + \alpha_n u_n, \\ \dot{x}_{n2} = -\omega_f x_{n2} + \omega_f u_o x_{n1}, \\ \dot{x}_{n3} = \omega_{0r} x_{n4} - k_\omega x_{n2} x_{n4}, \\ \dot{x}_{n4} = -\omega_{0r} x_{n3} - k_\omega x_{n2} x_{n3}, \end{cases} \quad (3.2)$$

$$u_n = u_{0r} x_{n3} - \frac{k_u}{2} [u_o x_{n1} - 2x_{n2} x_{n3}^2] \left(\frac{k^2 x_{n4}}{1 + (k x_{n4})^2} \right),$$

em que u_n representa a tensão de saída do inversor da UPS n . O modelo apresenta uma boa aproximação da dinâmica real e apenas 4 estados. A variável u_o , é a tensão medida no barramento e é dada pelo somatório das correntes de saída das UPS sobre a carga R_c , ou seja,

$$u_o = R_c \sum_{i=1}^n x_{i1}, \quad (3.3)$$

em que x_{i1} é o estado em ambos os modelos referente à corrente no indutor de acoplamento e é igual a corrente de saída de cada UPS.

Os demais parâmetros dos modelos são descritos a seguir.

3.2.4 Definição dos parâmetros

Os parâmetros utilizados nos modelos são dados na Tabela 3.1.

Os parâmetros k_ω e k_u serão os mesmos em todas as unidades do sistema. Porém seus valores serão definidos para cada método conforme será descrito na Seção 3.4.5.

3.3 Definição das Condições para Simulações Numéricas

Nesta seção serão definidas as condições às quais serão submetidos os modelos para posterior comparação dos resultados. Procurou-se ter um certo rigor para que a comparação pudesse ser coerente.

Será feita uma análise quanto à robustez de cada método à variação dos parâmetros de acoplamento do sistema de 3 UPS. Os sistemas serão submetidos aos mesmos testes e avaliados segundo critérios especificados a seguir. Pretende-se com tais testes indicar qual dos métodos demonstra ser:

- o mais robusto à incerteza paramétrica da rede de acoplamento (R_a, L_a);
- o mais simples de ser implementado do ponto de vista do número de variáveis medidas;
- o que resulta em energia de melhor qualidade para a carga, considerando:
 - menor desvio da frequência nominal;
 - menor desvio da amplitude de tensão nominal;
 - menor THD¹ (Taxa de Distorção Harmônica);
- o que gasta menos energia para atingir o sincronismo.

3.3.1 Método de integração

As simulações foram feitas utilizando o software *Matlab*[®]. Foi realizada a integração das equações diferenciais usando o método *Runge-Kutta* de 4ª ordem com passo fixo de integração definido por:

$$T_i = \frac{1}{60} \frac{1}{1000},$$

e período de amostragem:

$$T_s = \frac{1}{60} \frac{1}{100}.$$

¹Em inglês *Total Harmonic Distortion*.

Tabela 3.1: Valores dos parâmetros utilizados nas simulações para realização de testes numéricos.

Parâmetros	Símbolo	Valores
Indutor de acoplamento	L_a	1 mH
Resistor de acoplamento	R_a	50 m Ω
Carga resistiva	R_c	4 Ω
Frequência de corte do filtro PB	ω_f	$2 \times 6\pi$ rad/s
Constante de suavização	k	5×10^{-5}
Ganho proporcional do controlador	k_p	500
Ganho integral do controlador	k_i	5
Referência da frequência	ω_{or}	$2 \times 60\pi$ rad/s
Referência da tensão	u_{or}	180 V

3.3.2 Condições iniciais

Por hipótese a condição inicial da corrente em cada indutor $x_{n1}(0)$, bem como, os estados dos filtros utilizados em cada método serão nulos. Também foi considerada nula a estimativa inicial das potências ativa (correspondente aos estados x_{n8} para o Método I e x_{n2} para o Método II) e reativa (calculada explicitamente apenas no Método I, corresponde ao estado x_{n9}).

Considerou-se também que as UPS serão conectadas ao barramento quando o ângulo da tensão de cada UPS for $\theta_n \approx 0^\circ$ o que define os estados $x_{n2} = \text{sen}(\theta_n)$ e $x_{n3} = \text{cos}(\theta_n)$ para o Método I e $x_{n3} = \text{cos}(\theta_n)$ e $x_{n4} = \text{sen}(\theta_n)$ para o Método II.

Como numa situação real o ângulo inicial da tensão é sempre incerto, os métodos serão testados com valores iniciais de θ_n próximos de zero, como será descrito na Subseção 3.3.4.

3.3.3 Período transiente

Para separar o período transiente, isto é, o tempo gasto para se atingir o sincronismo, do regime permanente é preciso antes estabelecer um critério que defina sob quais condições os sistemas estarão sincronizados. O sincronismo idêntico² não é o principal interesse no contexto de fornecimento de energia a uma carga elétrica, mas antes a qualidade da energia fornecida. Além disso, como os dois modelos são diferentes, uma comparação utilizando, por exemplo, a norma da diferença dos estados poderia nos fornecer uma interpretação equivocada do melhor modelo em relação a esse critério.

Como o principal interesse é a estabilização da tensão sobre a carga, é importante definir em que instante a amplitude u e a frequência ω do sinal de tensão atingem o

²Ver definição no Capítulo 2.

regime permanente após a conexão das UPS ao barramento, ou seja, quando a variação desses valores se tornar “pequena”.

Portanto, adotou-se o seguinte critério para separar período transiente de regime permanente. Foi monitorada a variação da frequência e da amplitude da tensão no barramento u , em cada ciclo, como definido nas Seções 3.4.1 e 3.4.2. As variações foram definidas da seguinte forma:

$$\Delta u(k) = \frac{\|u(k) - u(k-1)\|}{u(k-1)}, \quad (3.4)$$

e

$$\Delta \omega(k) = \frac{\|\omega(k) - \omega(k-1)\|}{\omega(k-1)}, \quad (3.5)$$

em que $u(k)$ e $\omega(k)$ são a k -ésima medição da amplitude e frequência da tensão respectivamente em um dado instante T_k .

Desta forma, o transiente foi identificado no instante $T_t = T_k$ em que:

$$\Delta u(k) \leq 10^{-2}, \forall t > T_t,$$

e

$$\Delta \omega(k) \leq 10^{-2}, \forall t > T_t.$$

Nos casos em que o valor do transiente não ocorreu até o valor arbitrário $t = \frac{1}{60}200s$ considerou-se que não houve sincronismo.

3.3.4 Variação de parâmetros

A fim de se testar a robustez dos métodos à incerteza paramétrica do acoplamento, foram realizadas 1000 simulações para cada método, e em cada uma delas foram utilizados valores da impedância de acoplamento obtidos aleatoriamente segundo uma distribuição gaussiana. Os demais parâmetros internos das UPS mantiveram-se inalterados. Os valores dos parâmetros de acoplamento da UPS n foram determinados da seguinte forma:

$$\begin{aligned} R_{an_i} &= R_a + R_i, \\ L_{an_i} &= L_a + L_i, \end{aligned}$$

em que $i = 1, 2, \dots, 1000$; R_{an_i} e L_{an_i} são, respectivamente, o valor da resistência e da indutância de acoplamento na i -ésima simulação Monte Carlo; R_i e L_i são variáveis aleatórias com distribuição gaussiana, média nula e desvio padrão igual a 5% dos valores nominais R_a e L_a definidos na Tabela 3.1.

Da mesma forma a condição inicial do ângulo θ_n foi obtida segundo uma distribuição de probabilidade gaussiana, tal que para cada simulação i :

$$\theta_{n_i} = 0^\circ + \theta_i,$$

em que θ_i é uma variável aleatória, gaussiana, de média zero e desvio padrão de 5° .

3.3.5 Ruído nos sinais medidos

Foi realizado um outro teste a fim de avaliar a robustez dos dois modelos adotados: a adição de ruído nos sinais de medição. Como dito anteriormente, todo o controle é feito utilizando as informações locais do sistema, isto é, a medida da corrente de saída de cada UPS e da tensão do barramento (da carga). Em situações experimentais é comum o aparecimento de ruído durante a aquisição dos sinais. Foi feito um teste fixando os parâmetros do sistema nos valores da Tabela 3.1 (inclusive os parâmetros de acoplamento) e adicionando aos sinais de corrente e tensão um ruído gaussiano de média nula e desvio padrão igual a 10% da amplitude esperada para cada sinal.

Neste caso, o primeiro estado das Equações 3.1 e 3.2 foi substituído por

$$\tilde{x}_{n1} = x_{n1} + v_i, \quad (3.6)$$

nas equações diferenciais em que a corrente medida no indutor é necessária, e a variável u_o foi substituída por:

$$\tilde{u}_o = R_c \sum_{i=1}^n x_{i1} + v_v, \quad (3.7)$$

nas equações diferenciais em que a tensão medida no barramento é necessária, em que v_i e v_v são sinais ruído de corrente e tensão, respectivamente, com média nula e desvio padrão dadas por:

$$\sigma_{v_i} = \frac{180}{R_c N} \times 0,1, \quad (3.8)$$

$$\sigma_{v_v} = 180 \times 0,1. \quad (3.9)$$

É importante ressaltar que o ruído foi adicionado apenas nos sinais de medição, ou seja na realimentação do controlador, influenciando diretamente apenas o cálculo estimado das potências.

3.4 Métricas para Avaliação da Qualidade da Energia

O uso de sistemas UPS tem grande aplicação no aumento da confiabilidade e melhoria na qualidade da energia elétrica fornecida a uma carga. Assim sendo, é de suma importância que a qualidade da energia seja considerada na avaliação do sincronismo de unidades UPS.

Qualidade de energia elétrica pode ser definida como sendo a característica de um sistema de fornecer energia elétrica em tensão alternada com forma de onda senoidal pura e sem alteração em amplitude ou frequência. Os limites de alteração das características desejáveis são definidas por diversas normas nacionais e internacionais. Neste trabalho serão utilizados os critérios estabelecidos em (ANEEL, 2010).

Esta seção consiste na exposição das metodologias utilizadas para análise das séries temporais dos modelos e as métricas estabelecidas para compará-los, analisando tanto o regime permanente, quanto o regime transiente. A qualidade da energia fornecida será medida utilizando critérios que serão explicitados a seguir.

3.4.1 Desvio da frequência

Vários métodos de estimação de frequência são encontrados na literatura para lidar com sinais elétricos de potência. Os mais comuns se baseiam em cruzamento por zero (Begovic et al., 1993; Duric e Durisic, 2005), FFT³(Transformada Rápida de Fourier) (Yang e Xue, 2008), Mínimos Quadrados (Pradhan et al., 2005), PLL (Ferreira et al., 2011), dentre outros.

O método baseado em cruzamento por zero foi escolhido para monitoramento da frequência, pela simplicidade da implementação, tanto computacional quanto eletrônica. Além disso, de acordo com Begovic et al. (1993), este método é robusto aos harmônicos do sinal, porém tem como desvantagem a sensibilidade a sinais de ruído. Outra desvantagem desse método é a necessidade de uma maior discretização da medição da frequência.

A frequência fundamental da tensão pode ser calculada como sendo o inverso do período fundamental existente em um ciclo total da onda de tensão. O tempo de cada ciclo foi determinado por meio da detecção de passagem por zero em sentido decrescente. Isso possibilita a medição discreta da frequência durante todo o tempo a partir do cálculo $f = 1/T$, ao longo de todo o sinal.

Após decorrido o período transiente, a frequência do sinal de tensão na carga oscila em torno de um valor médio. Esse valor foi considerado a frequência fundamental alcançada em cada teste, sendo calculado pela média dos valores encontrados após atingido o regime permanente.

A frequência nominal adotada neste trabalho é de 60 Hz. O órgão regulador estipula uma tolerância de $\pm 0,1$ Hz na variação da frequência em regime permanente.

³FFT - do inglês *Fast Fourier Transform*.

3.4.2 Desvio da tensão

Os problemas mais comuns envolvendo qualidade de energia elétrica se relacionam com a amplitude da tensão. Há três tipos mais comuns de falhas de curta duração: a interrupção do fornecimento, o afundamento de tensão e a elevação de tensão, divididas segundo a alteração do valor da tensão eficaz conforme Tabela 3.2.

Essas falhas são classificadas em momentâneas (quando tem duração de 0 a 3 segundos) ou temporárias (quando tem duração de 3 segundos a um minuto). Além dos distúrbios de curta duração, um outro tipo comum são as flutuações de tensão, que são alterações aleatórias (repetitivas ou esporádicas) no valor da tensão eficaz.

Equivalentemente ao item anterior, a amplitude da tensão foi calculada por amostragem a partir da detecção dos picos do sinal de tensão. Após o regime transiente a amplitude oscila em torno de um valor médio que foi considerado como a medida da amplitude do sinal de tensão.

Como definido na Seção 3.3.3, as medidas da amplitude e frequência do sinal de tensão serão utilizadas no cálculo do transitório do sistema. As definições adotadas para essas métricas implicam em avaliações discretas, e acontecem em cada pico (para o cálculo da amplitude), ou passagem por zero (para o cálculo da frequência) do sinal de tensão. Assim o valor do tempo de transitório encontrado é limitado pela discretização imposta pelo métodos de medição definidos.

3.4.3 THD - taxa de distorção harmônica

A THD é um índice que avalia o quanto um sinal senoidal está distorcido da sua forma original, pela presença de senóides de outros níveis de frequência e amplitude.

Seja um sinal de tensão periódico definido pela soma de componentes senoidais dado por:

$$v(t) = \sum_{h=0}^{\infty} V_h \text{sen}(h\omega t + \alpha_h); \quad h = 0,1,2,3,\dots \quad (3.10)$$

em que h define a ordem do harmônico. A componente c.c. V_0 está inclusa em 3.10.

Tabela 3.2: Classificação das variações de tensão de curta duração.

Denominação	Amplitude da tensão
Interrupção de Tensão	< 0,1 p.u.
Afundamento de Tensão	>0,1 e < 0,9 p.u.
Elevação de Tensão	>1,1 p.u.

Fonte: (ANEEL, 2010).

Os valores eficazes de tensão são definidos por:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} v^2(t) dt} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_H^2} \quad (3.11)$$

em que τ é um instante de tempo qualquer, T é o período e

$$V_H = \sqrt{\sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h^2} \quad (3.12)$$

O índice utilizado para quantificar a distorção em relação à senoide fundamental do sinal é chamado *THD* e é definido por:

$$THD = \frac{V_H}{V_{1rms}} = \sqrt{\frac{V_{rms}^2}{V_{1rms}^2} - 1} \quad (3.13)$$

A THD do sinal de tensão foi calculada apenas no regime permanente, indicando a qualidade do sinal de tensão que o sistema conseguiu alcançar. Em ANEEL (2010), é exigido que a THD de tensão seja menor que 10% em relação à tensão fundamental.

