

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JULIANA CUNHA NEVES

**CONTROLE ADAPTATIVO APLICADO A UM SISTEMA DE GERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA BASEADO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE SIMPLES  
ESTÁGIO INTEGRADO A UM CONDICIONADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA  
MONOFÁSICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2020

JULIANA CUNHA NEVES

**CONTROLE ADAPTATIVO APLICADO A UM SISTEMA DE GERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA BASEADO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE SIMPLES  
ESTÁGIO INTEGRADO A UM CONDICIONADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA  
MONOFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Augusto Oliveira da Silva.

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2020



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Elétrica**



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Juliana Cunha Neves**

**CONTROLE ADAPTATIVO APLICADO A UM SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA BASEADO EM  
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE SIMPLES ESTÁGIO INTEGRADO A UM CONDICIONADOR DE  
QUALIDADE DE ENERGIA MONOFÁSICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 09:00hs do dia 24/09/2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Sergio Augusto Oliveira da Silva - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Leonardo Poltronieri Sampaio - (Membro)

---

Prof(a). Vinicius Dario Bacon - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Dedico este trabalho aos meus pais Léo e Aparecida e ao meu irmão Antônio.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus, que sempre foi meu apoio em todas as situações.

Aos meus pais, Léo e Aparecida, agradeço pelo amor imensurável, por acreditarem em mim e não medirem esforços para garantir que pudesse estar passando por este momento.

Ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Augusto Oliveira da Silva pelo ensinamento, dedicação, paciência, motivação e conversas ao longo desta jornada. Obrigada por acreditar e confiar em mim!

Ao Prof. Dr. Leonardo Poltronieri Sampaio e ao Prof. Dr. Vinicius Bacon pelas contribuições deste trabalho.

Aos docentes do curso de Engenharia Elétrica da UTFPR-CP por fornecerem suporte e conhecimento durante este período.

Ao grupo de pesquisa do LEPQER pelos auxílios, explicações e ideias, em especial a Ma. Rafaela Dizaró Silveira e Me. Vinicius de Souza.

Ao meu irmão, Antônio, por ser minha grande inspiração, por me ensinar desde cedo a lidar com conflitos e opiniões diferentes, por acreditar nos meus sonhos e viabilizá-los.

Ao meu grande amigo Allan, que mesmo de longe se fez presente, obrigada por tudo.

E por fim, um agradecimento especial aos meus amigos: João Paulo e Giovana por serem tudo que eu precisei, por me acolherem em todos os momentos, por serem minha família em Cornélio Procópio e em qualquer lugar do mundo. Obrigada por isso e por tudo que ainda vamos viver!

“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez”. (George Bernard Shaw)

## RESUMO

NEVES, Juliana Cunha. **Controle adaptativo aplicado a um sistema de geração distribuída baseado em sistemas fotovoltaicos de simples estágio integrado a um condicionador de qualidade de energia monofásico.** 2020. 110f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

Este trabalho apresenta o estudo, análise e aplicação de controlador adaptativo aplicado no controle a um sistema de geração distribuída (do Inglês – *DG – Distributed Generation*) fotovoltaico (do Inglês – *PV – Photovoltaic*) de simples estágio operando integrado a um condicionador de qualidade de energia (do Inglês – *UPQC – Unified Power Quality Conditioner*) monofásico. A integração da DG com o UPQC se justifica pois, ao mesmo tempo que a energia produzida pelo sistema PV é injetada na rede, o condicionamento ativo de energia é realizado pelo UPQC, ou seja, o sistema integrado melhora indicadores de qualidade de energia pois drena da rede corrente senoidal e em fase com a tensão, bem como alimenta cargas locais com tensão senoidal e regulada. O controlador adaptativo é utilizado no controle de tensão do barramento CC e controlador de corrente do UPQC considerando que este opera com estratégias distintas de compensação de energia, ou seja, com uma estratégia convencional (C) de compensação dual (D). O controlador adaptativo baseado no Modelo de Referência de Controle Adaptativo atua de forma a comparar a dinâmica do modelo com a dinâmica do processo, a diferença entre estas componentes é o erro que deve ser minimizado de acordo com o mecanismo de ajuste, de maneira a obter os melhores ganhos para que a saída do processo do sistema seja mais próxima com a saída do modelo. Resultados de simulações são apresentados para avaliação comparativa dos desempenhos estáticos e dinâmicos dos sistemas PV-C-UPQC e PV-D-UPQC operando com controladores adaptativos e controladores clássicos proporcional-integral, quando os sistemas em estudo são submetidos a variações de irradiação, bem como de cargas locais.

**Palavras-chave:** Controle Adaptativo. Sistema Integrado PV-UPQC. Qualidade de Energia Elétrica. Estratégias de Compensação de Energia. Sistemas Fotovoltaicos.

## ABSTRACT

NEVES, Juliana Cunha. **Adaptive control applied to a distributed generation system based on single-stage photovoltaic systems integrated with a single-phase universal power quality conditioner.** 2020. 110f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

This work presents the study, analysis and application of adaptive controllers applied in the control to a photovoltaic (PV) distributed generation (DG) system of simple stage of operating integrated to a quality conditioner of single-phase unified power quality conditioner (UPQC). The integration of the DG with the UPQC is justified because, at the same time that the energy produced by the PV system is injected into the network, the active energy conditioning is carried out by the UPQC, that is, the integrated system improves power quality indicators since it drains from the grid sinusoidal current in phase with the voltage grid, as well as supplying local loads with sinusoidal and regulated voltage. The adaptive controller is used in DC bus voltage control and UPQC current controller considering that it operates with different power compensation strategies, that is, with a conventional (C) dual (D) compensation strategy. The adaptive controller based on the Model Reference Adaptive Control acts in order to compare the model dynamics with the process dynamics, the difference between these components is the error that must be minimized according to the setting mechanism in order to obtain the best gains so that the process output of the system is closer to the model output. Simulation results are presented for evaluating comparing purposes of the static and dynamic performances of the PV-C-UPQC and PV-D-UPQC systems operating with the adaptive and the classical proportional-integral controller, when the systems under study are subjected to irradiation variations, as well as well as local loads.

**Keywords:** Adaptive Control. Integrated PV-UPQC System. Power Quality. Power Compensation Strategies. Photovoltaic Systems.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Histórico e previsão da energia fotovoltaica.....	18
Figura 2 - Célula Fotovoltaica.....	21
Figura 3 - Curvas característica do PV.....	22
Figura 4 - Curvas características considerando variações no PV. ....	22
Figura 5 - Configuração de duplo estágio. ....	23
Figura 6 - Configuração de único estágio.....	24
Figura 7 - Diagrama simplificado FAPS. ....	26
Figura 8 - Diagrama simplificado FAPP. ....	27
Figura 9 - Diagrama simplificado UPQC ....	27
Figura 10 - Diagrama em blocos do sistema PV-UPQ. ....	28
Figura 11 - Diagrama de blocos do sistema PV-C-UPQC.....	33
Figura 12 - Diagrama de blocos do sistema PV-D-UPQC.....	34
Figura 13 - Circuitos monofásicos do inversor <i>Full bridge</i> (filtro L) operando como fonte de corrente. ....	35
Figura 14 - Circuitos monofásicos do inversor <i>full bridge</i> (filtro LC) operando como fonte de tensão.....	37
Figura 15 - Diagrama de bloco da malha de corrente do conversor série em PV-D-UPQC.....	43
Figura 16 - Diagrama de bloco da malha de tensão do conversor paralelo em PV-D-UPQC.....	43
Figura 17 - Diagrama de bloco da malha de corrente do conversor paralelo em PV-C-UPQC.....	44
Figura 18 - Diagrama de bloco da malha de tensão do conversor série em PV-C-UPQC.....	45
Figura 19 - Diagrama de blocos do algoritmo SRF monofásico. ....	45
Figura 20 - Classificação de controladores usados em topologias PV.....	52
Figura 21 - Diagrama de blocos do MRAC.....	53
Figura 22 - Diagrama de blocos do controle adaptativo por modelo de referência aplicado neste trabalho. ....	53
Figura 23 - Diagrama de blocos do Modelo de Referência. ....	56
Figura 24 - Diagrama de blocos do Mecanismo Adaptativo. ....	57
Figura 25 - Arquitetura de blocos do controle adaptativo dos conversores que operam como fonte de corrente. ....	57
Figura 26 - Diagrama de blocos do Modelo de Referência do controle de corrente..	59
Figura 27 - Arquitetura de blocos do controle adaptativo da malha de tensão do barramento CC.....	61
Figura 28 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-C-UPQC clássico.....	64
Figura 29 - Tensão na rede elétrica $v_s$ , corrente da carga $i_L$ , tensão na carga $v_L$ , e corrente na rede elétrica $i_s$ do sistema PV-C-UPQC clássico.....	65
Figura 30 - Tensão no barramento CC do sistema PV-C-UPQC adaptativo.....	66

Figura 31 - Tensão na rede elétrica $v_s$ , corrente da carga $i_L$ , tensão na carga $v_L$ , e corrente na rede elétrica $i_s$ do sistema PV-C-UPQC adaptativo.....	66
Figura 32 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de corrente do conversor paralelo do sistema PV-C-UPQC adaptativo.....	67
Figura 33 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de tensão do barramento CC do sistema PV-C-UPQC adaptativo.....	67
Figura 34 - Tensão no barramento CC do sistema PV-D-UPQC clássico.....	68
Figura 35 - Tensão na rede elétrica $v_s$ , corrente da carga $i_L$ , tensão na carga $v_L$ , e corrente na rede elétrica $i_s$ do sistema PV-D-UPQC clássico.....	69
Figura 36 - Tensão no barramento CC do sistema PV-D-UPQC adaptativo.....	70
Figura 37 - Tensão na rede elétrica $v_s$ , corrente da carga $i_L$ , tensão na carga $v_L$ , e corrente na rede elétrica $i_s$ do sistema PV-D-UPQC adaptativo.....	70
Figura 38 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de corrente do conversor série do sistema PV-D-UPQC adaptativo.....	71
Figura 39 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de tensão do barramento CC do sistema PV-D-UPQC adaptativo.....	71
Figura 40 - Comportamento dinâmico da carga (100%-50%-100%).....	73
Figura 41 - Variação de irradiação (G) com T=25°C.....	73
Figura 42 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-C-UPQC clássico (MOP 1).....	74
Figura 43 - Comportamento dinâmico da rede elétrica ( $i_s$ ) para variação de carga em PV-C-UPQC clássico (MOP 1).....	75
Figura 44 - Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ) e tensão na carga ( $v_L$ ).....	75
Figura 45 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-C-UPQC adaptativo (MOP 1).....	76
Figura 46 - Comportamento dinâmico da rede elétrica para variação de carga em PV-C-UPQC adaptativo (MOP 1).....	77
Figura 47 - Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ) e tensão na carga ( $v_L$ ).....	77
Figura 48 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de corrente do conversor paralelo do sistema PV-C-UPQC adaptativo (MOP 1).....	78
Figura 49 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de tensão do barramento CC do sistema PV-C-UPQC adaptativo (MOP 1).....	78
Figura 50 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-D-UPQC clássico (MOP 1).....	80
Figura 51 - Comportamento dinâmico da rede elétrica ( $i_s$ ) para variação de carga em PV-D-UPQC clássico (MOP 1).....	80
Figura 52 - Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ) e tensão na carga ( $v_L$ ).....	81
Figura 53 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-D-UPQC clássico (MOP 1).....	82
Figura 54 - Comportamento dinâmico da rede elétrica ( $i_s$ ) para variação de carga em PV-D-UPQC clássico (MOP 1).....	82
Figura 55 - Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ) e tensão na carga ( $v_L$ ).....	83
Figura 56 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de corrente do conversor série do sistema PV-D-UPQC adaptativo (MOP 1).....	83