3.4.4 Gasto adicional de energia durante o regime transitório

Além de definir qual o tempo gasto para atingir o sincronismo, uma outra medida importante para a comparação dos métodos é a energia gasta durante esse período.

O valor da energia liberada até que o sistema entre em sincronismo foi definido da seguinte forma.

$$E_a = \int_{t=0}^{T_t} |P_{inst}(t) - \bar{P}_{inst}| dt, \quad (3.14)$$

em que P_{inst} é a potência instantânea $P_{inst}(t) = x_{n1}(t) \cdot u_o(t)$, fornecida por cada UPS, T_t o tempo transiente, e \bar{P}_{inst} é o valor médio da potência instantânea após decorrido o período transiente.

A medida da energia E_a é sensível às condições iniciais, pois quanto maior for a “distância” da solução síncrona⁴, maior será o tempo e a energia gastos para se atingir o sincronismo desejado.

⁴Ver Definição 2, no Capítulo 4.

3.4.5 Determinação das constantes k_ω e k_u

Para se comparar o desempenho de dois métodos com topologias diferentes é desejável que ambos estejam sintonizados nos valores ótimos de seus parâmetros para o problema em questão.

Procurou-se determinar o valor das constantes das curvas de decaimento k_ω e k_u para cada método, uma vez que essas constantes influenciam de maneira diferente a estabilidade e a sincronização de cada um deles.

Para definir os valores de k_ω e k_u de forma que cada método apresentasse seu melhor desempenho, foi feita uma busca pelo valor ótimo desses parâmetros, estabelecendo uma função custo considerando as métricas aqui apresentadas. A função custo em que se avalia o desempenho do sistema é dada por:

$$J = m_1 w_1 + m_2 w_2 + m_3 w_3, \quad (3.15)$$

em que $w_1 = 1$; $w_2 = 0,33$ e $w_3 = 0,003$ são os pesos de cada métrica; m_1 é a variação máxima da amplitude da tensão, m_2 é o erro relativo da tensão e m_3 é o gasto adicional de energia E_a . Os valores dos pesos foram escolhidos de forma que as parcelas da Equação 3.15 ficassem próximas de 1.

Os Sistemas 3.1 e 3.2 foram simulados 1000 vezes, bem como a Equação 3.15. O conjunto de valores escolhidos por meio da minimização de 3.15 foi: $k_\omega = 4,0 \times 10^{-7}$ e $k_u = 1,5 \times 10^{-5}$ para o Método I, e $k_\omega = 2,47 \times 10^{-4}$ e $k_u = 5,4 \times 10^{-6}$ para o Método II.

3.5 Resultados

A Figura 3.2 mostra um caso típico dos sinais de corrente das UPS para cada método. Pode-se perceber que a partir de certo instante elas praticamente coincidem em ambos os métodos.

Os sinais de corrente do Modelo I aproximam-se lentamente, porém com um pequeno erro entre os valores instantâneos. O Modelo II converge mais rapidamente para o sincronismo, porém, antes de atingir este sincronismo há um maior distanciamento entre os sinais. Esse comportamento foi frequentemente observado nos resultados de simulação.

A metodologia usada para monitorar o sinal de tensão permite observar a variação durante o transitório da amplitude e da frequência desse sinal de forma discreta com uma amostra por ciclo, ou aproximadamente 60 amostras por segundo. Na Figura 3.3 é mostrado um caso típico da variação da amplitude e na Figura 3.4 um caso típico da variação frequência do sinal da tensão para ambos os métodos. O Método II apresenta uma maior variação dos sinais durante transitório e o regime permanente para ambos os testes, contudo, ambos não ultrapassam nenhum dos limites estipulados em ANEEL (2010).

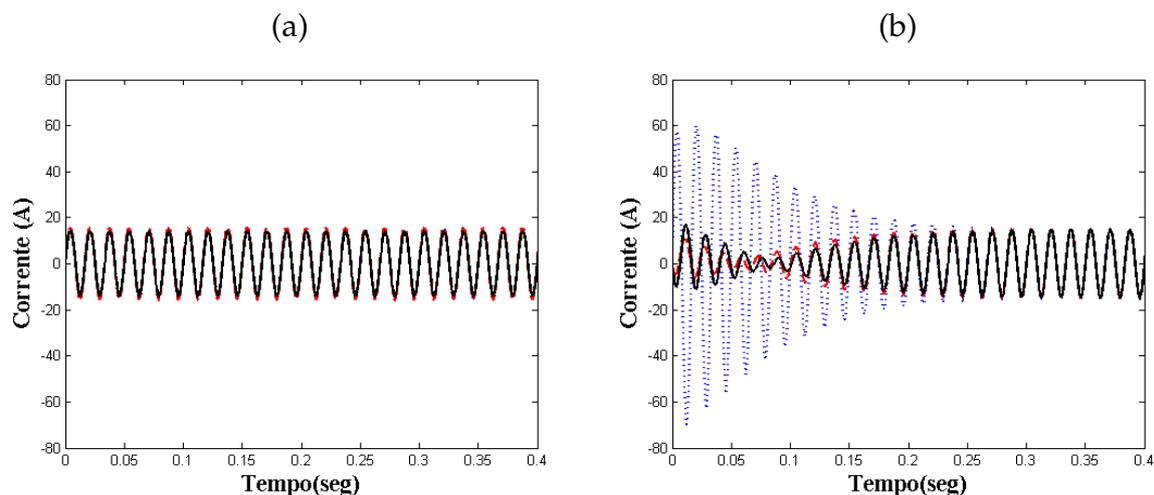


Figura 3.2: Casos típicos das correntes de saída das UPS_1 (\cdots), UPS_2 ($- -$) e UPS_3 ($-$) para a) Método I, b) Método II. Após transcorrido o período transitente, o sistema entra em sincronismo e atinge o valor de referência.

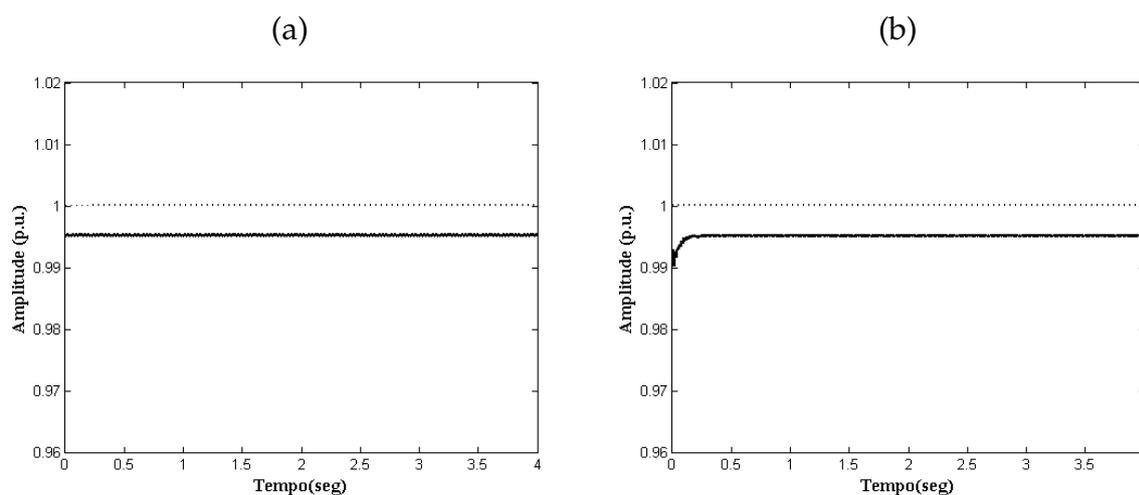


Figura 3.3: Caso típico mostrando a amplitude da tensão imposta sobre a carga ($-$) e a tensão de referência (\cdots) para a) Método I, b) Método II.

Para testar a sensibilidade dos métodos à incerteza paramétrica foram feitas simulações Monte Carlo conforme descrito na Seção 3.3 e analisado se, para várias condições, o sistema convergiria para soluções próximas. As Figuras 3.5 e 3.6 mostram os resultados dessas simulações.

É possível observar que ainda no transitório os sistemas atingem os limites especificados pelas normas para os casos estudados. O Método II apresenta uma maior variação durante o regime transitente, mas basicamente a mesma variação para o regime permanente tanto para a amplitude, quanto para a frequência do sinal de tensão. Em regime permanente ambos os métodos apresentam erros em relação à amplitude nominal quase idênticos, menores do que 1%. No Método I praticamente não há erros

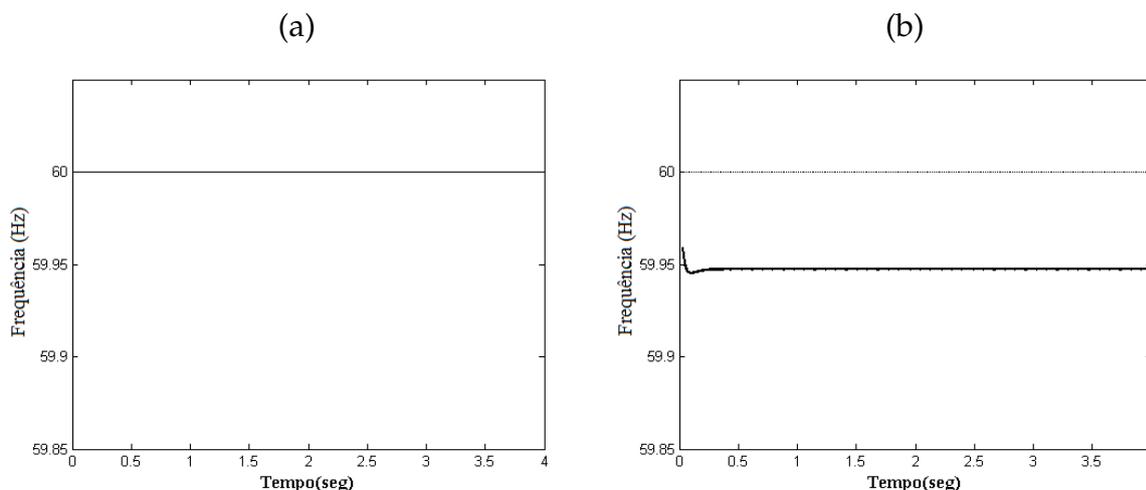


Figura 3.4: Caso típico mostrando a frequência do sinal de tensão entregue a carga (–) e o valor de referência (· · ·) para a) Método I, b) Método II.

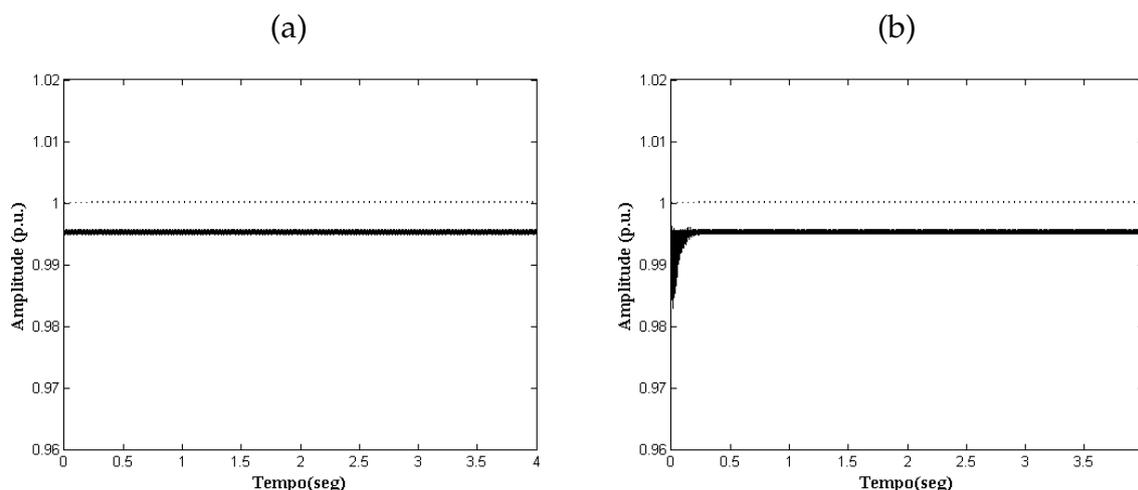


Figura 3.5: Resultado da simulação Monte Carlo para variação da amplitude da tensão. a) Método I e b) Método II. Há vários traços quase coincidentes nas figuras.

no valor médio da frequência, e o Método II apresenta um erro da ordem de 0,05Hz, que está dentro dos limites especificados pelas normas.

Para evidenciar esse resultado foram construídos histogramas mostrando o desvio relativo da tensão média e da frequência média do sinal de tensão para todas as simulações, conforme mostrado nas Figuras 3.9 e 3.10.

Os métodos apresentam desvio de tensão também próximos. O desvio da frequência para o Método I é próximo de zero e com baixa variância. Para o Método II o desvio da frequência é maior, contudo, obedece às exigências das normas. Essa diferença pode estar relacionada com o valor das constantes k_{ω} determinadas na Seção 3.4.5, que é maior para o Método II. Vale lembrar que é possível corrigir esse erro ajustando-se

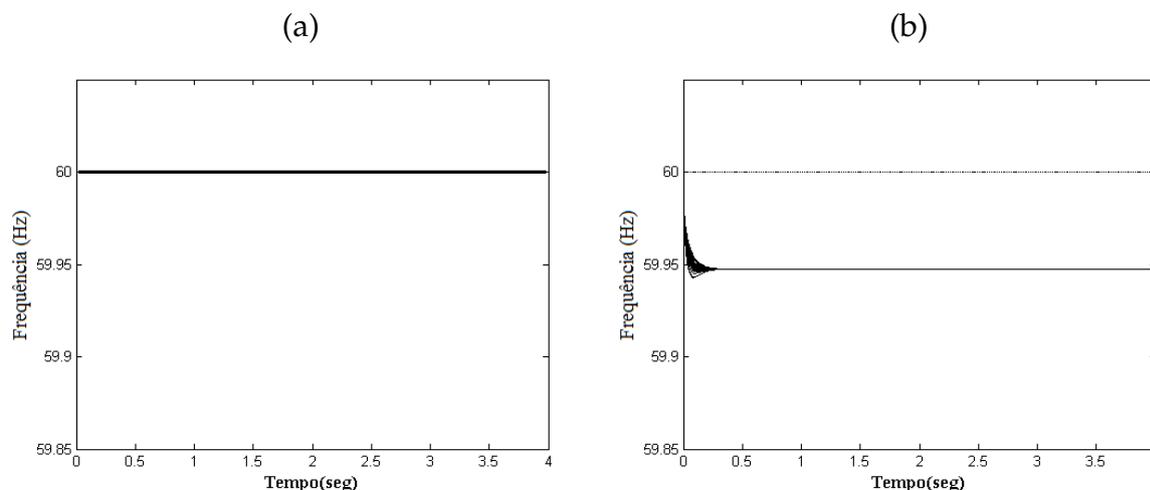


Figura 3.6: Resultado da simulação Monte Carlo para variação da frequência do sinal de tensão. a) Método I e b) Método II.

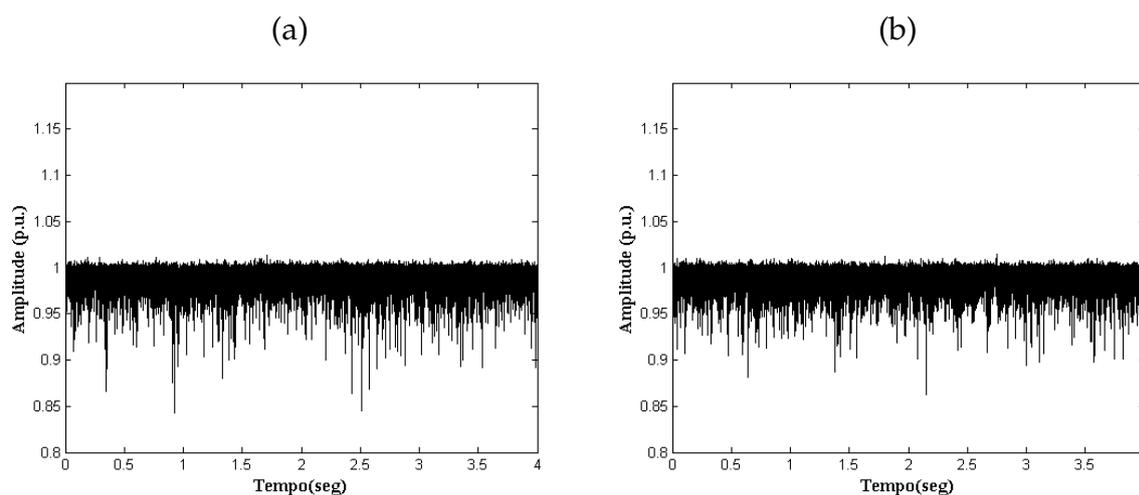


Figura 3.7: Resultados das simulações Monte Carlo para a amplitude da tensão com ruído nos dados de medição. a) Método I e b) Método II.

a frequência de referência, uma vez que a variância da frequência foi relativamente pequena.

Para verificar a distorção do sinal de tensão que alimenta a carga foi calculada a THD desse sinal em regime permanente para todas as simulações. Os histogramas da Figura 3.11 mostram as distribuições das THD encontradas para os diversos cenários.

Ambos os métodos atingiram baixos valores de THD para os testes realizados. O Método I apresentou menor valor médio de THD e menor variação desta métrica para os diversos casos de divergência paramétrica.

O gasto adicional de energia durante o transitório para cada sistema é mostrado nos histogramas da Figura 3.12

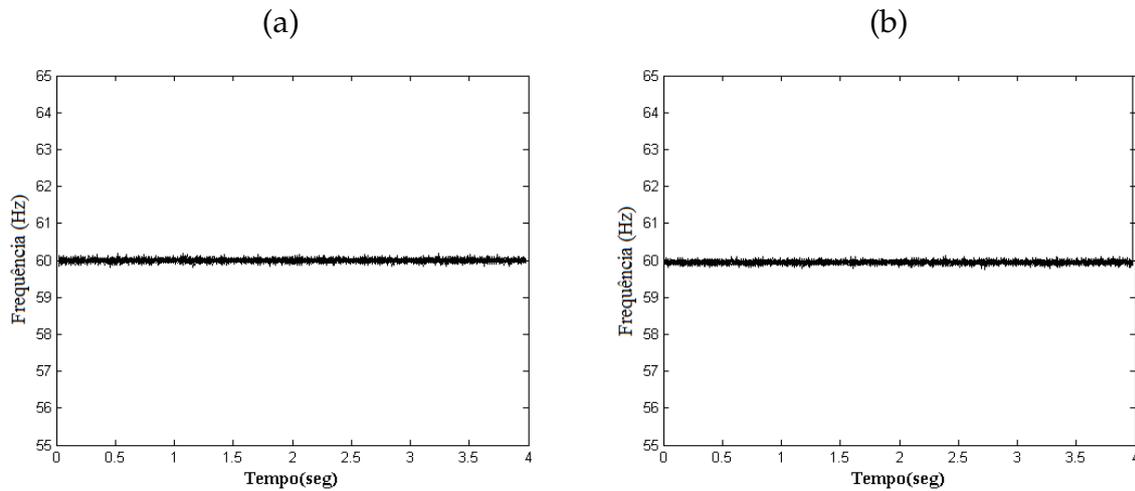


Figura 3.8: Resultados das simulações Monte Carlo para a frequência do sinal de tensão com ruído nos dados de medição. a) Método I e b) Método II.

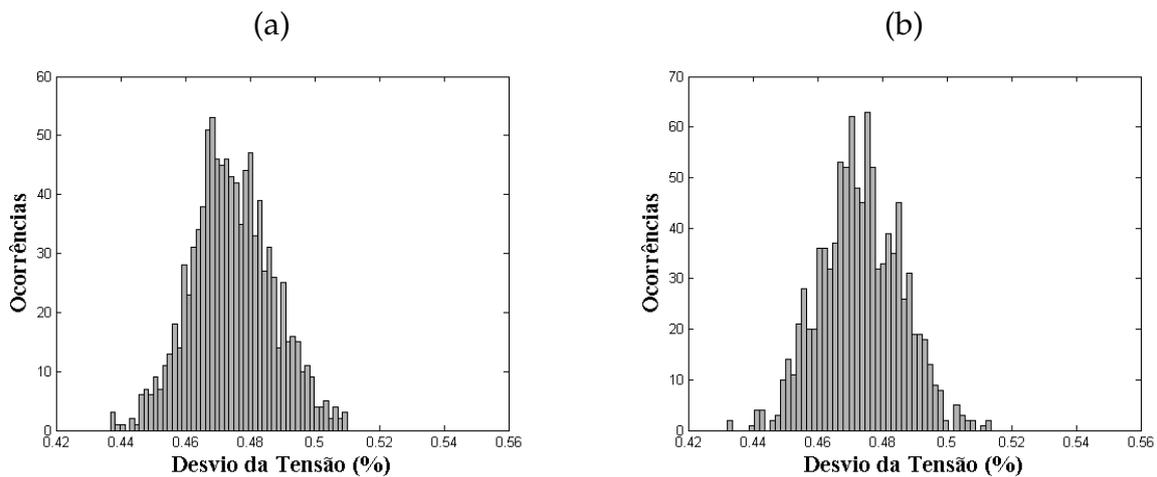


Figura 3.9: Histogramas do desvio relativo da amplitude da tensão em regime permanente com a nominal em (%) para a) Método I e b) Método II.

Ambos os métodos apresentaram baixo valor para essa métrica, contudo o Método II, para alguns casos, apresentou valores de ordem 7 vezes maior e uma grande variância quando comparado ao Método I.

3.6 Conclusão

Neste capítulo foi mostrado que os controladores adotados são robustos a variações paramétricas (para a ordem de incerteza testada) inerentes aos componentes comerciais comumente utilizados na fabricação de UPS. Foi testada a robustez à essa incerteza dos parâmetros e mostrado para cada sistema, por meio de simulação, a consequência na

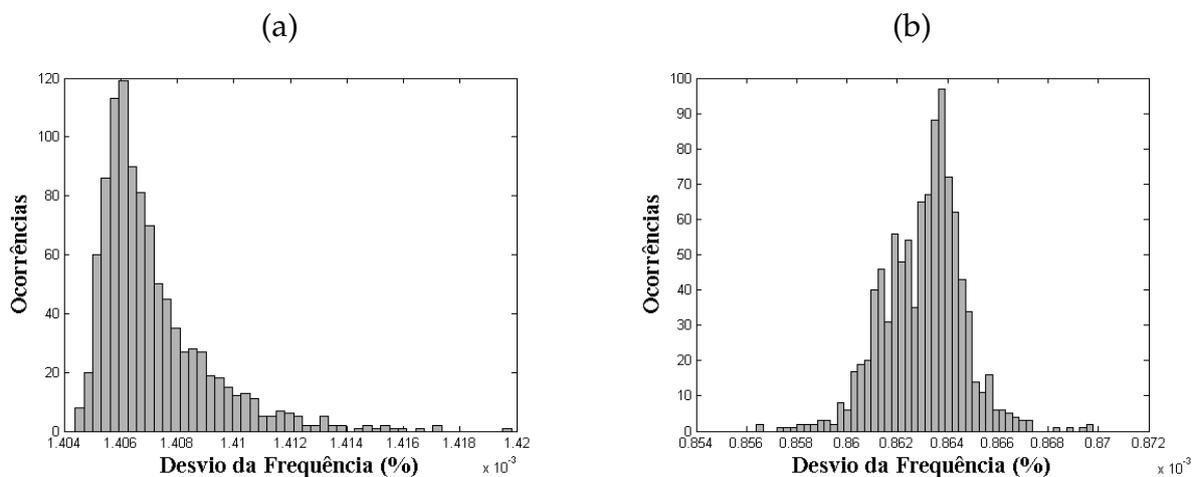


Figura 3.10: Histogramas do desvio relativo da frequência fundamental da tensão em regime permanente com o valor nominal em (%) para a) Método I e b) Método II.

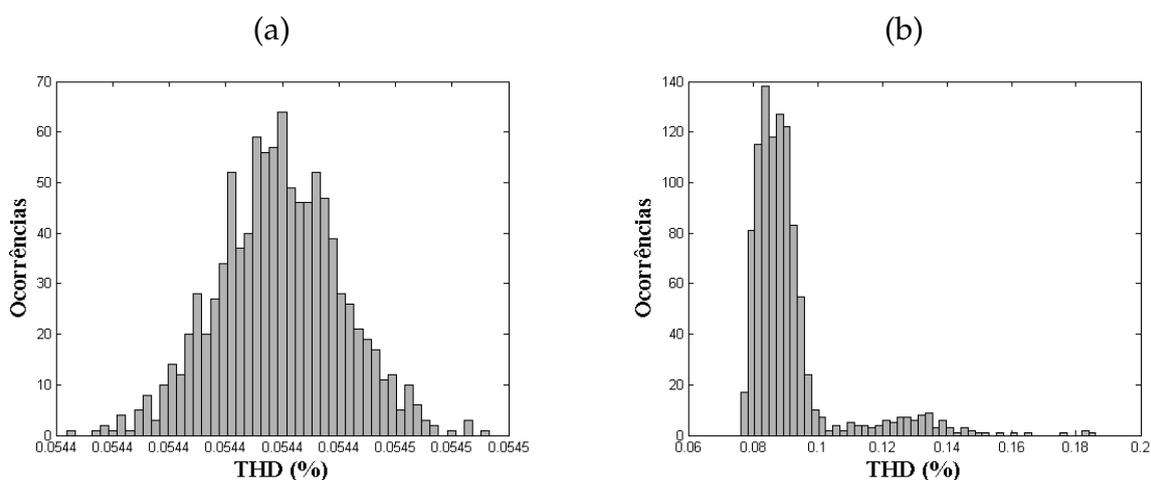


Figura 3.11: Histograma da distorção harmônica total resultante de cada método. a) Método I e b) Método II.

qualidade do sincronismo alcançado.

Foram definidas métricas que possibilitaram a avaliação de métodos de paralelismo, a partir de várias características definidas buscando o objetivo de maior interesse que, neste caso, foi o fornecimento de energia à carga com qualidade.

Foi feita a análise Monte Carlo da tensão de saída avaliando-se a amplitude e frequência do sinal. Foi possível comparar os métodos de paralelismo com a adoção de critérios comuns baseados em métricas avaliadas para o sinal de tensão sobre a carga.

Apesar de o Método I apresentar uma melhor qualidade de energia, o Método II também demonstra resultados satisfatórios que atendem as principais normas do setor, possibilitando sua aplicação em muitos casos. Acredita-se que a simplicidade do

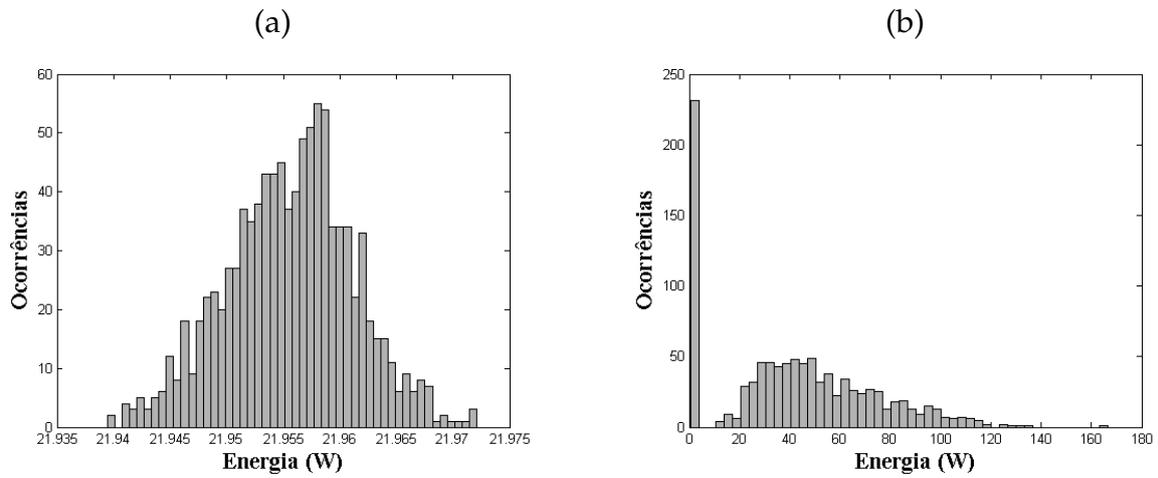


Figura 3.12: Histograma do gasto adicional de energia durante o regime transitório. a) Método I e b) Método II.

Método II, além de facilitar a análise de estabilidade, seja benéfica não só no cálculo da tensão de referência, mas até mesmo construtivamente.

Análise de Estabilidade do Sincronismo de UPS Não Idênticas

“Inútil levantar-vos antes da aurora, e atrasar até alta noite vosso descanso, para comer o pão de um duro trabalho, pois Deus o dá aos seus amados até durante o sono.”