Figura 57 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de tensão do barramento CC do sistema PV-D-UPQC adaptativo (MOP 1).....	84
Figura 58 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-D-UPQC clássico (MOP 2)	85
Figura 59 - Comportamento dinâmico da rede elétrica ( <i>is</i> ) para variação de carga em PV-C-UPQC clássico (MOP 2).....	86
Figura 60 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-C-UPQC adaptativo (MOP 2). .....	87
Figura 61 - Comportamento dinâmico da rede elétrica ( <i>is</i> ) para variação de carga em PV-C-UPQC adaptativo (MOP 2).....	87
Figura 62 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de corrente do conversor paralelo do sistema PV-C-UPQC adaptativo (MOP 2).....	88
Figura 63 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de tensão do barramento CC do sistema PV-C-UPQC adaptativo (MOP 2).....	88
Figura 64 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-D-UPQC clássico (MOP 2).	89
Figura 65 - Comportamento dinâmico da rede elétrica ( <i>is</i> ) para variação de carga em PV-D-UPQC adaptativo (MOP2).....	90
Figura 66 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-D-UPQC adaptativo (MOP 2). .....	91
Figura 67 - Comportamento dinâmico da rede elétrica ( <i>is</i> ) para variação de carga em PV-D-UPQC adaptativo (MOP 2).....	92
Figura 68 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de corrente do conversor série do sistema PV-C-UPQC adaptativo (MOP 2).....	92
Figura 69 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de tensão do barramento CC do sistema PV-D-UPQC adaptativo(MOP 2).....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações de projeto dos controladores PI dos conversores que operam como fonte de corrente. ....	49
Tabela 2 - Ganhos dos controladores PI de corrente dos conversores que operam como fonte de corrente. ....	49
Tabela 3 - Especificações de projeto dos controladores PI dos conversores que operam como fonte de tensão. ....	50
Tabela 4 - Ganhos dos controladores PI de tensão dos conversores que operam como fonte de tensão. ....	50
Tabela 5 - Especificações de projeto do controlador PI da malha de tensão do barramento CC. ....	51
Tabela 6 - Ganhos dos controladores PI de corrente dos inversores. ....	51
Tabela 7 - Especificações de projeto dos controladores adaptativo dos conversores que operam como fonte de corrente. ....	58
Tabela 8 - Ganhos dos controladores adaptativos de corrente dos conversores que operam como fonte de corrente. ....	58
Tabela 9 - Especificações de projeto do controlador adaptativo da malha de tensão do barramento CC. ....	60
Tabela 10 - Ganhos dos controladores PI de corrente dos inversores. ....	60
Tabela 11 - Parâmetros das duas cargas simuladas. ....	62
Tabela 12 - Especificações de simulação da topologia PV-UPQC ....	63
Tabela 13 - Parâmetros do módulo solar Sunmodule SW 245 poly (STC°). ....	63
Tabela 14 - Distorção Harmônica Total na rede elétrica no sistema PV-C-UPQC. ....	68
Tabela 15 - Distorção Harmônica Total na carga no sistema PV-C-UPQC. ....	68
Tabela 16 - Distorção Harmônica Total na rede elétrica no sistema PV-D-UPQC. ....	72
Tabela 17 - Distorção Harmônica Total na carga no sistema PV-D-UPQC. ....	72
Tabela 18 - Distorção Harmônica Total na rede elétrica no sistema PV-C-UPQC (MOP 1). ....	79
Tabela 19 - Índices de desempenho dos controladores do sistema dinâmico PV-C-UPQC (MOP 1). ....	79
Tabela 20 - Distorção Harmônica Total na rede elétrica no sistema PV-D-UPQC (MOP 1). ....	84
Tabela 21 - Índices de desempenho dos controladores do sistema dinâmico PV-D-UPQC (MOP 1). ....	85
Tabela 22 - Distorção Harmônica Total na rede elétrica no sistema PV-C-UPQC (MOP 2). ....	89
Tabela 23 - Índices de desempenho dos controladores do sistema dinâmico PV-C-UPQC (MOP 2). ....	89
Tabela 24 - Distorção Harmônica Total na rede elétrica no sistema PV-D-UPQC (MOP 2). ....	93
Tabela 25 - Índices de desempenho dos controladores do sistema dinâmico PV-D-UPQC (MOP 2). ....	94

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
CSI	<i>Current Source Inverter</i>
DHT	Distorção Harmônica Total
DG	<i>Distributed Generation</i>
FAPS	Filtro Ativo de Potência Série
FAPP	Filtro Ativo de Potência Paralelo
FP	Fator de Potência
FPB	Filtro Passa-Baixa
IEA	<i>International Energy Agency</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MRAC	<i>Model reference Adaptive Control</i>
P&O	<i>Perturb and Observe</i>
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PLL	Phase-Locked Loop
PRODIST	Procedimentos de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PV	<i>Photovoltaic</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SRF	<i>Synchronous Reference Frame</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
UPQC	<i>Unified Power Quality Conditioner</i>
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>17</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO .....	17
1.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	20
1.2.1 Módulo Fotovoltaico.....	20
1.2.2 Estágios de Potência de Sistemas Fotovoltaicos.....	23
1.3 QUALIDADE DE ENERGIA E CONDICIONADORES ATIVOS DE POTÊNCIA .....	24
1.3.1 Qualidade de Energia Elétrica .....	24
1.3.1.1 Definições estabelecidas pela ANEEL.....	25
1.3.2 Condicionadores Ativo de Potência .....	25
1.3.3 Filtro Ativo de Potência Série.....	25
1.3.4 Filtro Ativo de Potência Paralelo.....	26
1.3.5 Condicionador de Qualidade de Energia Unificado .....	27
1.4 SISTEMA PV-UPQC .....	28
1.4.1 Topologia PV-UPQC.....	28
1.4.2 Princípio de Compensação Convencional do Sistema PV-C-UPQC .....	28
1.4.3 Princípio de Compensação Dual do Sistema PV-D-UPQC.....	29
1.5 PROPOSTA DO TRABALHO.....	29
1.6 OBJETIVOS .....	30
1.6.1 Objetivo Geral.....	30
1.6.2 Objetivos Específicos.....	30
1.7 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	31
<b>CAPÍTULO 2 – SISTEMAS PV-UPQC EM ESTUDO</b> .....	<b>32</b>
2.1 SISTEMA PV-C-UPQC .....	32
2.2 SISTEMA PV-D-UPQC .....	33
<b>CAPÍTULO 3 - MODELAGEM MATEMÁTICA</b> .....	<b>35</b>
3.1 MODELAGEM DOS CONVERSORES EM SÉRIE E PARALELO OPERANDO COMO FONTE DE CORRENTE.....	35
3.2 MODELAGEM DOS CONVERSORES EM SÉRIE E PARALELO OPERANDO COMO FONTE DE TENSÃO .....	36
3.3 MODELAGEM DA MALHA DE TENSÃO DO BARRAMENTO CC .....	38
<b>CAPÍTULO 4 – SISTEMA DE CONTROLE</b> .....	<b>42</b>
4.1 MALHA DE CONTROLE DE CORRENTE NO CONVERSOR SÉRIE EM PV-D-UPQC.....	42
4.2 MALHA DE CONTROLE DE TENSÃO NO CONVERSOR PARALELO EM PV-D-UPQC.....	43

4.3 MALHA DE CONTROLE DE CORRENTE NO CONVERSOR PARALELO EM PV-C-UPQC .....	44
4.4 MALHA DE CONTROLE DE TENSÃO NO CONVERSOR SÉRIE EM PV-C-UPQC.....	44
4.5 GERAÇÃO DAS REFERÊNCIAS DE CORRENTE .....	45
4.6 CONTROLE CLÁSSICO .....	46
4.6.1 Projetos dos Controladores Convencionais .....	47
4.6.2 Projeto dos controladores PI dos inversores operando como fonte de corrente.....	48
4.6.3 Projeto dos controladores PI dos inversores operando como fonte de tensão .....	49
4.6.4 Projeto do controlador PI da Malha de Tensão do Barramento CC .....	50
4.7 CONTROLE ADAPTATIVO .....	51
4.7.1 Controle Adaptativo por Modelo de Referência .....	52
4.7.2 Projeto dos Controladores Adaptativos.....	55
4.7.3 Projeto do controlador adaptativo dos conversores operando como fonte de corrente.....	57
4.7.4 Projeto do controlador adaptativo da Malha de Tensão do Barramento CC .....	59
<b>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>62</b>
5.1 COMPORTAMENTO ESTÁTICO DO SISTEMA PV-UPQC .....	63
5.1.2 Comportamento estático do sistema PV-C-UPQC com controle clássico .	64
5.1.3 Comportamento estático do sistema PV-C-UPQC com controle adaptativo .....	65
5.1.3 Resultados da DHT do sistema PV-C-UPQC .....	67
5.1.4 Comportamento estático do sistema PV-D-UPQC com controle clássico .	68
5.1.6 Resultados da DHT do sistema PV-D-UPQC .....	71
5.2 COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA PV-UPQC .....	72
5.2.1 Comportamento dinâmico do sistema PV-C-UPQC com controle clássico (Modo de Operação 1).....	74
5.2.2 Comportamento dinâmico do sistema PV-C-UPQC com controle adaptativo (Modo de Operação 1).....	75
5.2.3 Resultados da DHT do sistema PV-C-UPQC (Modo de Operação 1) .....	79
5.2.4 Comportamento dinâmico do sistema PV-D-UPQC com controle clássico (Modo de Operação 1).....	80
5.2.5 Comportamento dinâmico do sistema PV-D-UPQC com controle adaptativo (Modo de Operação 1).....	81
5.2.6 Resultados da DHT do sistema PV-D-UPQC (Modo de Operação 1) .....	84
5.2.7 Comportamento dinâmico do sistema PV-C-UPQC com controle clássico (Modo de Operação 2).....	85

5.2.8 Comportamento dinâmico do sistema PV-C-UPQC com controle adaptativo (Modo de Operação 2).....	86
5.2.9 Resultados da DHT do sistema PV-C-UPQC (Modo de Operação 2) .....	89
5.2.10 Comportamento dinâmico do sistema PV-D-UPQC com controle clássico (Modo de Operação 2).....	89
5.2.11 Comportamento dinâmico do sistema PV-D-UPQC com controle adaptativo (Modo de Operação 2) .....	91
5.2.12 Resultados da DHT do sistema PV-D-UPQC (Modo de Operação 2) .....	93
5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CONTROLES CLÁSSICO E ADAPTATIVO .	94
5.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	95
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO .....</b>	<b>96</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICE A – Modelo Equivalente da Célula Fotovoltaica .....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE B – Técnica de Seguimento do Ponto de Máxima Potência P&amp;O .....</b>	<b>106</b>
<b>ANEXO A – Módulo 8 – PRODIST .....</b>	<b>107</b>



## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

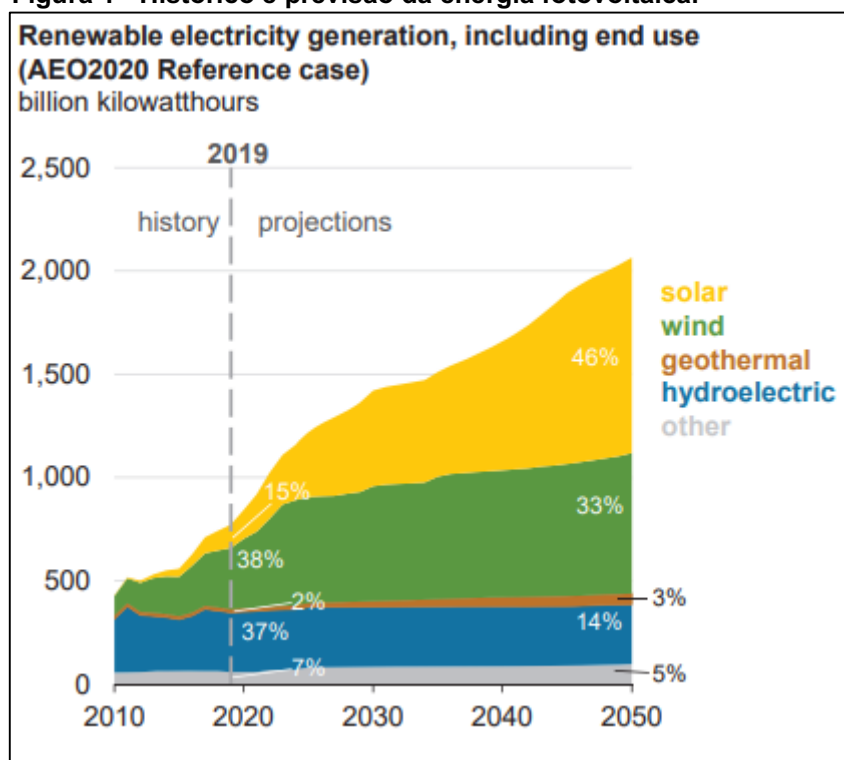
### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

O rápido crescimento populacional e a busca por qualidade de vida, tem como resultado o acentuado aumento da demanda energética. A agência americana EIA (IEA - *International Energy Agency*) aponta que entre 2018 e 2050 o consumo mundial de eletricidade aumentará em 79%. Atualmente, as fontes de energia tradicionais compõem 67% da matriz energética. Tais fontes são provenientes de processos que utilizam combustíveis fósseis e minerais, energia nuclear e outros. Cada uma tem seu respectivo impacto ambiental, que agrava o cenário de um possível colapso do ecossistema, devido ao aumento da poluição e o reflexo nas mudanças climáticas (EIA, 2019).