Salmos 127:2

4.1 Introdução

Como foi dito nos capítulos anteriores, a técnica mais comum aplicada ao paralelismo de UPS sem comunicação é o método *Droop*, que cria uma inter-relação entre a potência ativa e a frequência e a potência reativa e a tensão. Muitos trabalhos se dedicaram a otimizar esse método, seja pelos novos métodos de estimativa da potência, seja pelas melhorias nas leis de controle e cálculo das constantes de decaimento. Contudo, poucos autores se dedicaram a estudar a estabilidade desses sistemas e testar limites de aplicação das leis de controle encontradas.

Uma grande dificuldade é a forte não linearidade do sistema e a complexidade do mesmo, tanto maior quanto maior o número de unidades acopladas.

A teoria de estabilidade para sistemas lineares é bem fundamentada e difundida na comunidade científica. Para o caso de sistemas não lineares existem técnicas específicas de análise, embora menos conhecidas que a primeira. A análise de estabilidade para esses casos é feita mais comumente, pela linearização do sistema em torno do ponto de operação e depois aplicadas as técnicas lineares.

Talvez, uns dos trabalhos mais conhecidos no estudo sobre estabilidade do paralelismo de UPS seja o de Coelho (2000). Nesse trabalho, o autor desenvolve um modelo simplificado utilizando as variáveis de interesse, baseado na técnica de análise de pequenos sinais, comum no estudo de estabilidade de SEP¹. Com esse modelo foi

¹Sistema Elétrico de Potência

possível determinar os limites de tolerância dos principais parâmetros do sistema, comprovados experimentalmente.

Em Santos Filho (2009) esse modelo foi utilizado para estudar o caso de um sistema assimétrico (com diferença nos parâmetros de acoplamento) e definir os limites de assimetria que garantem a estabilidade.

Um trabalho mais recente sobre este tema é o de Furtado (2009) que propõe a análise de um modelo do sistema por meio da teoria de Floquet. Uma grande vantagem dessa técnica é que é possível, a princípio, testar qualquer método de sincronismo de UPS cujo modelo seja possível de ser representado em espaço de estados.

Neste capítulo será estudada a estabilidade da solução síncrona utilizando a técnica dos multiplicadores de Floquet e definidos os limites de estabilidade para o caso não idêntico. Será feito um estudo sobre a técnica apresentando algumas limitações do seu uso. Para fins de comparação será utilizado o modelo desenvolvido por Furtado (2009), uma vez que o mesmo já foi testado para o caso de UPS idênticas.

Será apresentada uma breve revisão das técnicas citadas na Seção 4.2 e posteriormente na Seção 4.3 será apresentada com mais detalhes a técnica de Análise de estabilidade baseada na teoria de Floquet. Por fim, na Seção 4.5 essa técnica é aplicada em um sistema UPS e definidos os limites dos parâmetros que garantem estabilidade ao sistema.

4.2 Análise de Estabilidade Local

A análise global de estabilidade nem sempre é possível para muitos sistemas dinâmicos. A análise de estabilidade local nos dá uma informação sobre a estabilidade na região de operação e por muitas vezes satisfazem os interesses sobre a estabilidade do sistema em questão.

No contexto de paralelismo de UPS, pequenas perturbações nos estados são comuns, provocados por flutuações na carga, ruído nos sinais da rede, dentre outros. Verificar a estabilidade da solução síncrona de sistemas UPS acoplados pode ser entendido com uma análise da robustez dessa solução em relação a pequenas perturbações.

Em se tratado de sistema UPS, não são encontrados trabalhos que tratem da estabilidade global de sistemas. Até mesmo para a análise local são raros os resultados que apresentem uma técnica eficiente.

Nesta seção serão introduzidas as técnicas de análise de pequenos sinais de Coelho (2000) e análise baseado na teoria de Floquet de Furtado (2009), aplicadas a sistemas UPS. Ambas as técnicas têm carácter local e algumas considerações fortes que limitam seu uso e resultados, mas que servem satisfatoriamente para os trabalhos abordados, algumas delas com resultados experimentais.

4.2.1 Revisão das técnicas de análise de estabilidade

Técnica de pequenos sinais

Em Coelho (2000) é proposto um modelo de pequenos sinais para analisar a estabilidade de um sistema de n UPS acopladas e utilizando o método de controle de curvas de decaimento. O método desenvolvido é baseado em trabalhos semelhantes aplicados em paralelismo de máquinas síncronas. Uma grande vantagem do sistema é que é possível construir uma matriz que será utilizada na análise pela concatenação de submatrizes que representam cada unidade UPS.

O autor descreve o modelo a partir dos desvios das potências ativa ΔP_i e reativa ΔQ_i fornecidas como entradas, em que $i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$. A tensão de saída de cada inversor é representada na forma fasorial $E = E_d + jE_q$ e a variação desse fasor dada por:

$$\Delta e_i = \Delta e_{di} + j\Delta e_{qi}. \quad (4.1)$$

As variáveis escolhidas para construção do modelo foram as componentes do fasor de tensão e o desvio da frequência de saída $\Delta\omega$. A partir da relação imposta pelo método de curva de decaimento o modelo em espaço de estados, linearizado em torno do ponto de operação, para cada inversor é dado por:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta e_{di} \\ \Delta e_{qi} \end{bmatrix} = M_i \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta e_{di} \\ \Delta e_{qi} \end{bmatrix} + C_i \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

sendo

$$M_i = \begin{bmatrix} \frac{-\omega_f}{n_q} & 0 & 0 \\ \frac{m_d n_q - m_q n_d}{n_d} & \frac{n_d m_q \omega_f}{n_d m_d \omega_f} & \frac{n_q m_q \omega_f}{n_q m_d \omega_f} \\ \frac{m_q n_d - m_d n_q}{m_q n_d - m_d n_q} & \frac{m_d n_q - m_q n_d}{m_q n_d - m_d n_q} & \frac{m_d n_q - m_q n_d}{m_q n_d - m_d n_q} \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

$$C_i = \begin{bmatrix} -k_p \omega_f & 0 \\ 0 & \frac{k_v m_q \omega_f}{m_d n_q - m_q n_d} \\ 0 & \frac{k_v m_d \omega_f}{m_q n_d - m_d n_q} \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

em que ω_f é a frequência de corte do filtro de medição e os demais parâmetros são dados

$$\text{por:} \quad m_d = -\frac{E_{q0}}{E_{d0}^2 + E_{q0}^2}, \quad (4.5) \quad n_d = \frac{E_{d0}}{\sqrt{E_{d0}^2 + E_{q0}^2}}, \quad (4.6)$$

$$m_q = \frac{E_{d0}}{E_{d0}^2 + E_{q0}^2}, \quad (4.7) \quad n_q = \frac{E_{q0}}{\sqrt{E_{d0}^2 + E_{q0}^2}}, \quad (4.8)$$

em que E_{d0} e E_{q0} são as componentes real e imaginária do fasor tensão no ponto de operação.

Como a potência aparente por ser dada por $S = I_s E_s$, logo:

$$\Delta S = I_s \Delta e + E_s \Delta i, \quad (4.9)$$

em que Δi é a variação da corrente de saída da UPS i , dada por $\Delta i = Y_s \Delta e$. A matriz de admitância Y_s é definida como o inverso da matriz impedância Z . Essa matriz de impedância varia com a estrutura de conexão das unidades e para o tipo de ligação adotada neste presente trabalho será dada por:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 + Z_l & Z_l & \cdots & Z_l \\ Z_l & Z_2 + Z_l & \cdots & Z_l \\ Z_l & Z_l & \ddots & Z_l \\ Z_l & Z_l & \cdots & Z_n + Z_l \end{bmatrix}, \quad (4.10)$$

em que Z_l é a impedância de carga e Z_i é a impedância de conexão do inversor i , em que $i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$.

Portanto, o modelo final do sistema é linear e invariante no tempo, do tipo:

$$\dot{X} = AX \quad (4.11)$$

em que:

$$A = M_s + C_s(I_s + E_s Y_s)K_s, \quad (4.12)$$

e K_s é uma matriz constante. Dessa forma o autor descreve um método de construção da matriz A de um sistema multi-UPS de $3n$ dimensões a partir de submatrizes que descrevem individualmente os elementos do sistema.

Com esse modelo é possível determinar a estabilidade do sistema a partir dos autovalores da matriz A , que são dependentes dos parâmetros do sistema.

Um trabalho correlato é encontrado em Xinchun et al. (2003), que desenvolve um outro modelo também baseado em pequenos sinais e faz uma análise semelhante.

Técnica por Multiplicadores de Floquet

Em Furtado (2009) é proposto um método de análise de estabilidade da solução síncrona do sistema baseada na teoria dos multiplicadores de Floquet. Essa teoria permite a simplificação de sistemas lineares variantes no tempo em um modelo equivalente, linear e invariante no tempo. Por meio desse modelo equivalente é analisada a estabilidade do primeiro.

Baseado nisso Furtado (2009), propôs a construção do modelo a partir da linearização do erro de sincronismo de n UPS, dependente dos parâmetros e da variedade síncrona do sistema. Como a solução síncrona do sistema é periódica, o modelo linear construído será variante no tempo e periódico², sendo possível aplicar a técnica de análise de Floquet.

Este método pode ser aplicado, em princípio, a qualquer modelo de UPS em espaço de estados que apresente comportamento periódico. Como no trabalho de Coelho (2000), o modelo de Furtado (2009) também é construído por subsistemas que representam cada unidade UPS.

O presente método de análise de estabilidade tem como principal desvantagem a necessidade de se conhecer o estado síncrono para cálculo dos multiplicadores de Floquet.

Como essa técnica será objeto de estudo deste capítulo será tratado com maior detalhes nas seções seguintes.

4.3 Análise de Estabilidade por Multiplicadores de Floquet

4.3.1 Sistema linear variante no tempo

Um sistema dinâmico é dito linear variante no tempo (LVT) quando os elementos da matriz dinâmica variam temporalmente. Um sistema LVT pode ser representado pela equação a seguir:

$$\dot{\vec{x}}(t) = A(t)\vec{x}, \vec{x} \in \mathbb{R}^n. \quad (4.13)$$

Este sistema apresenta um conjunto de n soluções linearmente independentes (LI) representado por:

$$\Phi(t) = [\vec{x}_1(t) \quad \vec{x}_2(t) \quad \cdots \quad \vec{x}_n(t)]_{n \times n}. \quad (4.14)$$

Dessa forma, qualquer solução $\vec{x}(t)$ do sistema 4.13 pode ser escrita como uma combinação linear dessas soluções LI, isto é,

$$\vec{x}(t) = \alpha_1 \vec{x}_1(t) + \alpha_2 \vec{x}_2(t) + \cdots + \alpha_n \vec{x}_n(t),$$

ou ainda,

²O modelo linearizado do erro somente será periódico se o conjunto solução for estável for estável, como será apresentado na Seção 4.3.3.

$$\vec{x}(t) = \Phi(t)\vec{k}, \quad (4.15)$$

em que $\vec{k} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_n]^T$.

Dado que $\vec{x}(0) = \Phi(0)\vec{k}$, podemos rescrever a equação anterior da seguinte forma:

$$\vec{x}(t) = \Phi(t)\Phi^{-1}(0)\vec{x}(0); \quad (4.16)$$

4.3.2 Sistemas periódicos e transformação de Floquet

O sistema dado por (4.13) é dito periódico se existe um T , tal que:

$$A(t) = A(t + T). \quad (4.17)$$

O menor valor de T que satisfaz a equação 4.17 é o período do sistema.

Considerando a matriz $A(t)$ de um SLVT periódico é possível ver que $\partial\Phi/\partial t = A(t)\Phi(t)$. Dessa forma o conjunto solução do sistema é dado por:

$$\vec{x}(t + T) = [\beta_1\vec{x}_1(t + T) + \beta_2\vec{x}_2(t + T) + \dots + \beta_n\vec{x}_n(t + T)]; \quad (4.18)$$

que também é solução de 4.13. Cada solução $\vec{x}(t + T)$ pode ser relacionada linearmente com as soluções $\vec{x}(t)$. Assim sendo é possível afirmar que $\Phi(t + T)$ tem relação linear com $\Phi(t)$ dada por:

$$\Phi(t + T) = \Phi(t)\mathbf{M}, \quad (4.19)$$

em que \mathbf{M} é uma matriz $n \times n$ com elementos constantes chamada de matriz de Floquet (ou Matriz de Monodromia), desde que $\Phi(0) = I_n$. Os autovalores ρ_i de \mathbf{M} são chamados de multiplicadores de Floquet e trazem informações sobre a estabilidade de $A(t)$.

Floquet provou que o conjunto solução $\Phi(t)$ pode ser escrito na forma (Gans, 1965):

$$\Phi(t) = P(t)e^{Bt}, \quad (4.20)$$

em que B é uma matriz com elementos constantes e $P(t)$ é periódica com $P(T) = P(0) = I_n$. Portanto, a matriz de Floquet é dada também por:

$$\Phi(T) = \mathbf{M} = e^{BT}, \quad (4.21)$$

4.3.3 Aplicação da teoria de Floquet

Uma consequência importante do Teorema de Floquet descrito na subseção precedente é que um sistema linear com coeficientes periódicos pode ser transformado em um sistema linear com coeficientes constantes (Monteiro, 2002).

Tal resultado foi provado por Lyapunov em 1892 e, basicamente, mostra que se a matriz periódica $A(t)$ é real, então é possível encontrar um sistema linear autônomo dinamicamente equivalente. Isto significa que existe uma matriz periódica $P(t)$ que realiza uma transformação de coordenadas $\vec{x}(t) = P(t)y(t)$ de modo que o sistema 4.13 torna-se:

$$\dot{\vec{y}} = B\vec{y}(t), \quad (4.22)$$

em que B é uma matriz com elementos constantes, semelhante à matriz $A(t)$, cujos autovalores λ_i , denominados expoentes característicos, se relacionam com os autovalores ρ_i de \mathbf{M} da seguinte forma:

$$\rho_i = e^{\lambda_i T}. \quad (4.23)$$

A teoria de Floquet pode então ser utilizada para analisar a estabilidade de sistemas dinâmicos variantes no tempo. De fato, o sistema dinâmico 4.13 será estável se o sistema 4.22, dinamicamente equivalente, for estável. Por sua vez, o sistema 4.22 será estável, segundo a teoria de controle, se os autovalores da matriz B tiverem parte real negativa, ou ainda, considerando-se a equação 4.23, se os multiplicadores de Floquet tiverem módulo menor que a unidade.

A matriz de monodromia $\Phi(T)$, que é a matriz fundamental calculada no final do período T , é denominada também Matriz de Transição de Floquet, e a matriz fundamental $\Phi(t)$ é denominada Matriz de Transição de Estados. Uma dificuldade que se encontra aqui é que para a construção da matriz de transição de estados (e consequentemente da matriz de Floquet) há a necessidade de se conhecer o estado síncrono. O estado síncrono pode ser entendido como um caminho fechado dependente dos parâmetros do sistema. Em Peruzzi (2005); Mesquita (2007) os autores propõem uma forma de contornar esse problema utilizando a expansão polinomial de Chebyshev para aproximar o termo periódico, e o método iterativo de Picard para aproximar a matriz de transição de estados.