Diante deste cenário, uma das soluções ao fomento do planejamento energético em conjunto com a questão de preservação ambiental é a introdução de fontes de energia renováveis. Essas fontes de energia alternativas, conhecidas como Sistemas de Geração Distribuída (GD) tem agregado possíveis soluções atuais para o planejamento de sistemas elétricos, tais como diversificação da matriz energética, redução dos impactos ambientais e avanço tecnológico.

A energia solar fotovoltaica se apresenta como uma vantajosa opção de fonte alternativa para suprir a atual necessidade do cenário energético mundial, uma vez que é considerada uma fonte de energia limpa e, mesmo em operação, de impacto ambiental quase inexistente (FTENAKISV et. al., 2008; BRITO, 2011; KEMERICH et al., 2016). Além disso, possibilita a geração de energia de forma distribuída, dispensando o uso de extensas linhas de transmissão e distribuição. A Figura 1 mostra um gráfico com o histórico e as perspectivas da capacidade de geração da energia fotovoltaica em relação as outras fontes de energia renováveis para os próximos anos segundo a IEA. É possível notar a forte tendência ao uso da mesma.

Figura 1 - Histórico e previsão da energia fotovoltaica.



Fonte: IEA (2020).

Nesta tendência, o Brasil firmou o compromisso de atingir, até 2030, a taxa de 45% de energias renováveis em sua matriz energética na Conferência das Partes COP-24 (COP24, 2018).

Comercialmente, os sistemas PV (*Photovoltaic* – PV) são empregados no processamento da energia ativa somente como injeção das correntes puramente senoidais na rede elétrica. Nesse processo de conversão de energia, o módulo PV fornece corrente contínua (CC). Para que esta corrente seja injetada na rede elétrica, é necessário a conversão dessa energia em corrente alternada (CA) (BRITO et al., 2011). A adequação do condicionamento de energia pode ser realizada de duas maneiras: simples estágio ou duplo estágio de potência. Na conversão de duplo estágio, um conversor CC-CC é empregado no primeiro estágio, com o objetivo de elevar a tensão proveniente do arranjo fotovoltaico. Já o segundo estágio, responsável pela conversão CC-CA, integra o sistema fotovoltaico com a rede elétrica. Quando a conversão é feita em um simples estágio, o conversor CC-CA é utilizado diretamente entre o módulo PV e a rede elétrica (PANIGRAHI; MISHRA; SRIVASTAVA, 2018; CAMPANHOL; SILVA; SAMPAIO, 2014). Contudo, neste último caso, para que a adequação do condicionamento de energia seja implementada, comumente são utilizados arranjos de muitos módulos PV conectados em série, em razão da

necessidade de um elevado nível de tensão na saída do módulo PV, função essa que no duplo estágio é feita pelo conversor CC-CC (CAMPANHOL, 2017).

Além de injetar energia ativa à rede elétrica, os sistemas PV podem atuar de forma simultânea na melhoria da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) por meio da função de Filtro Ativo de Potência Paralelo (FAPP). Isto é, injetar na rede elétrica a energia ativa gerada pelo arranjo PV e atuar como condicionador ativo de potência, ou seja, suprimindo os harmônicos de corrente de cargas não-lineares presentes no Sistema Elétricos de Potência (SEP), e ainda compensar a potência reativa da carga (SILVA, 2001; SINGH et al., 1999; AKAGI, 2005). Esse tipo de funcionalidade PV-FAPP é comumente encontrado na literatura em sistemas monofásicos (SILVA et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2016; SOUZA et al., 2013) e trifásicos (SINGH, 2017, SRINIVAS et al., 2018).

Por outro lado, outros problemas podem degradar a QEE, como os possíveis distúrbios de tensão da rede elétrica. Esses, por sua vez, podem afetar equipamentos presentes no SEP. Uma possível solução para estes problemas é a implementação de Filtros Ativos de Potência Série (FAPS), os quais influem na mitigação de harmônicos de tensão e na solução de alguns fenômenos de qualidade de energia como desequilíbrios e afundamentos de tensão (AREDES; WATANABE, 1995).

Um sistema composto por um FAPP e um FAPS é chamado de Condicionador Unificado de Energia (UPQC – *Unified Power Quality Conditioner*). O UPQC une as funções do FAPP e FAPS, ou seja, atua na mitigação de harmônicos de corrente e tensão e compensa desequilíbrios e distúrbios de tensão (GOPAL; MURTHY; SREENIVAS, 2013; HEDAOO; GUPTA, 2017; MODESTO et al., 2016).

Nessa perspectiva, muitos trabalhos propõem sistemas que integram a topologia PV-UPQC aplicados em sistemas monofásicos, como (FAHMY et al., 2014; PATEL et al., 2018; ARAUJO, 2016, MASTROMAURO, 2007). Porém nesses trabalhos não foram consideradas condições de variações climáticas as quais o sistema PV pode estar sujeito. Já em (RONG et al., 2011; LI et al., 2007) são apresentadas abordagens que utilizam estratégias de controle adaptativo que buscam melhores resultados das taxas de Distorção Harmônica Total (DHT) do sistema quando ocorre mudanças de carga. É importante ressaltar que nesses trabalhos citados só foram considerados a topologia UPQC, sem a conexão de sistemas PV.

À vista disso, controladores clássicos são habitualmente aplicados nas topologias até aqui citadas. Grande parte das leis de controle foram deduzidas a partir

da linearização do sistema em torno de um ponto de operação nominal. Apesar de serem satisfatórios para situações previstas, quando submetidos a altas perturbações, como variação de carga e irradiação no sistema, podem apresentar resultados não tão satisfatórios.

Sendo assim, destacam-se dois problemas neste âmbito: O primeiro é referente as condições as quais o sistema PV pode estar submetido, uma vez que as técnicas usuais de controle não são capazes de desempenhar bem em situações adversas (irradiação e temperatura), já que são modeladas para um único ponto de operação. O segundo problema concerne-se na poluição harmônica presente na rede elétrica.

Com este propósito se faz necessário o estudo referente aos sistemas PV que operam em conjunto com o condicionamento ativo de potência. Sendo assim, o objetivo deste trabalho de conclusão de curso é, além de apresentar o sistema PV integrado a uma UQPC, desenvolver um controle adaptativo capaz de apresentar melhores resultados estáticos e dinâmicos do que o controle clássico (PI - Proporcional-Integral e PID - Proporcional-Integral-Derivativo).

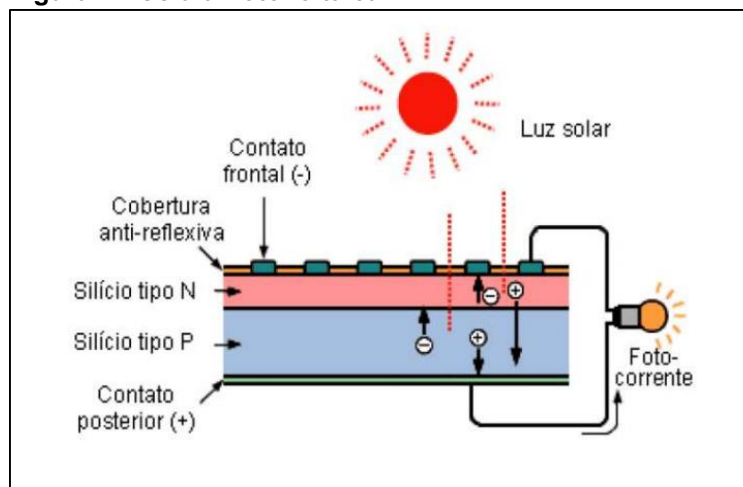
## 1.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Esta seção explora uma síntese referente a energia solar fotovoltaica, englobando suas particularidades e atributos, assim como as principais configurações aplicadas em sistemas fotovoltaicos.

### 1.2.1 Módulo Fotovoltaico

O princípio do funcionamento do módulo fotovoltaico foi observado inicialmente pelo físico Alexandre Edmond Becquerel em 1839, que constatou o efeito de conversão fotovoltaica através do surgimento de uma tensão entre os eletrodos de uma solução condutora iluminada pela luz solar (GARCIA, 2003). A Figura 2 apresenta visualmente o processo de conversão de energia quando há a incidência de luz solar sob uma célula fotovoltaica, onde os elétrons do lado p são excitados a passar para o lado n. Dessa forma, quando há o acúmulo dos elétrons no lado n e no lado p, tem-se o lado positivo e negativo, respectivamente e nota-se o aparecimento de uma baixa corrente elétrica (SANTOS, 2017).

**Figura 2 - Célula Fotovoltaica.**

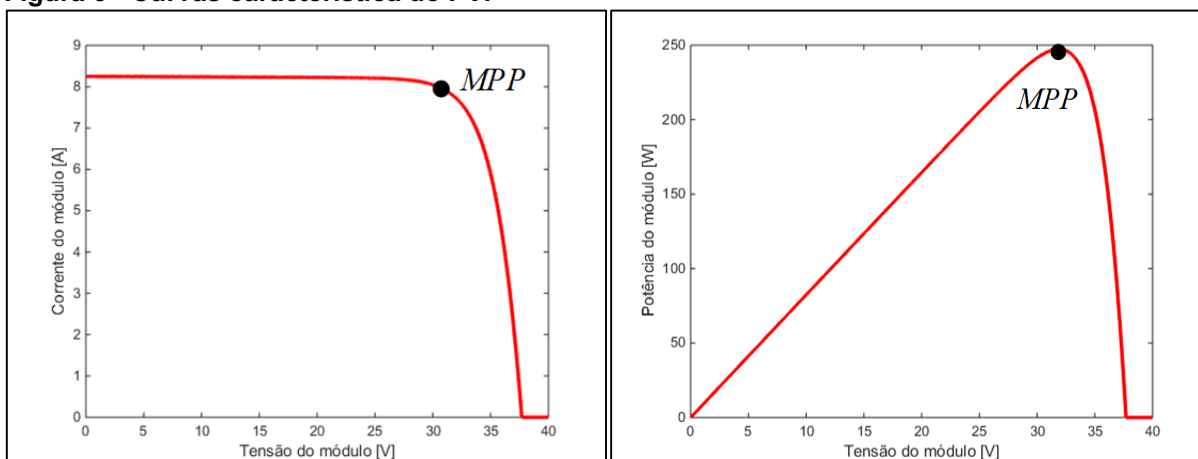


Fonte: Tolmasquim (2016).

O material tradicionalmente utilizado na célula fotovoltaica e que apresenta maior escala de produção sob o aspecto comercial é o Silício (Si). Este material se apresenta de três formas: monocristalino, policristalino ou silício amorfo (Zilles et al., 2012).

Por esses aspectos, o módulo fotovoltaico é composto por um conjunto de células fotovoltaicas. Diante disso, o mesmo possui características elétricas, dentre as principais, se destacam a potência máxima ( $P_{máx}$ ), tensão do ponto de máxima potência ( $V_{máx}$ ), corrente do ponto de máxima potência ( $I_{máx}$ ), tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ). Para a obtenção dessas características são necessários alguns parâmetros, que geralmente são informados pelo fabricante, com base nas condições de teste padrão (STC – *Standard Test Conditions*). A partir da solução do equacionamento da célula fotovoltaica apresentada por (CASARO; MARTINS, 2008) presente no Apêndice A, é possível obter as curvas características do módulo solar: corrente *versus* tensão (I-V) e potência *versus* tensão (P-V), Figura 3 (a) e 3(b) respectivamente. O MPPT (*Maximun Power Point Tracking*) destacados na Figura 3 (a) e (b) é o ponto de operação que há a máxima potência do PV.

**Figura 3 - Curvas característica do PV.**



**(a) Curva característica I-V.**

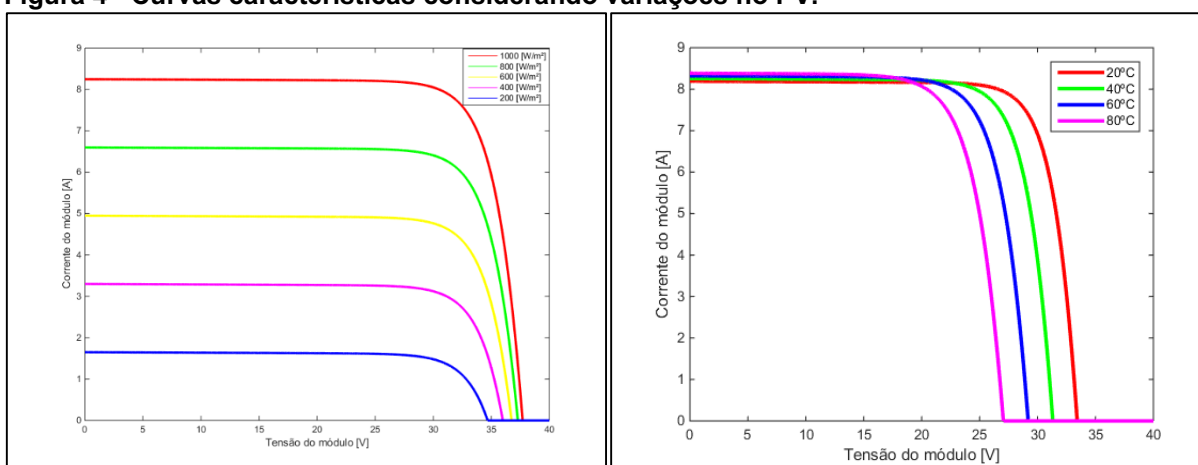
Fonte: Autoria Própria (2020).

**(b) Curva característica P-V.**

Fonte: Autoria Própria (2020).

Entretanto, seu comportamento é altamente influenciado pelas condições climáticas, tais como a irradiação solar e a temperatura, o que, conseqüentemente altera a corrente e tensão nos terminais da PV (CASARO; MARTINS, 2008; BRITO et al., 2012; BRITO, 2013). A Figura 4 (a) apresenta, de maneira genérica, a influência da radiação solar na curva característica I-V, nota-se que do ponto de análise da tensão é aproximadamente invariante, ao contrário da corrente que possui quase uma relação linear com a radiação solar. Similarmente na Figura 4 (b) a temperatura interfere na tensão, e a corrente se mantém pouco variante.

**Figura 4 - Curvas características considerando variações no PV.**



**(a) Curva I-V para variações de radiação solar.**

Fonte: Autoria Própria (2020).

**(b) Curva I-V para variações de temperatura.**

Fonte: Autoria Própria (2020).

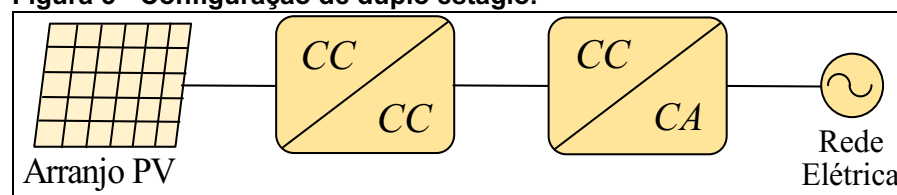
Diante disso, é notório a relevância da busca pela máxima potência extraída do painel/arranjo PV. Na literatura há diversas técnicas de seguimento do ponto de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*), elas, por sua vez, têm o objetivo de assegurar a maximização da potência do PV sob as possíveis mudanças das condições climáticas (BRITO, 2013). Neste trabalho, pretende-se empregar o P&O (*Perturb and Observe*) detalhado no Apêndice B.

### 1.2.2 Estágios de Potência de Sistemas Fotovoltaicos

A conversão de energia dos sistemas fotovoltaicos conectados com a rede elétrica possui a finalidade de complementar a quantidade de energia elétrica consumida pelo usuário e ainda realizar a adequação de energia até a chegada no consumidor (ALVES, 2013). Nesse processo de conversão da energia CC para energia CA, há dois tipos de configurações existentes: a de único estágio e a de estágio duplo.

A configuração de duplo estágio consiste no emprego de dois estágios de condicionamento, compondo-se de uma estrutura conversora CC-CC que tem como objetivo a elevação da tensão e uma estrutura CC-CA para injeção da corrente em alternada, conforme exposto na Figura 5. O interessante nessa configuração é a capacidade de aumentar o nível de tensão de saída do PV que normalmente é baixa (SAMPAIO, 2010). Entretanto, como há duas estruturas envolvidas, é necessário garantir alto rendimento em ambas, consequentemente buscando componentes com alto desempenho, resultando em elevado custo.

**Figura 5 - Configuração de duplo estágio.**

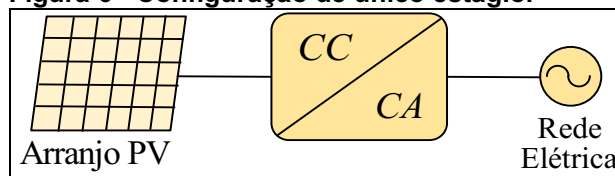


Fonte: Autoria Própria (2020).

Neste contexto, a configuração de único estágio une os dois estágios, com o intuito de proporcionar um maior rendimento e ainda reduzir a quantidade de componentes (ALVES, 2013). Entretanto, esta configuração requer que a quantidade de módulos PV seja superior a configuração de duplo estágio, isso porque é

necessário obter o nível adequado de tensão no barramento CC. A Figura 6 apresenta a conversão direta CC-CA.

**Figura 6 - Configuração de único estágio.**



Fonte: Autoria Própria (2020).

Outro fator que deve ser analisado nessa configuração é que o inversor é o responsável pelo MPPT, atividades de controle e sincronismo com rede. Já na conversão em duplo estágio, existe a possibilidade de distribuição das tarefas de controle para o conversor CC-CC (SILVA, et. al. 2016; ALVES, 2013).

### 1.3 QUALIDADE DE ENERGIA E CONDICIONADORES ATIVOS DE POTÊNCIA

Esta seção apresenta os principais tópicos referentes à QEE e a problemática envolvida, bem como as recomendações normativas referentes ao segmento. Além disso, o conceito de condicionadores ativos de potência é apresentado.

#### 1.3.1 Qualidade de Energia Elétrica

Garantir a qualidade de energia elétrica é o fator essencial perante os consumidores de energia elétrica. Isso envolve tanto a qualidade do produto, a qualidade do serviço e a qualidade do tratamento de reclamações (ANEEL, 2018).

Esse assunto, cada vez mais em pauta na atualidade é decorrente do avanço tecnológico da eletrônica de potência. A proliferação de cargas não-lineares no sistema elétrico de potência tem contribuído com a degradação da QEE, pois as mesmas drenam elevadas correntes harmônicas que ao interagirem com a impedância de linha, geram o surgimento de quedas de tensão, o que, conseqüentemente, atinge a tensão no ponto de acoplamento comum (PAC) (SILVA, 2001). Diante disso, há normas e recomendações que visam impor a redução do conteúdo harmônico presente na rede elétrica, de maneira a atingir a conformidade.



### 1.3.1.1 Definições estabelecidas pela ANEEL

No Brasil, o órgão regulamentador responsável pelo estabelecimento de normas referente a QEE é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Por meio do módulo 8 do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), afirma os termos específicos e os indicadores, caracteriza os fenômenos, determina os limites ou valores de referência, o modo de medição, assim como o gerenciamento de reclamações referentes à conformidade de tensão em regime permanente. Nesse quesito também são analisadas as perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de QEE com a finalidade de acesso aos sistemas de distribuição. O Anexo C apresenta uma síntese dos principais tópicos abordados nesse módulo relacionados com os harmônicos de tensões presentes nos sistemas elétricos de potência.

### 1.3.2 Condicionadores Ativo de Potência

Decorrente da degradação da QEE devido ao aumento das cargas não lineares, têm sido propostos condicionadores de energia, que tem como objetivo atenuar a poluição harmônica, controlar a potência reativa para correção do Fator de Potência (FP), regulação de tensão e outros (AKAGI, 2005; KANIESKI et al., 2008).

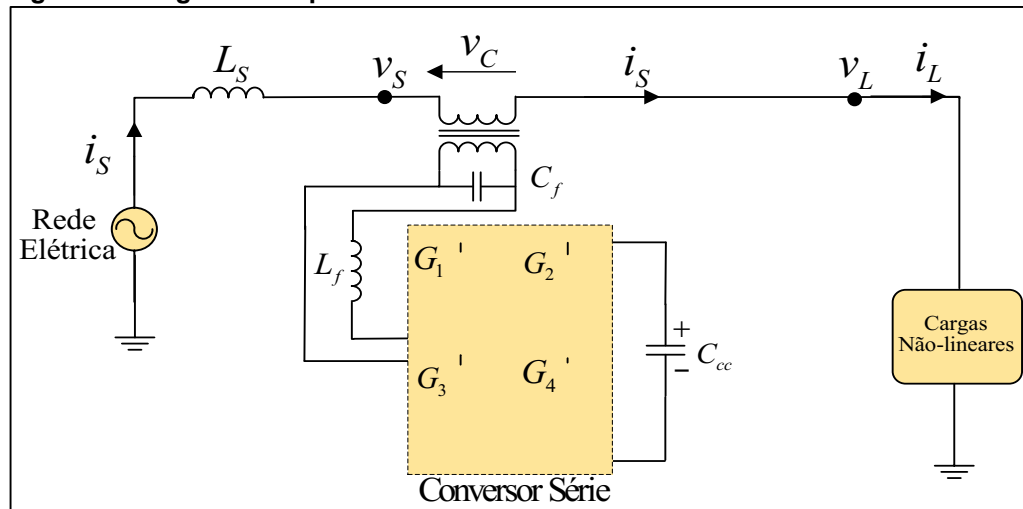
Na literatura, são apresentados os filtros série e paralelo, e os UPQCs, que unem o filtro série e paralelo (PENG, 1998; AREDES, 1996; SINGH, et. al., 1999). Essas estruturas de condicionamento são compostas por conversores estáticos de potência. Normalmente são empregados inversores bidirecionais, a topologia mais aplicada é a VSI (*Voltage Source Inverter*), outra modelo é a CSI (*Current Source Inverter*) (SINGH, et. al., 1999; AKAGI, 2005).

### 1.3.3 Filtro Ativo de Potência Série

A principal funcionalidade de um Filtro Ativo de Potência Série é a compensação de distúrbios de tensão, como harmônicos, afundamento e elevação de tensão (AREDES; WATANABE, 1995). A compensação série atua na melhoria da estabilidade do sistema, já que, conseqüentemente, atua no controle do fluxo de potência. Este filtro é conectado com a rede por meio de um transformador na maioria

de suas aplicações. É constituído, conforme mostra a Figura 7, por um inversor e elementos passivos de filtragem, uma fonte CC, e, por fim, o transformador de acoplamento (SILVA, 2001).

**Figura 7 - Diagrama simplificado FAPS.**

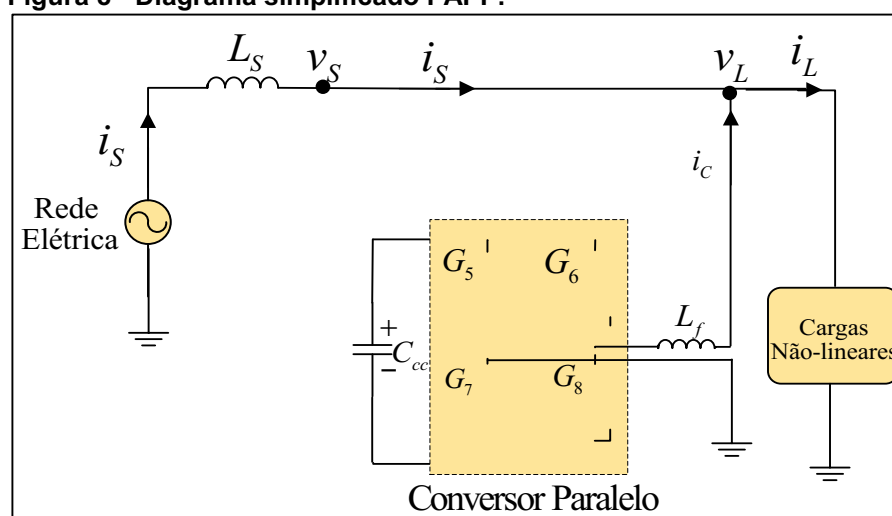


Fonte: Autoria Própria (2020).