4.4 Análise da Estabilidade de Sincronismo de UPS

No trabalho de Furtado (2009) a análise de estabilidade utilizando a técnica de Floquet é aplicada no contexto de sincronismo de UPS.

Considere o sistema não linear formado por n UPS acopladas descrito por:

$$\begin{cases} \dot{\vec{x}}_1 = f_1(\vec{x}_1) + g_1(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n), \\ \dot{\vec{x}}_2 = f_2(\vec{x}_2) + g_2(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n), \\ \vdots \\ \dot{\vec{x}}_n = f_n(\vec{x}_n) + g_n(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n) \end{cases} \quad (4.24)$$

Caso o sincronismo seja possível, o sistema convergirá para uma variedade $\vec{x}_s = [\vec{x}_{s1} \ \vec{x}_{s2} \ \dots \ \vec{x}_{sn}]^T$ que é o conjunto de soluções do Sistema 4.24 para diferentes condições iniciais $x(0) = [\vec{x}_1(0) \ \vec{x}_2(0) \ \dots \ \vec{x}_n(0)]^T$.

O sistema será estável em torno de \vec{x}_s se para qualquer condição inicial $\vec{x}(0) = [\vec{x}_1(0) \ \vec{x}_2(0) \ \dots \ \vec{x}_n(0)]^T$ próxima a \vec{x}_s o sistema a convergir para \vec{x}_s .

Definição 2 Uma solução \vec{x}_s para o Sistema 4.24 que é um ciclo limite localmente estável no espaço de estados do conjunto das UPS acopladas será chamado de trajetória síncrona ou solução síncrona.

Esse problema pode ser reescrito tomando-se o erro dos estados do sistema em relação ao conjunto solução variante no tempo e conhecido \vec{x}_s , o qual é dado por:

$$\vec{e}_b = \begin{bmatrix} \vec{e}_1 \\ \vec{e}_2 \\ \vdots \\ \vec{e}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{x}_1 - \vec{x}_{s1} \\ \vec{x}_2 - \vec{x}_{s2} \\ \vdots \\ \vec{x}_n - \vec{x}_{sn} \end{bmatrix}, \quad (4.25)$$

em que \vec{e}_i é o erro entre os estados do i -ésimo oscilador e os estados da solução síncrona \vec{x}_s . O sincronismo se dá quando o vetor \vec{e}_b for nulo ou suficientemente pequeno.

Linearizando-se a equação que descreve a dinâmica do erro de sincronismo (a qual é função das equações dos sistemas acoplados) ao longo da solução síncrona tem-se:

$$\dot{\vec{e}}_{bL} = D_{fg}|_{\vec{x}=\vec{x}_s} \vec{e}_b, \quad (4.26)$$

em que $D_{fg}|_{\vec{x}=\vec{x}_s}$ é uma matriz quadrada de ordem $4n$ cujo elemento da i -ésima linha e j -ésima coluna é dado por

$$(D_{fg})_{ij} = \left(\frac{\partial f_i(\vec{x}_i)}{\partial \vec{x}_j} + \frac{\partial g_i(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n)}{\partial x_j} \right) \Big|_{\vec{x}=\vec{x}_s} \quad (4.27)$$

para $i, j = \{1, 2, \dots, 4n\}$. As derivadas parciais das funções f_i independem da solução síncrona (e portanto são constantes) quando $i = j$ e são nulas para $i \neq j$. Daí, e para

efeitos de simplificação, podemos denotar

$$\begin{aligned} (D_{fg})_{ii} &= A_i + B_i(t) \\ (D_{fg})_{ij} &= C_{ij}(t). \end{aligned} \quad (4.28)$$

Em Furtado (2009) é feita a análise para o caso idêntico (em que os parâmetros são os mesmos para ambas as UPS) e neste caso teremos:

$$A_1 = A_2 = \dots = A_n,$$

Além disso, no caso idêntico, a solução síncrona $\vec{x}_s = [\vec{x}_{s1} \ \vec{x}_{s2} \ \dots \ \vec{x}_{sn}]^T$ irá satisfazer $\vec{x}_{s1} = \vec{x}_{s2} = \dots = \vec{x}_n$ e, portanto,

$$B_1 = B_2 = \dots = B_n,$$

$$C_{11} = C_{12} = \dots = C_{1n} = \dots = C_{nn},$$

Consequentemente o sistema 4.26 torna-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{1L} \\ \dot{e}_{2L} \\ \vdots \\ \dot{e}_{nL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + B(t) & C(t) & \dots & C(t) \\ C(t) & A + B(t) & \dots & C(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C(t) & C(t) & \dots & A + B(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{1L} \\ e_{2L} \\ \vdots \\ e_{nL} \end{bmatrix}. \quad (4.29)$$

O Sistema 4.29 é linear, variante no tempo e periódico, pode-se portanto, aplicar a técnica de Floquet para encontrar um sistema equivalente que seja invariante no tempo e permita a análise da estabilidade do sistema inicial.

Como a matriz D_{fg} do sistema é dependente de alguns parâmetros do sistema, o modelo permite estabelecer os limites desses parâmetros que garantam estabilidade.

O método descrito para a análise de n osciladores acoplados pode ser resumido nos seguintes passos.

1. A partir das equações do erro do sistema, obter as matrizes do modelo linearizado.
2. Definir um conjunto de parâmetros e obter uma solução síncrona \vec{x}_s , a partir da simulação do sistema original.
3. Considerar como condições iniciais, em $t_0 = 0$, as colunas da matriz identidade de ordem $2n$, ou seja, $\vec{e}_0(t_0) = I_{2n}$.
4. Simular o sistema acoplado de $t_0 = 0$ até $t = t_p$, para cada uma das condições iniciais.

5. Construir a matriz de soluções linearmente independentes $\vec{e}_0(t_p) = \mathbf{M}$, a partir das soluções finais obtidas no passo anterior.
6. Obter e analisar os autovalores de \mathbf{M} .

4.5 Estabilidade do Sincronismo de UPS Não Idênticas

Analogamente, para um sistema Σ de n UPS não idênticas a dinâmica do erro de sincronismo linearizado em torno da solução síncrona pode ser representada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{1L} \\ \dot{e}_{2L} \\ \vdots \\ \dot{e}_{nL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 + B_1(t) & C_{12}(t) & \dots & C_{1n}(t) \\ C_{21}(t) & A_2 + B_2(t) & \dots & C_{2n}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1}(t) & C_{n2}(t) & \dots & A_n + B_n(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{1L} \\ e_{2L} \\ \vdots \\ e_{nL} \end{bmatrix}. \quad (4.30)$$

ou de maneira mais compacta:

$$\dot{e} = D_{fg}e.$$

Após feita a linearização do sistema Σ em torno da solução síncrona \vec{x}_s chegou-se a um modelo linear variante no tempo e periódico.

Para aplicação da técnica de Floquet foi adotado o modelo de Furtado (2009), em que cada unidade é descrita por:

$$\Sigma_n = \begin{cases} \dot{x}_{n1} = -\beta_n x_{n1} - \alpha_n u_o + \alpha_n u_n, \\ \dot{x}_{n2} = -\omega_f x_{n2} + \omega_f u_o x_{n1}, \\ \dot{x}_{n3} = \omega_{0r} x_{n4} - k_\omega x_{n2} x_{n4}, \\ \dot{x}_{n4} = -\omega_{0r} x_{n3} - k_\omega x_{n2} x_{n3}, \end{cases} \quad (4.31)$$

$$u_n = u_{0r} x_{n3} - \frac{k_u}{2} [u_o x_{n1} - 2x_{n2} x_{n3}^2] \left(\frac{k^2 x_{n4}}{1 + (k x_{n4})^2} \right),$$

em que u_n representa a tensão de saída do n -ésimo inversor da UPS. A variável u_o , é a tensão medida no barramento e é dada pelo somatório das correntes de saída das UPS sobre a carga R_c e pode ser definida por (4.43):

$$u_o = R_c \sum_{i=1}^n x_{i1}, \quad (4.32)$$

em que x_{i1} é o estado em ambos os modelos referente à corrente no indutor e é igual à corrente de saída de cada UPS.

A partir do modelo do sistema é possível calcular as submatrizes do modelo linearizado do erro de acordo com o conjunto de Equações 4.28. As matrizes encontradas para esse modelo são dadas a seguir:

$$A_n = \begin{bmatrix} -\beta_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_{or} \\ 0 & 0 & -\omega_{or} & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.33)$$

$$B_n = \begin{bmatrix} b_{n1} & b_{n2} & b_{n3} & b_{n4} \\ \omega_f(u_o + R_c x_{n1s}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_\omega x_{n4s} & 0 & -k_\omega x_{n2s} \\ 0 & k_\omega x_{n3s} & k_\omega x_{n2s} & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.34)$$

$$C_n = \begin{bmatrix} c_{n1} & 0 & 0 & 0 \\ \omega_f R_c x_{n1s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.35)$$

em que:

$$b_{n1} = -\alpha_n R_c - \alpha_n \frac{k_u}{2} (u_o + R_c x_{n1s}) \left(\frac{k^2 x_{n4s}}{1 + k^2 x_{n4s}^2} \right), \quad (4.36)$$

$$b_{n2} = -\alpha_n k_u x_{n3s}^2 \left(\frac{k^2 x_{n4s}}{1 + k^2 x_{n4s}^2} \right), \quad (4.37)$$

$$b_{n3} = -\alpha_n (u_{or} + 2k_u x_{n2s} x_{n3s}) \left(\frac{k^2 x_{n4s}}{1 + k^2 x_{n4s}^2} \right), \quad (4.38)$$

$$b_{n4} = \left\{ -\alpha_n k_u k^2 [x_{n1s} u_o - 2x_{n2s} x_{n3s}^2] \right\} \left(\frac{1 - k^2 x_{n4s}^2}{2(1 + k^2 x_{n4s}^2)^2} \right), \quad (4.39)$$

$$c_{n1} = -\alpha_n R_c - 0.5 \alpha_n k_u R_c x_{n1s} \left(\frac{k^2 x_{n4s}}{1 + k^2 x_{n4s}^2} \right), \quad (4.40)$$

em que x_{n1s} , x_{n2s} , x_{n3s} e x_{n4s} são os estados da solução síncrona do sistema Σ_n .

4.5.1 Análise numérica para dois osciladores não idênticos

O método de análise de estabilidade por multiplicadores de Floquet, foi aplicado em um sistema com duas UPS não idênticas, ilustrado na Figura 4.1.

O modelo completo em espaço de estados das duas UPS é descrito pelos conjuntos de equações a seguir:

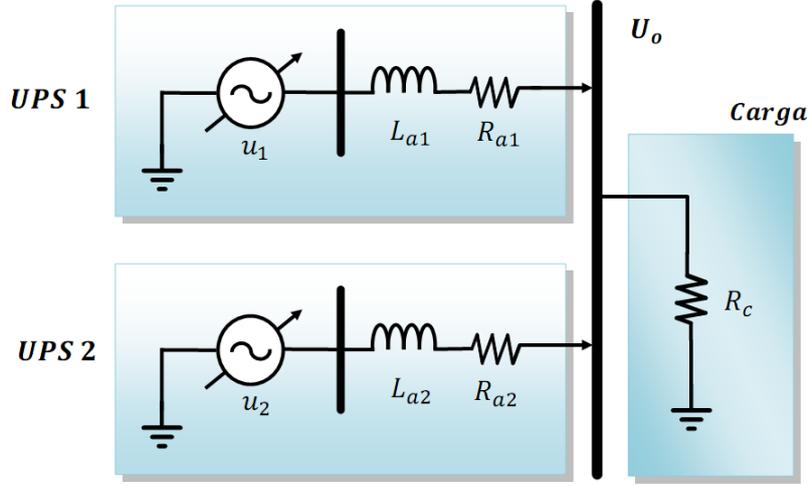


Figura 4.1: Sistemas de 2 UPS não idênticas conectadas a um barramento alimentando uma carga linear resistiva.

$$\Sigma_1 = \begin{cases} \dot{x}_{11} = -\beta_1 x_{11} - \alpha_1 u_o + \alpha_1 u_1, \\ \dot{x}_{12} = -\omega_f x_{12} - \omega_f u_o x_{11}, \\ \dot{x}_{13} = \omega_{0r} x_{14} - k_\omega x_{12} x_{14}, \\ \dot{x}_{14} = -\omega_{0r} x_{13} + k_\omega x_{12} x_{13}, \end{cases} \quad (4.41)$$

$$u_1 = u_{0r} x_{13} - \frac{k_u}{2} [u_o x_{11} - 2x_{12} x_{13}^2] \left(\frac{k^2 x_{14}}{1 + (kx_{14})^2} \right),$$

$$\Sigma_2 = \begin{cases} \dot{x}_{21} = -\beta_2 x_{21} - \alpha_2 u_o + \alpha_2 u_2, \\ \dot{x}_{22} = -\omega_f x_{22} - \omega_f u_o x_{21}, \\ \dot{x}_{23} = \omega_{0r} x_{24} - k_\omega x_{22} x_{24}, \\ \dot{x}_{24} = -\omega_{0r} x_{23} - k_\omega x_{22} x_{23}, \end{cases} \quad (4.42)$$

$$u_2 = u_{0r} x_{23} - \frac{k_u}{2} [u_o x_{21} - 2x_{22} x_{23}^2] \left(\frac{k^2 x_{24}}{1 + (kx_{24})^2} \right).$$

A variável u_n é a tensão de saída do inversor de frequência da UPS n e u_o a tensão do barramento, comum às duas UPS dada por:

$$u_o = R_c(x_{11} + x_{21}). \quad (4.43)$$

Por fim, $\alpha_n = 1/L_{an}$ e $\beta_n = R_{an}/L_{an}$ são os parâmetros que caracterizam o acoplamento de cada UPS. A Tabela 4.1 mostra os valores dos parâmetros utilizados na simulação.

Esse sistema gera a variedade mostrada na Figura 4.2 partindo das condições iniciais $x_1(0) = [11,97 \ 2028,08 \ 1 \ 0]$ e $x_2(0) = [3.3 \ 2046.73 \ 1 \ 0]$. Essas condições iniciais foram escolhidas próximas ao conjunto solução do sistema. Como os sistemas não são idênticos, pode-se perceber o surgimento de uma componente distintas da solução

Tabela 4.1: Conjuntos de parâmetros utilizados para a análise numérica de dois osciladores não idênticos.

Parâmetros	Símbolo	Valores
Indutor de acoplamento da UPS 1	L_{a1}	270 mH
Indutor de acoplamento da UPS 2	L_{a2}	330 mH
Resistor de acoplamento da UPS 1	R_{a1}	45 m Ω
Resistor de acoplamento da UPS 2	R_{a2}	55 m Ω
Carga resistiva	R_c	4 Ω
Frequência de corte do filtro PB	ω_f	6 π rad/s
Constante de suavização	k	5×10^{-5}
Referência da frequência	ω_{or}	$2 \times 60 \pi$ rad/s
Referência da tensão	u_{or}	180 V

para cada sistema Σ_i mesmo partindo de condições próximas.

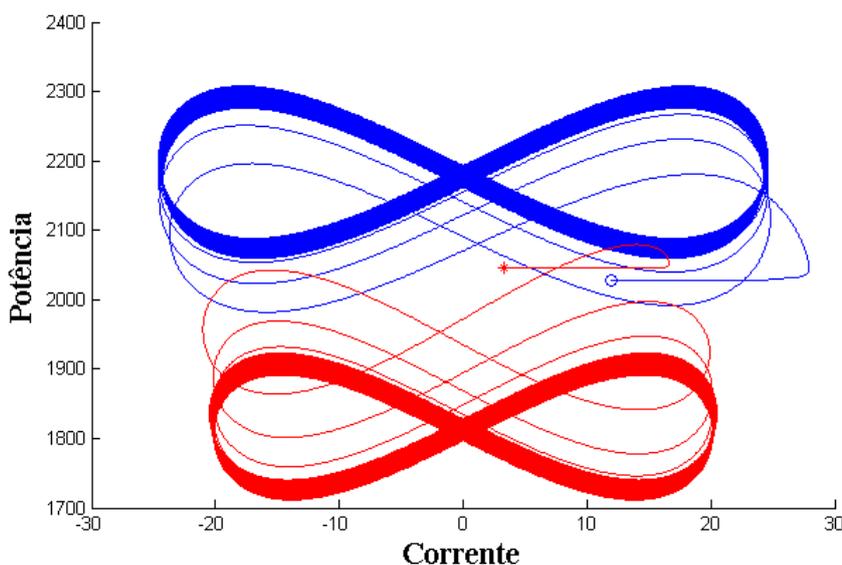


Figura 4.2: Projeção da evolução dos estados $x_{11} \times x_{12}$ (-) da relativos a UPS 1 e $x_{21} \times x_{22}$ (-) da relativos a UPS 1

Considerando um sistema global Σ composto por n sistemas Σ_i , $i = 1, \dots, n$, ou ainda $4n$ equações, cujo conjunto solução de Σ é um ciclo limite unidimensional, isto é, $\vec{x}_s \in \mathbb{R}^1$. Mais precisamente: a trajetória síncrona de Σ é a união de n componentes unidimensionais C_i , onde cada C_i , $i = 1, \dots, n$, é o conjunto solução do sistema Σ_i .

A Figura 4.3 mostra a dinâmica das correntes das duas UPS e a diferença entre elas. Após o transiente o erro entre elas se mantém limitado. Vale ressaltar que o erro³ não

³Considerando a definição de erro como sendo a norma da diferença entre os estados dos sistemas.

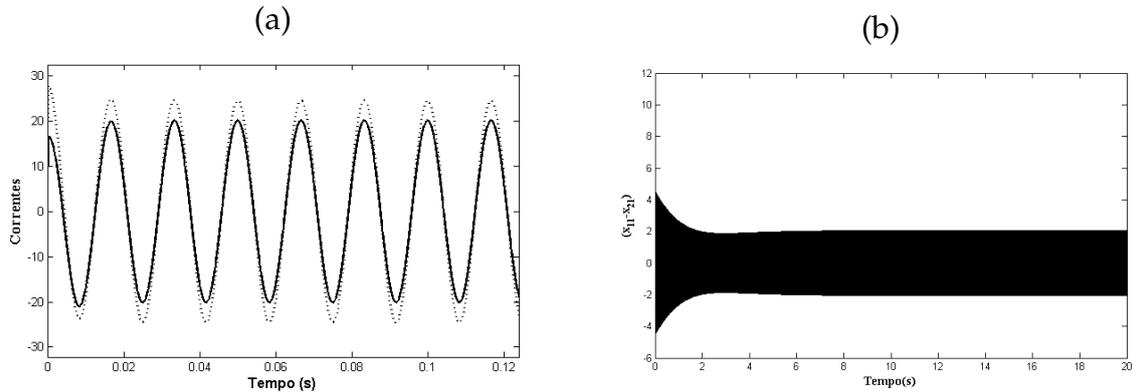


Figura 4.3: Dinâmica das correntes para o caso não idêntico. (a) corrente da UPS 1 (---) e UPS 2(—). b) Erro entre as correntes.

nulo, não é uma característica indesejável neste caso, mas um resultado previsível do sincronismo de sistemas não idênticos.

A partir das equações do sistema e dos seus parâmetros foram encontradas as matrizes para este caso e aplicado o método de análise considerando como condição inicial do Sistema 4.42, as colunas da matriz identidade de ordem $4n$. A simulação do sistema foi feita utilizando o integrador Runge-Kutta de 4ª ordem com passo de integração fixo $t_s = 10^{-4}$ s por um intervalo de tempo igual a um período $t_p = 1/60$ s, a partir de cada condição inicial, e o resultado após um período gravavam as colunas da matriz de monodromia \mathbf{M} , mostrada a seguir.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 11400 & 13300 & 0 & 0 & -11800 & 4000 \\ -3000 & -100 & -1360700 & -1581200 & 3500 & 0 & 1404700 & -484300 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 100 & 0 & 0 & -100 & 0 \\ 0 & 0 & -12100 & -14000 & 0 & 0 & 12500 & -4300 \\ 3600 & 100 & 1611100 & 1876600 & -4200 & 100 & -1659000 & 570500 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -100 & -100 & 0 & 0 & 100 & 0 \end{bmatrix}.$$

Os autovalores da matriz de monodromia \mathbf{M} são os chamados multiplicadores de Floquet e sua localização no plano complexo é mostrada no gráfico da Figura 4.4.

Como todos os multiplicadores do sistema estão dentro do círculo raio unitário, conclui-se que esse sistemas, para os valores de parâmetros escolhidos, é estável.

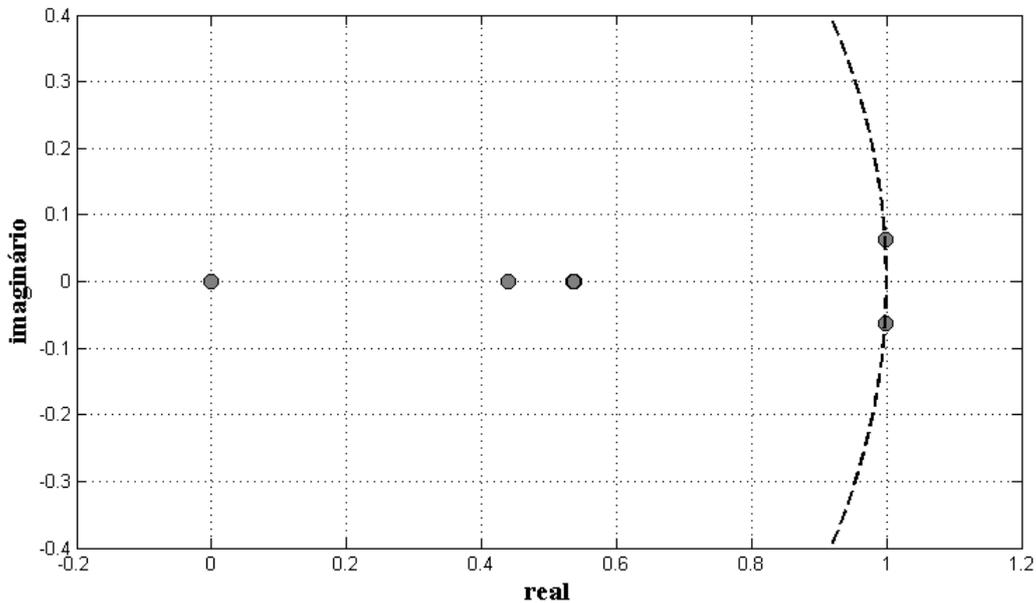


Figura 4.4: Multiplicadores de Floquet no plano complexo.

4.5.2 Determinação da solução síncrona

Uma das grandes dificuldades dessa técnica é a escolha da solução síncrona, importante para o cálculo de D_{fg} . De fato, a solução síncrona é sensível aos parâmetros do sistema, e ainda mais para o caso não idêntico.

A técnica descrita neste capítulo é dependente do conhecimento a priori da solução síncrona \vec{x}_s e de sua estabilidade. Portanto, não parece ser possível, a princípio, a escolha de um conjunto solução padrão para o cálculo dos multiplicadores de Floquet.

Em outras palavras, consideremos um conjunto solução padrão \vec{x}_{sp} formada por todos os pontos da solução periódica do sistema 4.31 e conhecida ser estável para um dado conjunto de parâmetros \vec{K}_p . Para determinar os autovalores $\{\lambda_{pi}\}_{i=1}^{4n}$ da matriz de monodromia a partir do método descrito, são utilizados tanto \vec{x}_{sp} quanto \vec{K}_p . Entretanto, considerando a mesma solução padrão \vec{x}_{sp} mas um outro conjunto de parâmetro, haveria um suposto erro para o cálculo dos multiplicadores de Floquet.

A fim de verificar se ocorre esse erro pela escolha de \vec{x}_{sp} foi feito o seguinte teste: os multiplicadores de Floquet foram calculados para 20 conjuntos de parâmetro K_k com $k = 1, \dots, 20$, utilizando os valores mostrados na Tabela 4.2 (caracterizando o caso idêntico) e variando os valores de $k_u = k_\omega$ entre 10^{-7} a 10^{-3} . Os multiplicadores foram calculados utilizando um conjunto solução padrão \vec{x}_{sp} obtido para $k_\omega = 10^{-7}$ e ainda o mesmo cálculo utilizando outro conjunto solução \vec{x}_{sk} gerado a partir do k -ésimo conjunto de parâmetros que está sendo testado. A diferença entre os autovalores encontrados nos dois casos, deve mostrar a sensibilidade do método à escolha do

conjunto solução padrão. Como o interesse é investigar se há ou não estabilidade, a análise do maior multiplicador de Floquet é suficiente para afirmar se houve erro na análise da estabilidade.

A Figura 4.5(a) mostra o máximo multiplicador de Floquet utilizando os conjuntos \vec{x}_{sp} e \vec{x}_{sk} calculados para cada conjunto K_k de parâmetros. A Figura 4.5(b) mostra a diferença entre o maior autovalor encontrado pelos dois testes ao longo da variação do parâmetro k_ω .

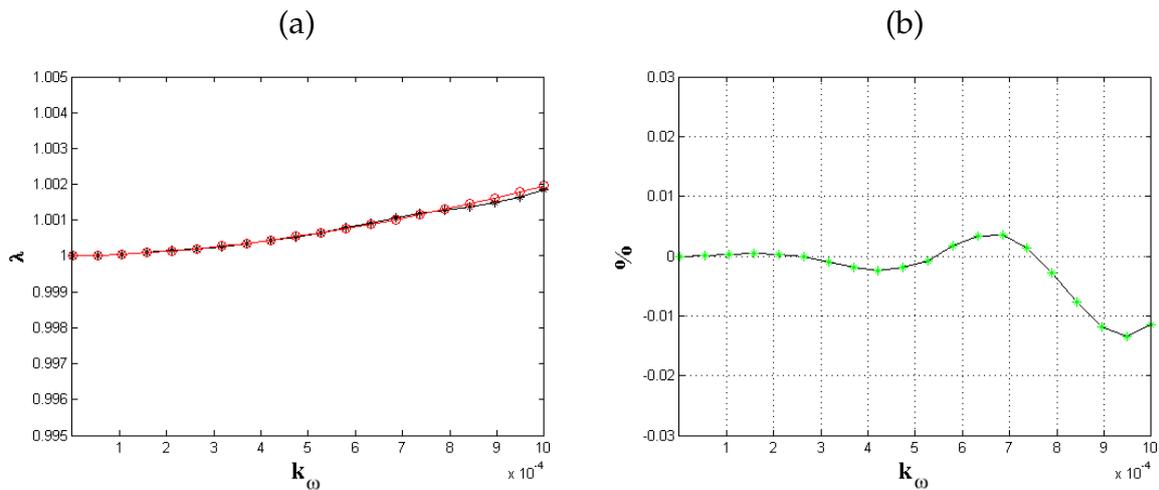


Figura 4.5: Módulo do maior dos multiplicador de Floquet com UPS idênticas analisando a sensibilidade do método ao parâmetro k_u e k_ω .

O mesmo teste foi feito analisando essa sensibilidade para o caso não idêntico em que se utilizou os parâmetros da Tabela 4.1 e a mesma variação de k_ω . A Figura 4.6 mostra o erro ao longo da variação do parâmetro k_w para o caso não idêntico.

Observa-se que para a faixa de variação utilizada o erro manteve-se menor que 0,02% para o caso de UPS idênticas e menor que 0,06% para o caso de UPS não idênticas.

Tabela 4.2: Valores dos parâmetros utilizados nas simulações para os testes de estabilidade.

Parâmetros	Símbolo	Valores
Indutor de acoplamento da UPS 1	L_{a1}	300 μ H
Indutor de acoplamento da UPS 2	L_{a2}	300 μ H
Resistor de acoplamento da UPS 1	R_{a1}	50 m Ω
Resistor de acoplamento da UPS 2	R_{a2}	50 m Ω
Carga resistiva	R_c	4 Ω
Frequência de corte do filtro PB	ω_f	6 π rad/s
Constante de suavização	k	5 $\times 10^{-5}$
Referência da frequência	ω_{or}	2 $\times 60\pi$ rad/s
Referência da tensão	u_{or}	180 V

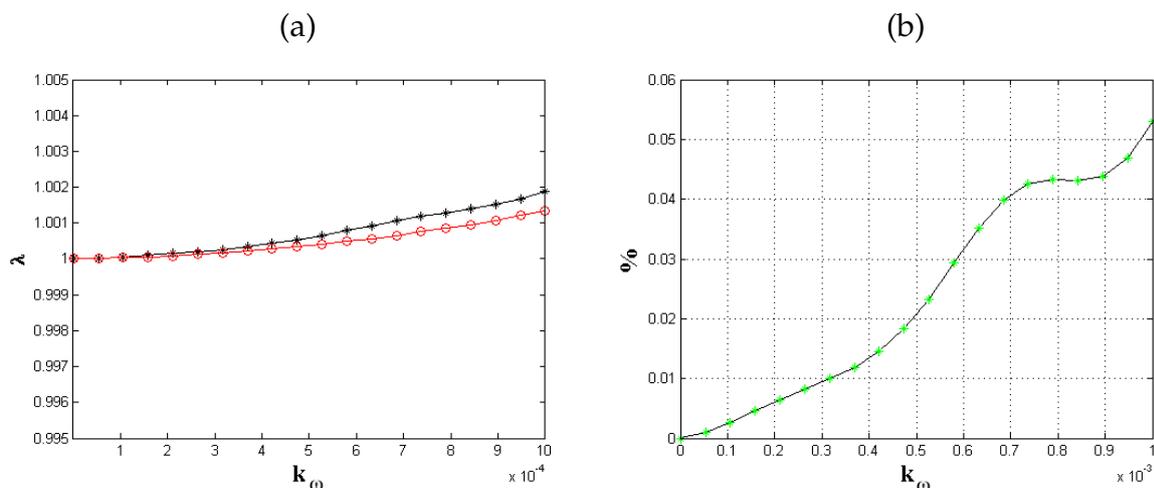


Figura 4.6: Módulo do maior dos multiplicador de Floquet com UPS idênticas analisando a sensibilidade do método ao parâmetro k_u e k_ω para o caso não idêntico.