#### 1.3.4 Filtro Ativo de Potência Paralelo

O Filtro Ativo de Potência Paralelo (FAPP) se apresenta como uma excelente alternativa para reduzir danos causados pela presença de cargas não lineares na rede elétrica (AREDES, 1996; AKAGI, 2005). O FAPP atua na mitigação de harmônicos de corrente e, também, na compensação de potência reativa da carga. Este, por sua vez, atua similarmente a uma fonte de corrente não-senoidal, injetando as componentes harmônicas e reativas da carga, de modo que apenas a parcela fundamental de corrente seja drenada da rede. A Figura 8 mostra um FAPP, composto por um inversor e elementos de filtragem. O maior desafio em seu projeto é a determinação instantânea das referências de corrente, para isso seja possível, são utilizados alguns métodos de geração da corrente de referência (LIMONGI, 2006).

Figura 8 - Diagrama simplificado FAPP.

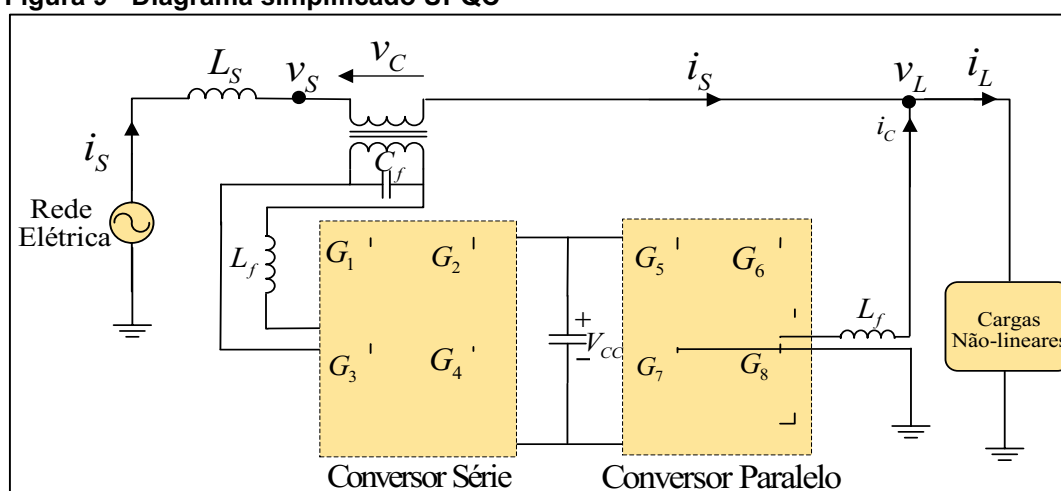


Fonte: Autoria Própria (2020).

### 1.3.5 Condicionador de Qualidade de Energia Unificado

O Condicionador de Qualidade de Energia Unificado (UPQC – *Unified Power Quality Conditioner*) é a junção do Filtro Ativo de Potência Série com o Filtro Ativo de Potência Paralelo em apenas uma estrutura, ou seja, são aliadas as funcionalidades dos dois filtros: a compensação de reativo e/ou harmônicos e a compensação da forma de onda de tensão (AREDES, 1996; AKAGI, 2005; SINGH, et. al., 1999; MODESTO, 2015). Sua topologia, de acordo com a Figura 9 apresenta a composição de um FAPP com um FAPS.

Figura 9 - Diagrama simplificado UPQC



Fonte: Autoria Própria (2020).

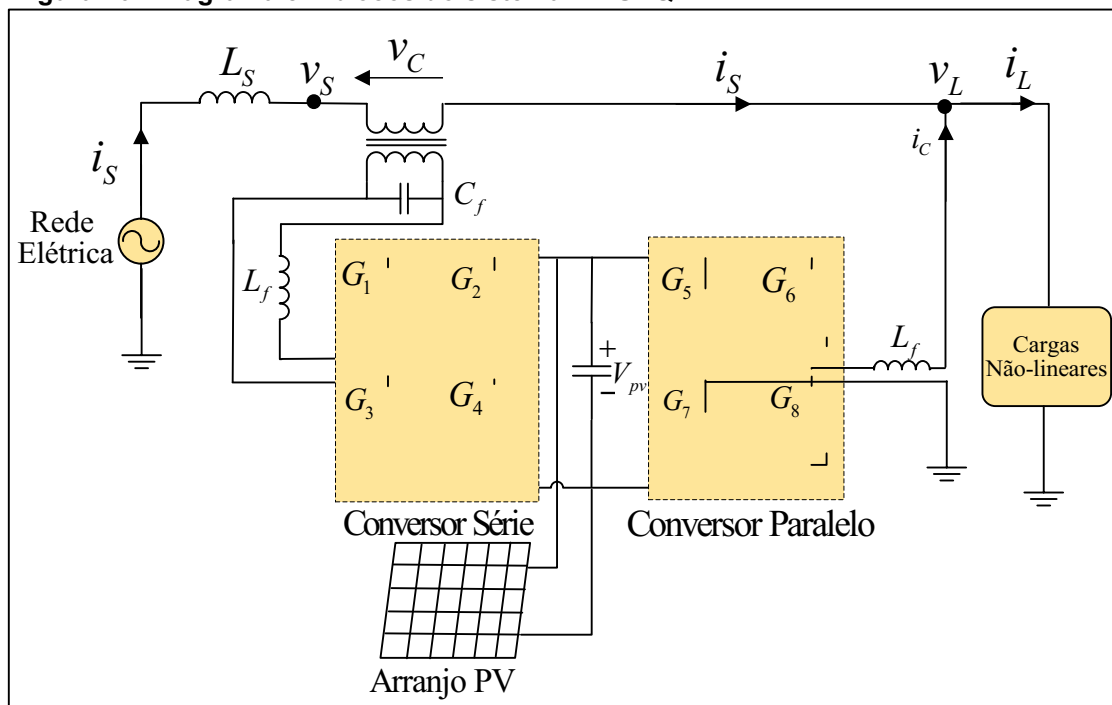
## 1.4 SISTEMA PV-UPQC

Esta seção é dedicada a apresentação da topologia empregada em estudo.

### 1.4.1 Topologia PV-UPQC

A estrutura apresentada na Figura 10 consiste-se em um sistema PV monofásico de único estágio conectado na UPQC, denominado PV-UPQC. Como pode ser visto, são empregados conversores *full-bridge* conectados em um capacitor no barramento CC comum. Essa estrutura pode atuar nos modos de compensação convencional ou dual.

Figura 10 - Diagrama em blocos do sistema PV-UPQC.



Fonte: Autoria Própria (2020).

### 1.4.2 Princípio de Compensação Convencional do Sistema PV-C-UPQC

No princípio de compensação convencional o conversor série atua como uma fonte de tensão não senoidal, intervindo nas perturbações de tensão. Já o conversor paralelo se comporta como uma fonte de corrente não senoidal, mitigando harmônicos de correntes gerados pelas cargas não-lineares (BARRIVIERA et al., 2012).

### 1.4.3 Princípio de Compensação Dual do Sistema PV-D-UPQC

Com o objetivo de tornar a corrente da rede elétrica senoidal e em fase com a tensão da rede, o conversor série na estratégia de controle dual é controlado como uma fonte de corrente senoidal e sua impedância é suficientemente alta, de modo que, ocorra a isolação das correntes harmônicas drenadas pelas cargas não-lineares. Referente ao conversor paralelo, nesse modo de compensação, o mesmo tem a responsabilidade de assegurar a tensão entregue as cargas senoidal e em fase com a tensão da rede elétrica, assim sendo, sua impedância é abundantemente baixa para absorver as correntes harmônicas da carga (MODESTO et. al., 2013).

### 1.5 PROPOSTA DO TRABALHO

Diante das considerações realizadas, este trabalho tem como proposta apresentar um estudo comparativo entre o controle convencional e adaptativo nas topologias PV-C-UPQC e PV-D-UPQC monofásicas.

Dentre as escolhas de configuração, a opção foi por operar em simples estágio, diferentemente do comum emprego do duplo estágio em aplicações fotovoltaicas com a rede elétrica. O duplo estágio de processamento de energia pode representar um custo adicional em relação ao sistema de único estágio e ainda fornecer menor confiabilidade, uma vez que a possibilidade de falha de algum componente é maior.

No que concerne as técnicas de MPPT, a técnica P&O foi escolhida devido a sua facilidade de implementação. As topologias consideram as condições reais dos sistemas PV, tais como: a influência das variáveis climáticas de irradiação solar e temperatura.

Ambas estratégias de compensação serão comparadas a técnica de controle adaptativo desenvolvida com a técnica de controle linear convencional, comumente aplicada com base na análise estática e dinâmica do sistema.

## 1.6 OBJETIVOS

### 1.6.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho consiste em implementar por meio de simulações computacionais, uma estratégia de controle adaptativo na topologia PV-UPQC de simples estágio operando com estratégia dual e convencional aplicados em sistemas monofásicos. Além disso, comparar os desempenhos estáticos e dinâmicos do sistema empregando controle clássico e adaptativo.

### 1.6.2 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar a fundamentação teórica referentes aos sistemas fotovoltaicos e normas pertinentes;
- ✓ Compreender os conceitos relacionados a QEE, assim como as normas e recomendações relacionados aos harmônicos de tensão e de corrente;
- ✓ Estudar os sistemas de condicionamento ativo paralelo, série e o funcionamento da UPQC;
- ✓ Estudar os métodos de geração de correntes e tensões de referência na estratégia de controle convencional e dual;
- ✓ Realizar a modelagem matemática dos conversores série e paralelo, de maneira obter as funções de transferências e equações em espaço de estados que descrevem o sistema físico que viabilizem a projeção do controle adaptativo;
- ✓ Realizar uma revisão bibliográfica sobre controle adaptativo;
- ✓ Implementar estratégias de controle convencional;
- ✓ Desenvolver controle adaptativo;
- ✓ Implementar técnica de controle adaptativo desenvolvido
- ✓ Avaliar e comparar os sistemas PV-C-UPQC e PV-D-UPQC com controle clássico e controle adaptativo por meio da ferramenta computacional Simulink/MATLAB®.

## 1.7 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O restante deste trabalho é organizado do seguinte modo: capítulo 2 apresenta a definição da topologia sistema PV-UPQC em estudo operando com duas estratégias de compensação distintas, ou seja, a convencional e a dual.

O capítulo 3 apresenta as modelagens matemáticas dos conversores série e paralelo operando como fonte de corrente e fonte de tensão. Além disso, também é desenvolvida a modelagem matemática da malha de controle de tensão do barramento CC.

O capítulo 4 apresenta o estudo das malhas de controle dos conversores e geração das referências de corrente. Além disso, é descrito a metodologia para se obter os ganhos dos controladores, conforme o controle clássico. Ainda é apresentada a arquitetura do controle adaptativo desenvolvido, bem como é proposto um diagrama de controle, o qual é capaz de obter melhores resultados sob condições estáticas e dinâmicas. Também é apresentada uma metodologia detalhada para a obtenção dos ganhos do controle adaptativo.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos via simulação computacional, sendo mostrados os resultados para o sistema PV-UQPC nas duas estratégias de compensação adotadas, ou seja, PV-C-UPQC e PV-D-UPQC. Para cada sistema são empregados os controles adaptativo e clássico.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais deste trabalho.

## CAPÍTULO 2 – SISTEMAS PV-UPQC EM ESTUDO

Este capítulo se dedica à descrição das topologias de Sistema Fotovoltaicos integrados em único estágio no Condicionador de Qualidade de Energia Unificado monofásico em estudo, classificadas de acordo com a estratégia de compensação adotada (dual e convencional).

Dependendo da estratégia de compensação adotada, o filtro L (indutor) ou LC (indutor e capacitor) é conectado na saída do inversor série ou paralelo. Em outras palavras, quando o inversor é controlado em tensão, o filtro LC é adotado, já quando é controlado em corrente, apenas o filtro L é empregado. Dessa forma, o filtro LC é aplicado no sistema PV-C-UPQC (inversor em série) e no sistema PV-D-UPQC (inversor paralelo) e o filtro L é usando em PV-C-UPQC (inversor paralelo) e em PV-D-UPQC (inversor série). O inversor *full bridge* série é conectado na rede elétrica por meio de um transformador de acoplamento monofásico.