Foi feita também a análise para a sensibilidade em relação ao indutor de acoplamento variando o valor médio L_a entre $3 \times 10^{-5}H$ até $3 \times 10^{-3}H$ para o caso idêntico, $L_{a1} = 0,9 \times L_a$ e $L_{a2} = 1,1 \times L_a$ para o caso não idêntico e fixado o valor de $k_\omega = 10^{-7}$ para ambos os casos. A Figura 4.7 mostra o máximo multiplicador de Floquet para o caso idêntico. Para para o caso não idêntico o resultado é mostrado na Figura 4.8.

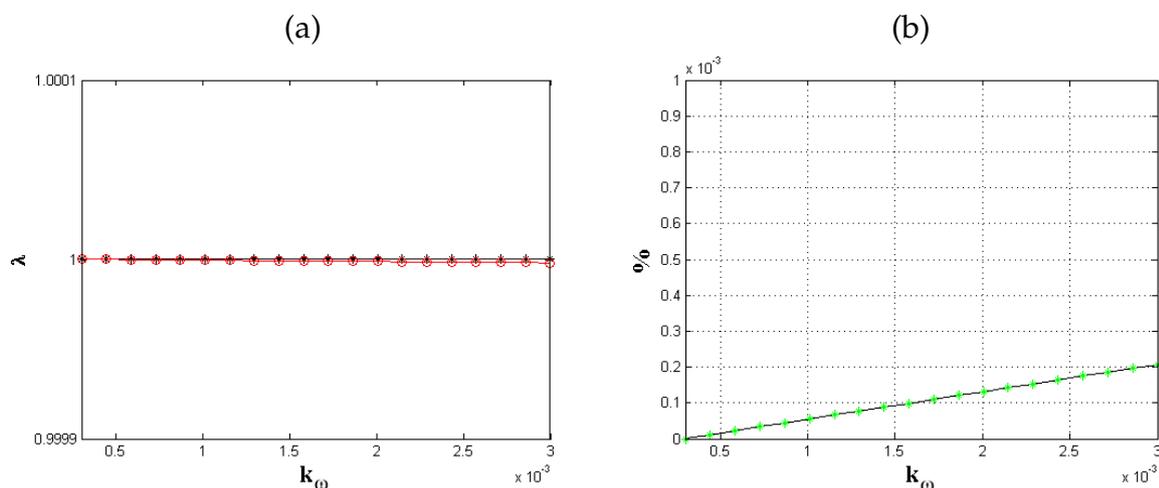


Figura 4.7: Módulo do maior dos multiplicador de Floquet com UPS idênticas analisando a sensibilidade do método ao parâmetro L_a para o caso idêntico.

Como no caso anterior, a diferença entre os autovalores foi pequena, ficando abaixo de 0,2% para os dois casos.

Esse resultado mostra que a escolha de uma solução síncrona padrão para o cálculo dos multiplicadores de Floquet não compromete a análise para um outro conjunto

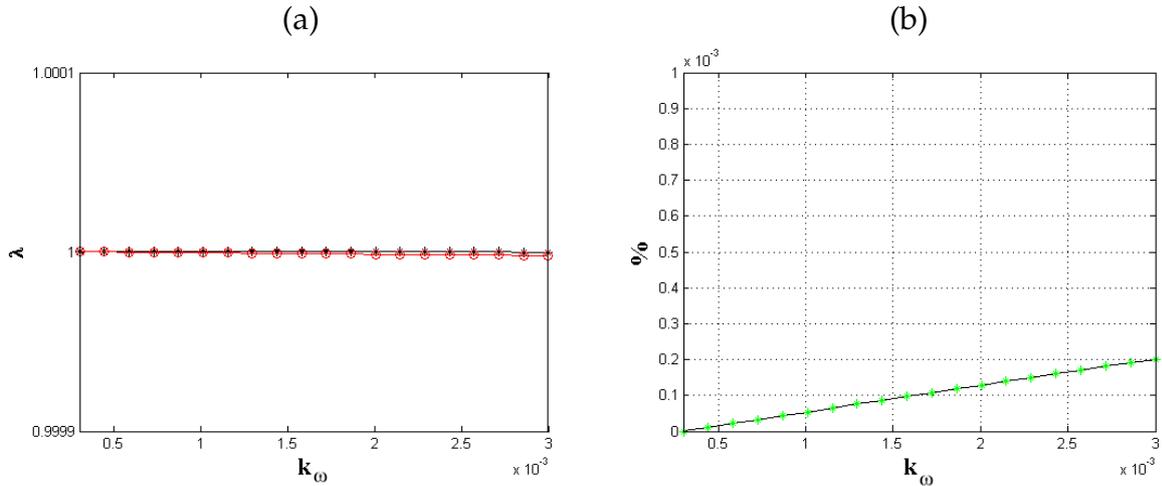


Figura 4.8: Módulo do maior dos multiplicador de Floquet com UPS idênticas analisando a sensibilidade do método ao parâmetro L_a para o caso não idêntico.

de parâmetros próximos àqueles que geraram tal solução síncrona. O resultado ainda potencializa a técnica, pois, a partir de um único conjunto solução padrão \vec{x}_{sp} conhecidamente estável é possível analisar a estabilidade para sistemas não idênticos em vários outros cenários.

4.5.3 Definição dos limites de estabilidade

Definida a solução síncrona \vec{x}_{sp} , foram feitos dois testes para avaliar a sensibilidade da estabilidade do sistema à variação de dois parâmetros: o indutor de acoplamento L_a e a inclinação da curva de decaimento k_u .

A sensibilidade da estabilidade do sistema em relação à variação das constantes k_u e k_ω pode ser vista na Figura 4.9.

Foi feita a simulação fixando o valor de $k_u = k_\omega = 10^{-5}$ e variado o valor nominal do indutor para 2 UPS não idênticas apenas nesse parâmetro, sendo que os limites eram:

$$L_{an} = [3 \times 10^{-5} : 3 \times 10^{-3}],$$

$$L_{a1} = 0.9 \times L_{an},$$

$$L_{a2} = 1.1 \times L_{an}.$$

O gráfico da Figura 4.10 mostra o módulo do maior multiplicador de Floquet em relação ao valor nominal do indutor de acoplamento.

Os limites de k_ω variam de acordo com L_a e vice-versa. Assim foi traçada uma curva que determina a região de estabilidade considerando esses parâmetros.

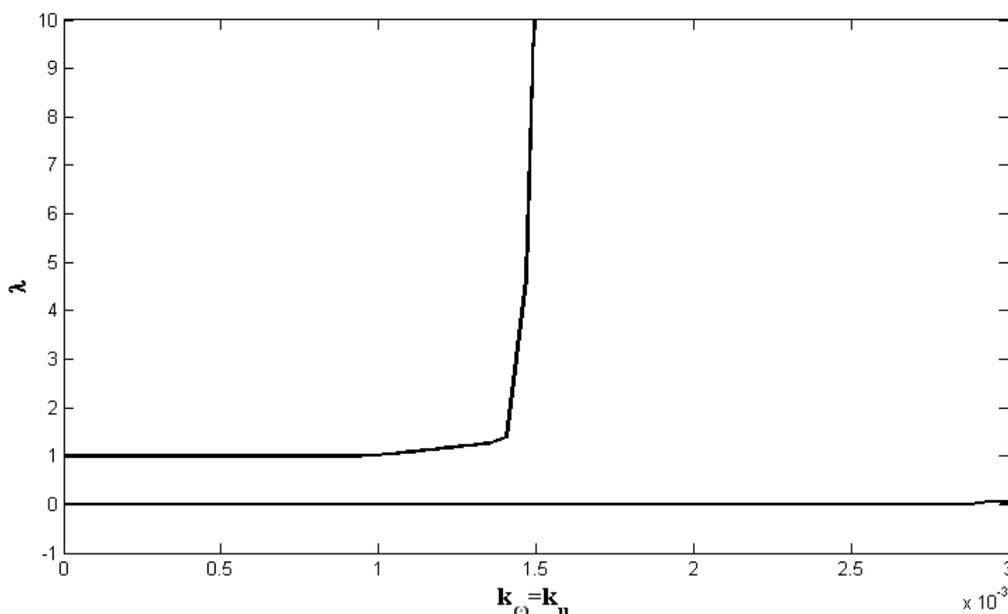


Figura 4.9: Maior e menor multiplicador de Floquet em função das constantes k_u e k_ω .

A estabilidade do erro de sincronização está delimitada pela curva mostrada na Figura 4.11. Contudo alguns pontos abaixo da curva ainda apresentam convergência do erro. Isso se deve ao fato de o método analisar uma situação periódica e estudos numéricos mostram que o erro pode convergir para um valor limitado não periódico (Oliveira et al., 2011). Assim, quando o erro do sistema perde a periodicidade o método de análise por multiplicadores de Floquet pode acusar instabilidade.

4.6 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se uma revisão das técnicas de análise de estabilidade local para paralelismo de sistemas UPS. Foram apresentadas duas técnicas, quais sejam, o método de pequenos sinais e a análise por multiplicadores de Floquet.

Uma importante vantagem do uso da teoria de Floquet consiste na possibilidade da obtenção de resultados sobre a estabilidade da condição de sincronismo por meio de análises semi-numéricas.

A técnica de análise de estabilidade por meio de multiplicadores de Floquet foi aplicada ao caso de UPS não idênticas e verificado os limites de estabilidade e a sensibilidade do sistema em relação a discrepância dos valores dos indutores e do número de UPS conetadas.

A técnica foi aplicada ao modelo proposto por Furtado (2009) por motivo de comparação, uma vez que esse modelo foi testado por essa técnica.

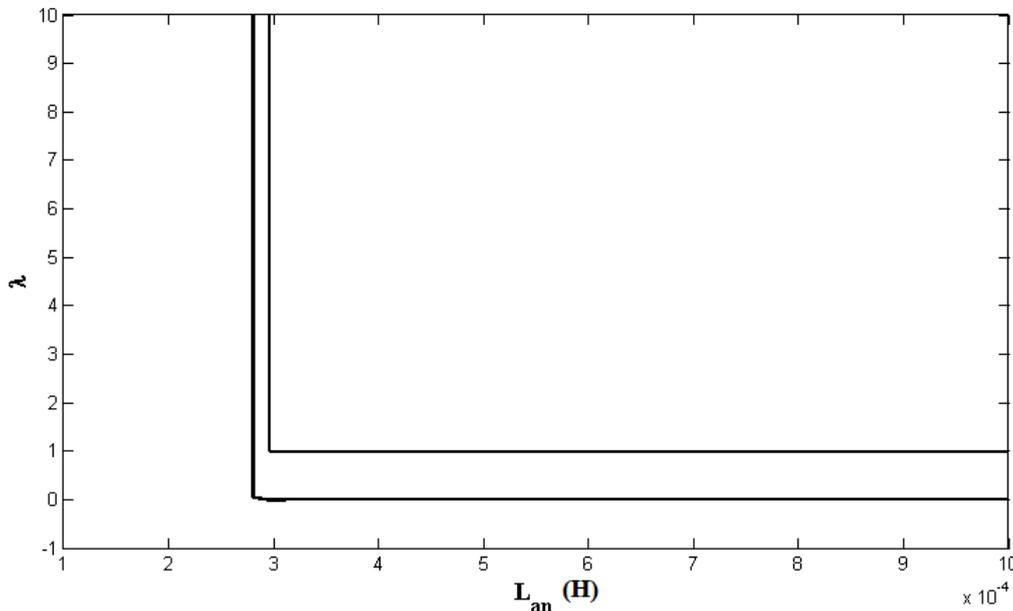


Figura 4.10: Maior e menor multiplicador de Floquet em função do valor nominal do indutor.

Neste capítulo também foi feito um estudo sobre a possibilidade do uso de uma solução síncrona padrão para o cálculo dos multiplicadores de Floquet. Os resultados numéricos apontaram que a escolha desta solução síncrona padrão utilizada nos cálculos parece não influenciar no cálculo dos autovalores de um mesmo sistema. Isso potencializa o uso da técnica uma vez que a partir de um único conjunto solução de um sistema é possível calcular os multiplicadores de Floquet desse mesmo sistema para diversos cenários de parâmetros. Contudo, seria necessária uma fundamentação matemática mais precisa para provar os resultados que foram evidenciados numericamente.

Foram encontradas regiões de estabilidade do sistema para várias faixas de parâmetros, que podem ser úteis no projeto de paralelismo de UPS.

Foi evidenciado ainda que a técnica apresenta como instáveis soluções em que o erro não é periódico. Isso se deve ao fato de a teoria de Floquet ser válida somente para sistemas variantes no tempo e periódicos. Alguns resultados mostraram que o sistema pode apresentar solução aperiódica ou até caótica para o modelo do erro linearizado.

Por fim, notou-se que a divergência paramétrica parece não alterar significativamente a estabilidade em relação ao caso idêntico, considerando as faixas de assimetria consideradas, o que aponta para a robustez do método de sincronismo.

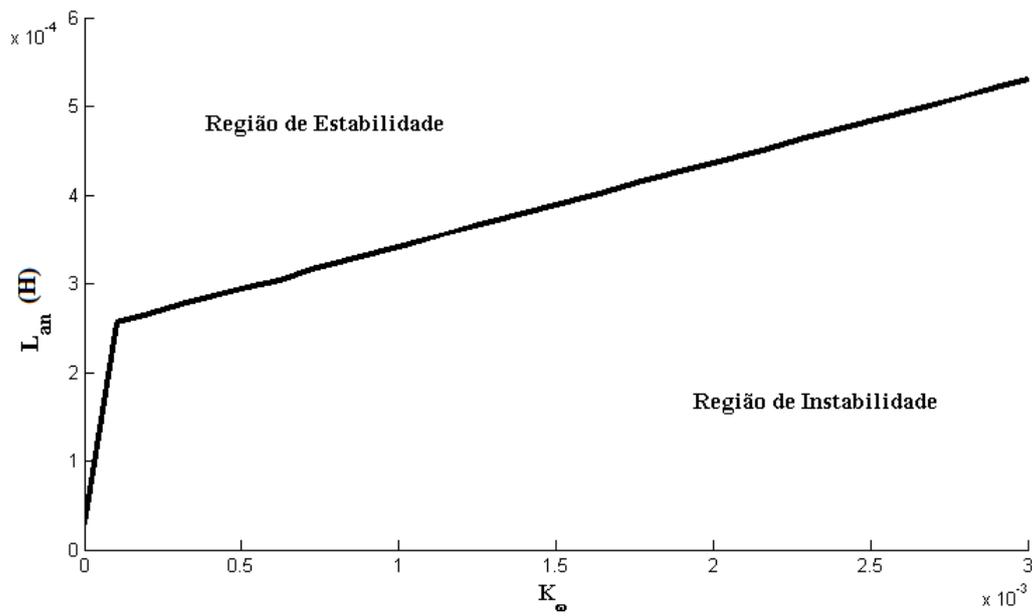


Figura 4.11: Curva que determina a região de estabilidade baseado em k_u e k_{ω} e L_a .

Conclusões

“Até aqui nos ajudou o SENHOR.”

1 Samuel 7:12

5.1 Conclusões Gerais

No presente trabalho foi investigado o problema do paralelismo de múltiplos osciladores acoplados por meio de um barramento alimentando uma carga linear resistiva.

O paralelismo de fontes do tipo UPS é muito útil para melhorar a qualidade de energia elétrica fornecida a uma carga, seja como fonte primária ou de segurança. Além disso, o paralelismo de geradores eletrônicos contribui para a aplicação em geração distribuída.

Investigou-se o paralelismo de UPS sem comunicação direta entre as unidades, utilizando o método *Droop*. Procurou-se relacionar este problema com a teoria de sincronismo de sistemas dinâmicos baseado no trabalho de Furtado (2009), assumindo que as unidades apresentam diferenças paramétricas.

Esse problema se insere em temas atuais da engenharia e envolve conceitos clássicos e modernos das suas mais diversas áreas, tais como: teoria de controle e eletrônica de potência. Ademais, a riqueza desse problema permite o aproveitamento das técnicas existentes e a utilização de diversas ferramentas encontradas na literatura.

Embora o tema seja do interesse de diversos pesquisadores e tenha sido objeto de estudo em inúmeros trabalhos, são poucos os que tratam do caso não idêntico. Outrossim, em última análise, as UPS são sempre não idênticas num caso real, porquanto pequenas diferenças paramétricas são inerentes num processo de fabricação.

Nesse sentido este trabalho dedicou-se em investigar numericamente o caso do paralelismo de osciladores senoidais não idênticos.

Fez-se uma breve revisão sobre o funcionamento de sistemas UPS, sua estrutura básica e o esquema geral do paralelismo sem comunicação baseado no fluxo de potência.

Descreveu-se as equações do método *Droop* e algumas técnicas de estimação das potências ativa e reativa foram definidos dois modelos baseados no método *Droop* e com estratégias distintas de estimação das potências. O Modelo I foi descrito no trabalho de Coelho e o Modelo II proposto por Furtado (2009).

No Capítulo 3 estes modelos foram comparados quanto a robustez a incerteza paramétrica associada ao parâmetro da impedância de acoplamento.

Realizou-se simulações Monte Carlo do sincronismo do sistema, variando-se os parâmetros construtivos do mesmo de forma aleatória dentro de uma faixa com distribuição gaussiana e média em torno do valor nominal de cada componente.

Foram definidas métricas que possibilitem a avaliação deste e de outros métodos, a fim de se analisar baseado em várias características buscando os objetivos de maior interesse, qual seja o fornecimento de energia de qualidade à carga.

Os controladores adotados são robustos à variações paramétricas inerentes aos componentes comerciais comumente utilizados na fabricação de UPS.

O Modelo I é mais robusto a essa imprecisão possivelmente por considerar outros termos das componentes da potência na estratégia de controle, negligenciados pelo Método II. Contudo, dentro dos valores testados o Método II ainda se mostrou satisfatório segundo os critérios apresentados.

No Capítulo 4 apresentou-se uma revisão das técnicas de análise de estabilidade local para paralelismo de sistemas UPS, sendo descrita com maiores detalhes o método de análise por multiplicadores de Floquet.

Foi proposta uma adaptação para esta técnica. Consiste em utilizar uma solução síncrona padrão para o cálculo dos multiplicadores de Floquet. Os resultados numéricos apontaram que é possível a escolha de um único conjunto solução de um sistema para o cálculo dos multiplicadores de Floquet desse mesmo sistema para diversos cenários de parâmetros. Contudo, faz-se necessária uma fundamentação matemática mais elaborada para provar os resultados que foram evidenciados apenas numericamente.

A análise de estabilidade por multiplicador de Floquet se mostrou muito útil também para o caso não idêntico. Foram encontradas regiões de estabilidade do sistema para várias faixas de parâmetros, que podem ser úteis no projeto de paralelismo de UPS. A divergência paramétrica parece não alterar significativamente a estabilidade em relação ao caso idêntico, considerando as faixas de assimetria consideradas.

Em alguns casos a técnica de análise de Floquet acusa instabilidade em soluções cujo erro não é periódico. Isso se deve ao fato de a teoria de Floquet ser válida somente para sistemas variantes no tempo e periódicos. Contudo, é comum no sincronismo de osciladores que os sistemas apresentem solução aperiódica ou até caótica para o modelo do erro linearizado. Com esse resultado é possível dizer que a análise utilizando multiplicadores de Floquet é inexata quando o erro do sistema é aperiódico ou caótico. Contudo, caso o sistema seja instável ou estável com erro periódico o método tem

exatidão.

5.2 Contribuições

Os principais contribuições deste trabalho são:

- Estudo sobre o paralelismo de UPS sem comunicação para o caso não idêntico. Os modelos adotados neste trabalho foram reescritos para o caso não idêntico.
- Foram definidas métricas para a avaliação da qualidade de sincronismo alcançado, baseando-se nos critérios de qualidade de energia elétrica.
- Comparação de duas técnicas de controle do paralelismo por meio de simulação Monte Carlo, avaliando qual é a mais robusta à diferenças paramétricas inerentes de sistemas reais. Acredita-se que este estudo aponta algumas considerações para o projeto de paralelismo de UPS reais.
- Fez-se uma revisão de métodos de análise de estabilidade. Fez-se um estudo que parece ser inédito: o estudo da estabilidade utilizando multiplicadores de Floquet para o caso não idêntico. Os resultados alcançados se aproximam do caso idêntico descritos por Furtado (2009).
- A técnica de análise utilizando multiplicadores de Floquet foi revisada e analisou-se numericamente a influência da escolha de um solução síncrona padrão.
- Foram apontados alguns problemas numéricos decorrentes da técnica de análise descrita. O método apontava instabilidade em situações em que o sistema era estável.

5.3 Trabalhos Futuros

A partir deste trabalhos algumas questões foram levantadas ou não investigadas. Propõem-se como trabalhos futuros:

- Análise de UPS alimentando cargas não lineares. Pode-se testar os novos limites de estabilidade para o caso de cargas não lineares. Vale ressaltar que neste caso os métodos devem incluir as componentes de distorção harmônicas no cálculo das potências.
- Estudar novas formas de calcular as potências para o caso monofásico. Por ser um ponto central no controle sem comunicação, uma revisão mais aprofundada sobre métodos modernos de estimação de potências e a proposição de novos métodos, podem ser promissores na melhoria dos métodos apresentados.

- Propor um novo método de determinação das curvas de decaimento baseado em otimização. Pode-se buscar a otimização de acordo com as impedâncias de conexão ou carga. Ou ainda, tentar determinar as constantes relacionando-as não apenas à potência máxima de cada fonte mas ao custo de geração, otimizando o custo total da produção de energia de uma rede.
- Uso da técnica descrita Peruzzi (2005) para determinação da solução síncrona, em que é feita uma expansão polinomial de *Chebyshev* para aproximar o termo periódico, e o método iterativo de *Picard* para aproximar a matriz de transição de estados.
- Investigação criteriosa dos problemas numéricos decorrente da técnica de análise de Floquet. Pode-se investigar outros problemas relacionados a essa técnica e forma de contorná-los.
- Utilização de um método baseado em continuação para determinação do diagrama de bifurcação, como possível melhoria na qualidade dos resultados numéricos para a determinação da estabilidade dos comportamentos periódicos.

Referências Bibliográficas

- Aguirre, L., Furtado, E., e Tôrres, L. (2006). Evaluation of dynamical models: Dissipative synchronization and other techniques. *Physical Review E*, 74(6):1–16.
- Andrade, B. G. (2005). *Contribuição ao Controle e Paralelismo de UPS*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- ANEEL (2010). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica.
- Begovic, M., Djuric, P., Dunlap, S., e a.G. Phadke (1993). Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8(2):480–486.
- Boccaletti, S., Kurths, J., Osipov, G., Valladares, D. L., e Zhou, C. S. (2002). The synchronization of chaotic systems. *Physics*, 366:1–101.
- Brown, R. e Rulkov, N. F. (1997). Synchronization of chaotic systems: Transverse stability of trajectories in invariant manifolds. *Chaos (Woodbury, N.Y.)*, 7(3):395–413.
- Chandorkar, M. e Divan, D. M. (1996). Decentralized operation of distributed UPS systems. *Proceedings of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, 1:565–571.
- Cheng, Y. J., Kian, E., e Sng, K. (2006). A Novel Communication Strategy for Decentralized Control of Paralleled Multi-Inverter Systems. *Power*, 21(1):148–156.
- Coelho, E. A. A. (2000). *Técnicas de Controle Aplicadas ao Paralelismo de Inversores*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Duric, M. B. e Durisic, Z. R. (2005). Frequency measurement in power networks in the presence of harmonics using fourier and zero crossing technique. *IEEE Russia Power Tech*, 1(2):1–6.
- Ferreira, R. J., Araújo, R. E., Lopes, J. A. P., e Member, S. (2011). A Comparative Analysis and Implementation of Various PLL Techniques Applied to Single-phase Grids. *Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*, p 1–8.

- Freitas, U. S., Macau, E. E. N., e Grebogi, C. (2005). Using geometric control and chaotic synchronization to estimate an unknown model parameter. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 71(4):047203.1–047203.4.
- Furtado, E. C. (2004). *Validação via Sincronismo de Modelos Identificados: Aplicação à Estrutura NARMAX*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Furtado, E. C. (2009). *Estudo do Sincronismo de Múltiplos Osciladores Acoplados: Aplicação ao Paralelismo de UPS*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Gans, M. J. (1965). A General of Floquet's Proof Theorem. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*.
- Guerrero, J., Berbel, N., Garcia de Vicuna, L., Matas, J., Miret, J., e Castilla, M. (2006). Droop Control Method for the Parallel Operation of Online Uninterruptible Power Systems using Resistive Output Impedance. In *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06.*, p 1716–1722. IEEE.
- Guerrero, J. M., Member, S., Hang, L., e Uceda, J. (2008). Control of Distributed Uninterruptible Power Supply Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(8):2845–2859.
- Guerrero, J. M., Member, S., Vásquez, J. C., Matas, J., Castilla, M., e Vicuña, L. G. D. (2009). Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(3):726–736.
- Holtz, J. e Werner, K.-h. (1988). A High-Power Multitransistor-Inverter Unintermptable Power Supply System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, (3).
- Martins, A., Carvalho, A., e Araujo, A. (1995). Design and implementation of a current controller for the parallel operation of standard UPSs. In *Proceedings of IECON '95 - 21st Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, volume 1, p 584–589. IEEE.
- Mesquita, A. J. N. (2007). *Análise da Estabilidade de Sistemas Dinâmicos Periódicos Usando a Teoria de Sinha*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista - UNESP.
- Monteiro, L. H. A. (2002). *Sistemas dinâmicos*. Editora Livraria da Física.
- Monteiro, L. H. A., Garcia, P. A., e Piqueira, J. R. C. (2003). Sincronismo em redes mestre-escravo com atraso. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática*, 14(2):121–126.
- Oliveira, E. S., Aguirre, L. A., e Tôrres, L. A. B. (2011). Análise Numérica do Estado Síncrono de Dois Osciladores Senoidais Acoplados. *DINCON 2011 - Conferência Brasileira de Dinâmica Controle e Aplicações*.
- Pecora, L. M. e Carroll, T. L. (1990). Synchronization in Chaotic Systems. *Phys Rev Lett*, p 821–825.

- Peruzzi, N. J. (2005). *Dinâmica Não Linear e Controle de Sistemas Não Ideais e Periódicos*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas.
- Pikovsky, A., Rosenblum, M., e Kurths, J. (2003). *Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences*, volume 12 of *Cambridge Nonlinear Science Series*. Cambridge University Press.
- Pradhan, A. K., Routray, A., e Basak, A. (2005). Power system frequency estimation using least mean square technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(3):1812–1816.
- Quintero, J. C. V. (2009). *Decentralized Control Techniques Applied to Electric Power Distributed Generation in Microgrids*. Tese de Doutorado, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Rosenblum, M., Pikovsky, A., e Kurths, J. (1997). From Phase to Lag Synchronization in Coupled Chaotic Oscillators. *Physical Review Letters*, 78(22):4193–4196.
- Santos Filho, R. M. (2009). *Contribuição ao Controle Digital do Paralelismo sem Comunicação de Sistemas de Energia Ininterrupta*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Sato, E., Kawamura, A., e Fujii, R. (2003). Theoretical and experimental verification of independent control for parallel-connected multi-UPSs. *Telecommunications Energy Conference 2003 INTELEC03 The 25th International*, p 485–492.
- Tôrres, L. A. B. (2001). *Controle e Sincronismo de Osciladores Caóticos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Tuladhar, A., Jin, H., Unger, T., e Mauch, K. (1997). Parallel Operation of Single Phase Inverter Modules With No Control Interconnections. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1997. APEC'97 Conference Proceedings 1997. Twelfth Annual*, p 94–100.
- Wu, T.-f., Member, S., Chen, Y.-k., e Huang, Y.-h. (2000). 3C Strategy for Inverters in Parallel Operation Achieving an Equal Current Distribution. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(2):273–281.
- Xinchun, L., Feng, F., Shanxu, D., Young, K., e Jian, C. (2003). Modeling and Stability Analysis for Two Paralleled UPS with no Control Interconnection. *Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International*.
- Yang, R. e Xue, H. (2008). A novel algorithm for accurate frequency measurement using transformed consecutive points of DFT. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(3):1057–1062.