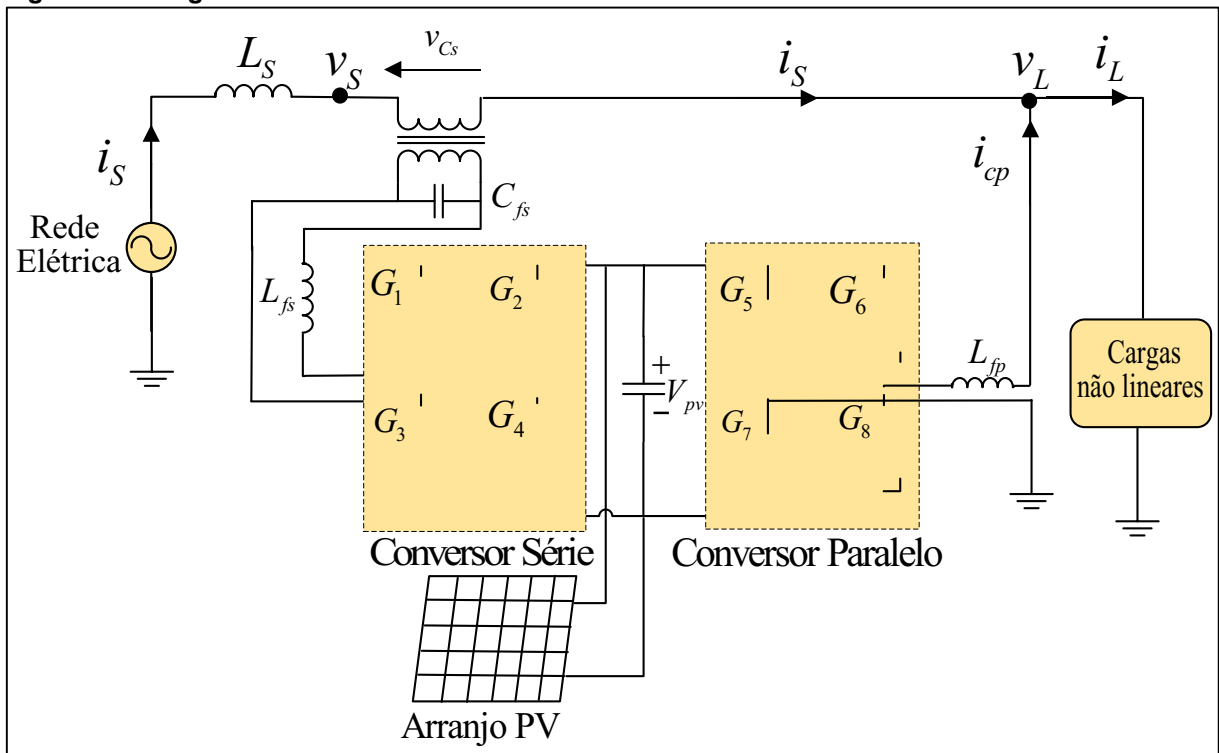
Há também, como mencionado, o sistema de geração de energia fotovoltaica, representado por um único arranjo, conectado diretamente no barramento CC do inversor em ponte completa (*full bridge*) em apenas um estágio de conversão de energia. De maneira a otimizar a potência disponibilizada pelo arranjo é empregada a técnica de MPPT diretamente no controle de tensão do barramento CC.

### 2.1 SISTEMA PV-C-UPQC

A Figura 11 apresenta a topologia PV-UPQC controlada no modo convencional, PV-C-UPQC. Nesta estratégia de compensação, conforme já mencionado, o conversor em série é controlado como uma fonte de tensão. Dessa forma, a tensão não senoidal sintetizada pelo conversor em série pode conter componentes harmônicas, presentes na tensão da rede elétrica. Portanto, o conversor série é controlado para forçar a tensão de saída ser senoidal, realizando a compensação de distúrbios. De outra forma, o conversor se comporta como uma fonte de corrente não senoidal, mitigando harmônicos de correntes gerados pelas cargas não-lineares (BARRIVIERA et al.,2012).



Figura 11 - Diagrama de blocos do sistema PV-C-UPQC.

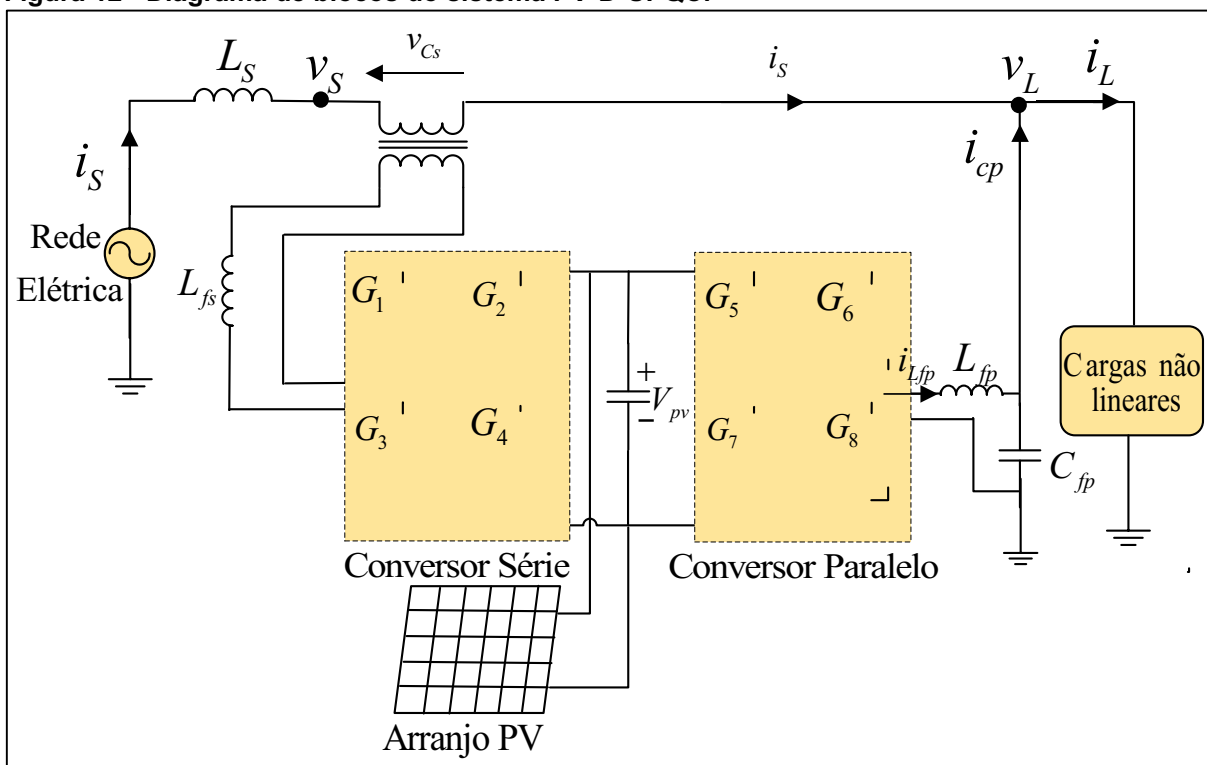


Fonte: Autoria Própria (2020).

## 2.2 SISTEMA PV-D-UPQC

Com o objetivo de tornar a corrente da rede elétrica senoidal e em fase com a tensão da rede, o conversor série na estratégia de controle dual (Figura 12) é controlado como uma fonte de corrente senoidal e sua impedância é suficientemente alta de modo que ocorra a isolação das correntes harmônicas drenadas pelas cargas não-lineares. Referente ao conversor paralelo, nesse modo de compensação, o mesmo tem a responsabilidade de assegurar a tensão entregue as cargas senoidal e em fase com a tensão da rede elétrica, assim sendo, sua impedância é abundantemente baixa para absorver as correntes harmônicas da carga. É importante frisar que os distúrbios estacionários e não estacionários aparecerão no transformador em série, resultando a compensação/supressão indireta de tensão (MODESTO et. al., 2013).

Figura 12 - Diagrama de blocos do sistema PV-D-UPQC.



Fonte: Autoria Própria (2020).

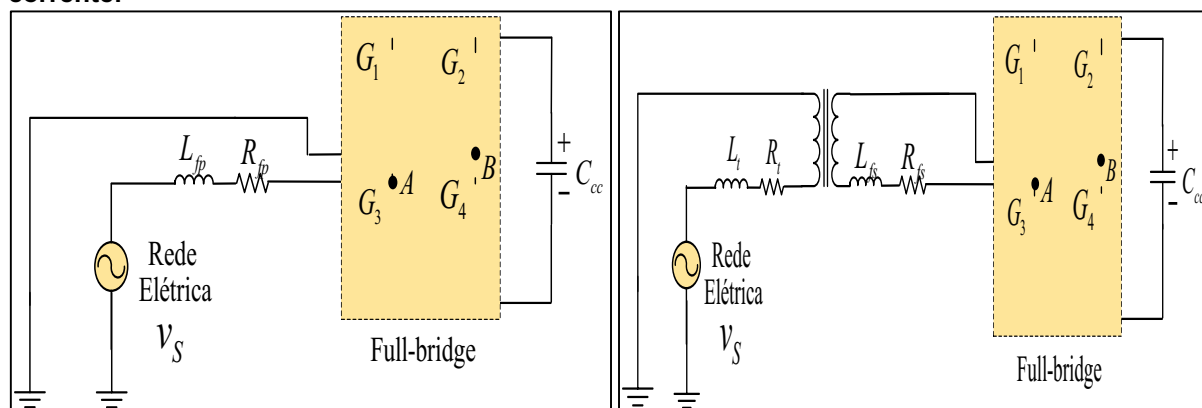
## CAPÍTULO 3 - MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo é apresentada a modelagem matemática dos circuitos de potência dos conversores série e paralelo do sistema PV-UPQC, o qual operam com estratégias de compensação de potência convencional e dual. O intuito é obter as funções de transferências que representem fisicamente as topologias empregadas. Neste trabalho, para ambos os controles aplicados, clássico ou adaptativo, é necessário a função de transferência dos conversores. A seção 3.1 apresenta a modelagem para controlar o conversor operando como fonte de corrente (conversor série em PV-D-UPQC e paralelo em PV-C-UPQC e a seção 3.2 a modelagem do conversor operando como fonte de tensão (conversor paralelo em PV-D-UPQC e conversor série em PV-C-UPQC). Tanto a modelagem do conversor operando como fonte de corrente quanto fonte de tensão foram obtidas inicialmente por um sistema genérico em espaços de estados e posteriormente linearizadas. Além dessas modelagens, em 3.3 está disposta a modelagem para obtenção da planta de tensão do barramento CC.

### 3.1 MODELAGEM DOS CONVERSORES EM SÉRIE E PARALELO OPERANDO COMO FONTE DE CORRENTE

A corrente que flui através do filtro  $L$  é controlada quando o conversor opera como fonte de corrente (abreviada como  $fc$ ) (em PV-C-UPQC (Figura 13(a)) no conversor paralelo e em PV-D-UPQC (Figura 13 (b)) no conversor série).

**Figura 13 - Circuitos monofásicos do inversor *Full bridge* (filtro  $L$ ) operando como fonte de corrente.**



**(a) Inversor em paralelo operando como fonte de corrente em PV-C-UPQC.**

Fonte: Autoria Própria (2020).

**(b) Inversor em série operando como fonte de corrente em PV-D-UPQC.**

Fonte: Autoria Própria (2020).

A equação (1) mostra a representação em espaços de estados genérica de ambos os sistemas operando como fonte de corrente, como segue:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}}_{fc} \\ \dot{\mathbf{x}}_{fc} \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R_{fc}}{L_{fc}} \end{bmatrix}}_{A_{fc}} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{fc} \\ \mathbf{x}_{fc} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{V_{cc}}{L_{fc}} \end{bmatrix}}_{B_{fc}} \begin{bmatrix} d_{fc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{fc}} \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{wfc} \end{bmatrix}}_{w_{fc}} \\ \mathbf{y}_{fc} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix}}_{C_{fc}} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{fc} \\ \mathbf{x}_{fc} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

Onde, no sistema PV-C-UPQC  $i_{fc} = i_{cp}$ ;  $u_{wfc} = v_L$ ;  $L_{fc} = L_{fp}$ ;  $R_{fc} = R_{fp}$  e em PV-D-UPQC  $i_{fc} = i_{Lfs}$ ;  $L_{fc} = L_{fs}$ ;  $R_{fc} = R_{fs}$  e  $u_{wfc} = v_s - v_{Cs}$ . Em ambos modos de operação,  $d_{fc}$  é a razão cíclica.

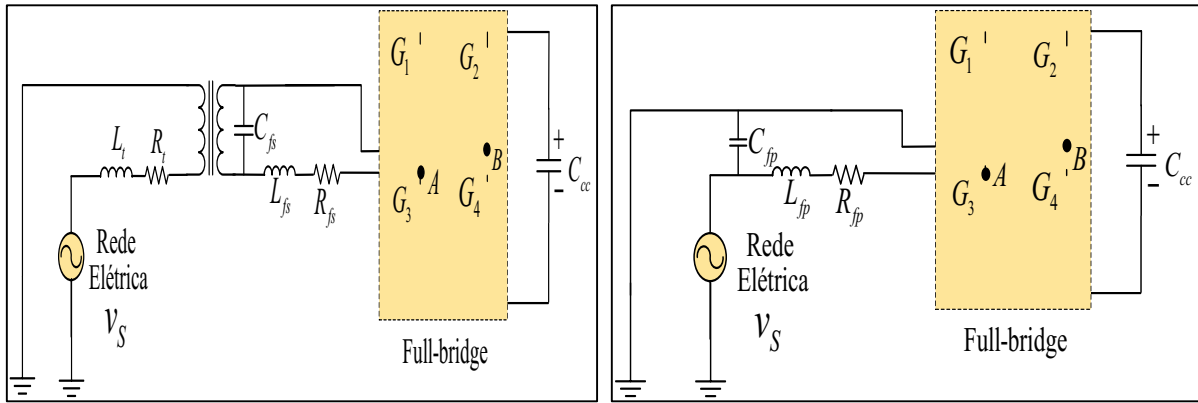
Realizando algumas manipulações matemáticas em (1), a função de transferência de malha aberta pode ser representada por:

$$G_{fc} = \frac{V_{cc}}{L_{fc}s + R_{fc}} \quad (2)$$

### 3.2 MODELAGEM DOS CONVERSORES EM SÉRIE E PARALELO OPERANDO COMO FONTE DE TENSÃO

A Figura 14 apresenta os circuitos dos inversores *full bridge* com filtro LC. A tensão presente nestes capacitores é controlada quando os conversores operam como fonte de tensão (conversor em série em PV-C-UPQC e paralelo em PV-D-UPQC). Para essa análise é considerado as indutância ( $L_i$ ) e resistência ( $R_i$ ) de dispersão as quais serão refletidas do lado secundário para o lado primário do transformador, admitindo a relação de transformação unitária.

Figura 14 - Circuitos monofásicos do inversor *full bridge* (filtro LC) operando como fonte de tensão.



(a) Inversor em série operando como fonte de corrente em PV-C-UPQC.

Fonte: Autoria Própria (2020).

(b) Inversor em paralelo operando como fonte de corrente em PV-D-UPQC.

Fonte: Autoria Própria (2020).

A equação (3) mostra a representação em espaços de estados genérica de ambos os sistemas operando como fonte de tensão, como segue:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{i}_{L_{ft}} \\ \dot{v}_{ft} \end{bmatrix}}_{\dot{x}_{ft}} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R_{L_{ft}}}{L_{ft}} & -\frac{1}{L_{ft}} \\ \frac{1}{C_{ft}} & 0 \end{bmatrix}}_{A_{cft}} \underbrace{\begin{bmatrix} i_{L_{ft}} \\ v_{ft} \end{bmatrix}}_{x_{ft}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{V_{cc}}{L_{ft}} \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_{ft}} [d_{ft}] + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C_{ft}} \end{bmatrix}}_{B_{wft}} \underbrace{\begin{bmatrix} u_{w_{ft}} \\ w_{ft} \end{bmatrix}}_{w_{ft}} \quad (3)$$

$$y_{ft} = \underbrace{[0 \quad 1]}_{O_{ft}} \underbrace{\begin{bmatrix} i_{L_{ft}} \\ v_{ft} \end{bmatrix}}_{x_{ft}}$$

Onde, no sistema PV-C-UPQC  $v_{ft} = v_{C_{fs}}$ ;  $i_{L_{ft}} = i_{L_{fs}}$ ;  $C_{ft} = C_{fs}$ ;  $L_{ft} = L_{fs}$   
 $R_{ft} = R_{fs}$  e  $i_{w_{ft}} = i_s$  em PV-D-UPQC  $v_{ft} = v_{C_{fp}}$ ;  $i_{L_{ft}} = i_{L_{fp}}$ ;  $C_{ft} = C_{fp}$ ;  $L_{ft} = L_{fp}$   
 $R_{ft} = R_{fp}$  e  $i_{w_{ft}} = i_L - i_s$  em ambos modos de operação,  $d_{ft}$  é a razão cíclica.

Realizando manipulações matemáticas em (3) obtêm-se as funções de transferência em malha aberta, representadas por:

$$G_{ft\_vd} = \frac{V_{cc}}{C_{ft} L_{ft} s^2 + R_{ft} C_{ft} s + 1} \quad (4)$$

$$G_{ft\_vi} = \frac{V_{cc}}{L_{ft}s + R_{ft}} \quad (5)$$

### 3.3 MODELAGEM DA MALHA DE TENSÃO DO BARRAMENTO CC

A tensão do barramento CC do sistema PV deve ser mantida constante e, para isso, é utilizado um controlador, seja ele clássico (PI) ou adaptativo. Sendo assim, se faz necessário realizar a modelagem matemática para obtenção desta malha de tensão. Em (SILVA, 2001) é apresentado o desenvolvimento matemático por meio de uma análise de fluxo de potência no inversor.

Admitindo um sistema monofásico, que tem por característica tensão e corrente senoidais e em fase, a potência ativa instantânea pode ser expressada por (6), em que  $v_s$  e a tensão instantânea e  $i_s$  a corrente instantânea.

$$p = v_s i_s \quad (6)$$

Representando essas grandezas em componentes contínuas no sistema de eixos de referência síncrona fictício, a potência média na entrada é dada pela equação (7).

$$\bar{p} = \frac{v_d}{\sqrt{2}} \frac{i_d}{\sqrt{2}} = \frac{v_d i_d}{2} \quad (7)$$

Onde  $v_d$  e  $i_d$  são as componentes contínuas de tensão e corrente no eixo síncrono direto  $d'$ .

Quando há a conexão de cargas no sistema, a potência fornecida é representada por (8), em que  $i_{dL}$  é a corrente da carga no eixo síncrono direto, que pode ser divididas nas parcelas contínuas  $i_{dL_{cc}}$  e alternadas  $i_{dL_{ac}}$ .

$$p_L = \frac{v_d i_{dL}}{2} = \frac{v_d (i_{dL_{cc}} i_{dL_{ac}})}{2} \quad (8)$$

Levando em consideração que  $i_d$  é equivalente a  $i_{dL_{cc}}$ . Dessa forma, a equação (8) pode ser também expressada por (9).

$$p_L = \frac{v_d(i_d + i_{dL_{ac}})}{2} = \bar{p} + \frac{v_d(i_{dL_{ac}})}{2} \quad (9)$$

Dessa forma, a potência que flui no inversor é dada por meio da equação (7) e (9) e representada pela equação (10).

$$p_{F=\bar{p}} - p_L = \bar{p} - \left( \bar{p} + \frac{v_d(i_{dL_{ac}})}{2} \right) = \frac{v_d(i_{dL_{ac}})}{2} \quad (10)$$

A parcela ativa que circula no inversor, representa a energia disponibilizada pelo sistema PV, mantém controlada a tensão no barramento CC e compensa as perdas dos dispositivos de comutação do inversor. Sendo assim, a equação (10) por ser expressa por (11) em que  $i_{cc}$  é a parcela ativa que flui no inversor.

$$p_F = \frac{v_d(i_{dL_{ac}})}{2} + \frac{v_d(i_{cc})}{2} = p_{Fac} + p_{Fcc} \quad (11)$$

Considerando que  $p_{Fcc}$  é igual à potência no barramento CC ( $p_{cc}$ ), é possível representar a equação (12), onde  $v_{cc}$  e  $i_c$  são, respectivamente, a tensão e corrente do barramento CC.

$$p_{Fcc} = p_{cc} = \frac{v_d(i_{cc})}{2} = v_{cc} i_c \quad (12)$$

A corrente do barramento CC pode ser expressa por (13)

$$i_c = C_{cc} \frac{dv_{cc}}{dt} \quad (13)$$

Igualando (12) e (13), obtém-se:

$$\frac{v_d(i_{cc})}{2v_{cc}} = C_{cc} \frac{dv_{cc}}{dt} \quad (14)$$

Fazendo uso da técnica de modelagem em pequenos sinais na equação (14), é possível obter a equação (15), onde  $v_{cc}$  e  $i_{cc}$  são os valores médios.

$$\langle v_{cc}(t) \rangle_{T_s} \frac{d \langle v_{cc}(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \frac{v_d}{2v_{cc}} \langle i_{cc}(t) \rangle_{T_s} \quad (15)$$

As perturbações do sistema, são dados por (16) e (17)

$$\langle v_{cc}(t) \rangle_{T_s} = V_{cc} + \hat{v}_{cc}(t) \quad (16)$$

$$\langle i_{cc}(t) \rangle_{T_s} = I_{cc} + \hat{i}_{cc}(t) \quad (17)$$

Inserindo as perturbações no sistema na equação (18).

$$\langle V_{cc} + \hat{v}_{cc}(t) \rangle \frac{d \langle V_{cc} + \hat{v}_{cc}(t) \rangle}{dt} = \frac{v_d}{2v_{cc}} \langle I_{cc} + \hat{i}_{cc}(t) \rangle \quad (18)$$

Submetendo a equação (18) ao processo de linearização, as parcelas CC referente à resposta em regime permanente tornam-se nulas. Já os termos CA de segunda ordem são desconsiderados pois seus valores são muito baixo. Diante disso, resulta a equação (19).

$$V_{cc} \frac{d\hat{v}_{cc}(t)}{dt} = \frac{v_d}{2v_{cc}} \hat{i}_{cc}(t) \quad (19)$$

É possível obter a função de transferência empregando a Transformada de Laplace, dessa forma, a função de transferência é expressada pela equação (20).



$$G_{cc} = \frac{\hat{v}_{cc}(s)}{\hat{i}_{cc}(s)} = \frac{v_d}{2C_{cc}V_{cc}s} \quad (20)$$

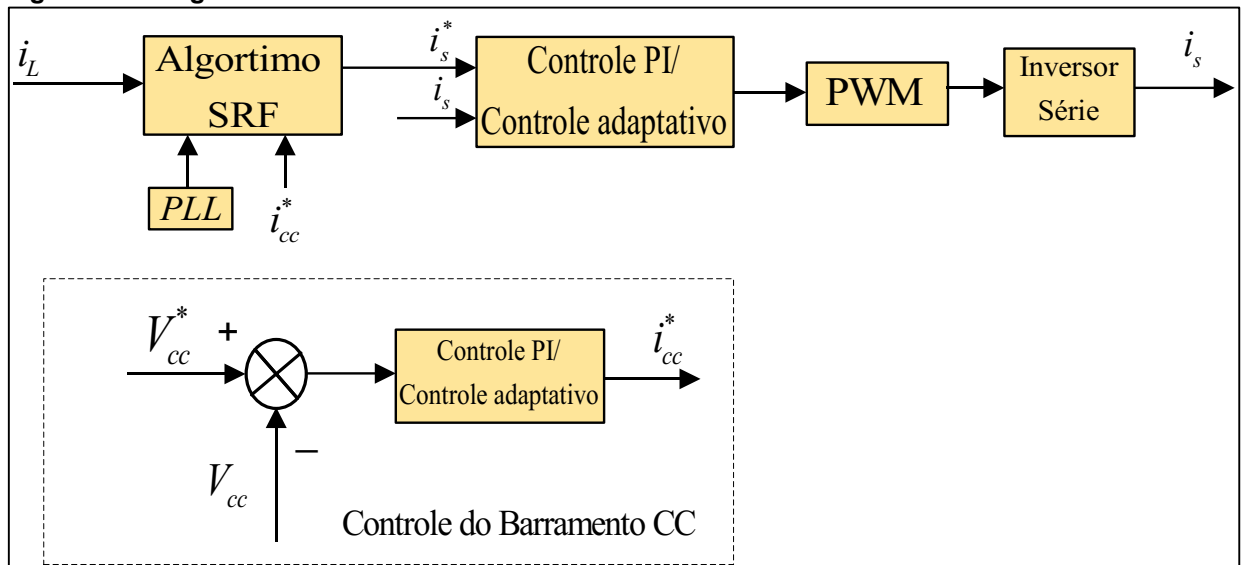
## CAPÍTULO 4 – SISTEMA DE CONTROLE

Neste capítulo são apresentados os sistemas de controle do sistema PV-UPQC. Como este trabalho apresenta os dois modos de compensação, dual e convencional, inicialmente é descrito o método de referência de corrente e tensão para ambos. Em sequência é discutido a metodologia e projeto para obtenção dos ganhos dos controladores utilizando o controle PI clássico. A proposta do controle adaptativo é apresentada no item 4.7, em seguida, é feita uma análise da metodologia detalhada e o projeto para obtenção dos ganhos do controlador adaptativo.

### 4.1 MALHA DE CONTROLE DE CORRENTE NO CONVERTOR SÉRIE EM PV-D-UPQC

A Figura 15 mostra o diagrama em blocos de malhas de corrente do conversor série. O conversor é controlado para operar como fonte de corrente senoidal. Para isso, a corrente da carga é medida e transformada no eixo de referência estacionária SRF (*Synchronous Reference Frame*) (posteriormente apresentado na seção 4.5). Como pode ser observado, o controle do barramento CC é responsável por garantir a tensão do barramento CC, sendo assim  $i_{cc}$  compensa as perdas do sistema.

Figura 15 - Diagrama de bloco da malha de corrente do conversor série em PV-D-UPQC.



Fonte: Autoria Própria (2020).

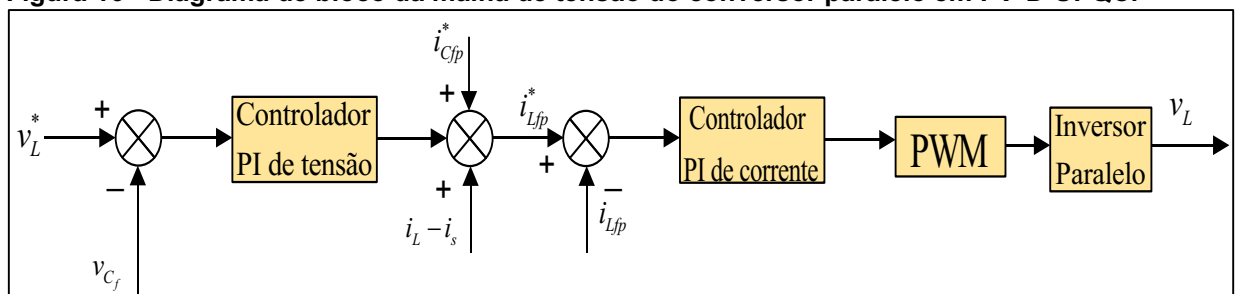
#### 4.2 MALHA DE CONTROLE DE TENSÃO NO CONVERSOR PARALELO EM PV-D-UPQC

O diagrama em blocos mostrado na Figura 16 representa a malha de controle de tensão do conversor paralelo. Assumindo que  $\theta$  (ângulo da rede) é conhecido, a referência de tensão da carga pode ser obtida conforme a equação (21)

$$v_L = V_{pk} \text{sen}\theta \quad (21)$$

Onde  $V_{pk}$  é a amplitude de pico desejada na carga.

Figura 16 - Diagrama de bloco da malha de tensão do conversor paralelo em PV-D-UPQC.



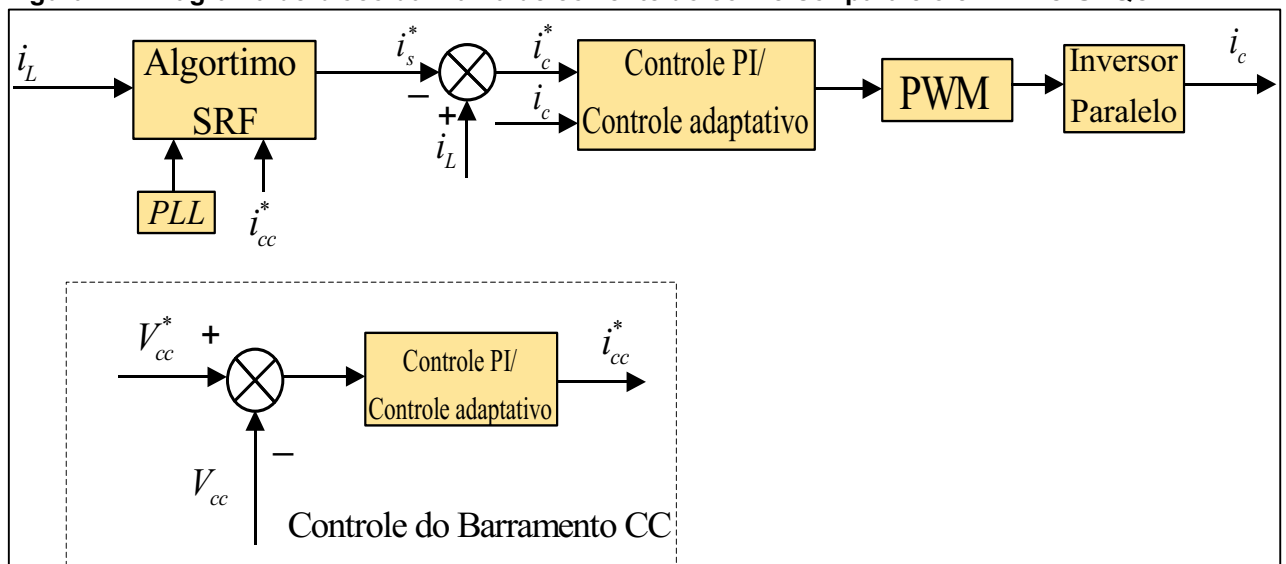
Fonte: Autoria Própria (2020).

### 4.3 MALHA DE CONTROLE DE CORRENTE NO CONVERSOR PARALELO EM PV-C-UPQC

A Figura 17 mostra o diagrama de blocos da malha de corrente do conversor paralelo. Inicialmente, é mensurada a corrente da carga e transformada no eixo de referência síncrona (SRF). Para se obter a referência da corrente de compensação:

$$i_c^* = i_L - i_s^* \quad (22)$$

Figura 17 - Diagrama de bloco da malha de corrente do conversor paralelo em PV-C-UPQC.



Fonte: Autoria Própria (2020).

### 4.4 MALHA DE CONTROLE DE TENSÃO NO CONVERSOR SÉRIE EM PV-C-UPQC

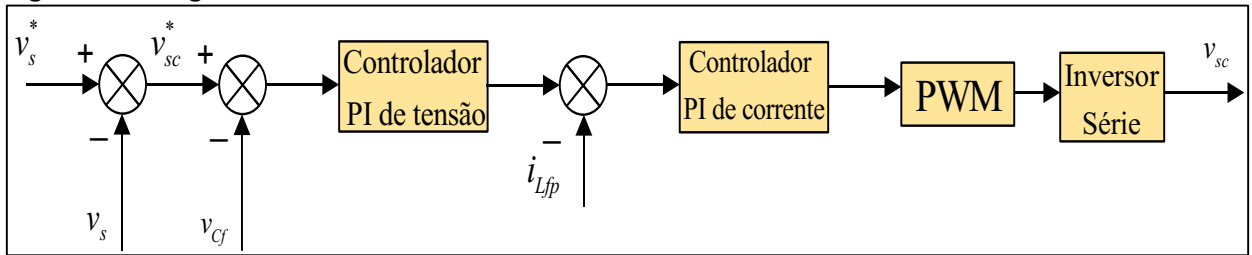
O diagrama em blocos representados na Figura 18 representa a malha de controle de tensão do conversor série. A equação (23) apresenta o cálculo para se obter a referência de tensão de compensação  $v_{sc}^*$  como segue:

$$v_{sc}^* = v_s^* - v_s \quad (23)$$

Onde  $v_s^*$  é dado por:

$$v_s^* = V_{pk} \text{sen}\theta \quad (24)$$

Figura 18 - Diagrama de bloco da malha de tensão do conversor série em PV-C-UPQC.



Fonte: Autoria Própria (2020).

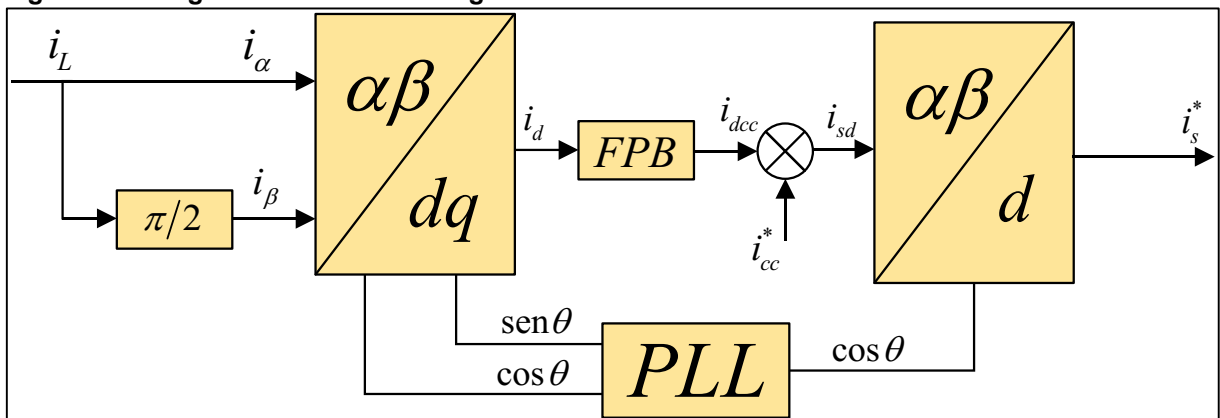
#### 4.5 GERAÇÃO DAS REFERÊNCIAS DE CORRENTE

Em ambos os modos de compensação é necessário a implementação de um algoritmo que mensure as correntes de carga para o cálculo das parcelas a serem compensadas (CAMPANHOL, 2017).

Neste trabalho é adotado o algoritmo baseado no sistema de eixos de referência síncrona SRF. Este apresenta algumas características bastante interessantes como: fácil implementação, uso de apenas um filtro passa baixa (FPB). Além disso, apresenta robustez diante de possíveis distúrbios da rede elétrica, considerando que o sistema de detecção do ângulo de fase da rede elétrica também seja robusto, como é o caso do PLL (*Phase-Locked Loop*).

Na Figura 19 está representado o diagrama de blocos do algoritmo SRF monofásico modificado que leva em consideração a criação de um referencial trifásico, já que seu primórdio de funcionamento é para sistemas trifásicos.

Figura 19 - Diagrama de blocos do algoritmo SRF monofásico.



Fonte: Autoria Própria (2020).

O eixo referencial trifásico fictício é representado por meio do sistema de eixos estacionário bifásico  $\alpha\beta$ . Dessa forma, é realizada a leitura da corrente da carga  $i_L$

no eixo  $\alpha$ , já para o eixo  $\beta$  é submetido um atraso de  $\pi/2$  radianos em relação ao eixo  $\alpha$ , de acordo com:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(\omega t) \\ i_L(\omega t - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (25)$$

Adiante, as correntes  $i_\alpha$  e  $i_\beta$  são transformadas do eixo bifásico  $\alpha\beta$  para o eixo bifásico síncrono  $dq$ , conforme descreve a equação (26). O  $\theta$  é fornecido pelo sistema PLL, com isso é possível determinar as coordenadas dos vetores síncronos unitários:  $\sin\theta$  e  $\cos\theta$ . O sistema PLL empregado neste trabalho é o AF-SRF-PLL apresentado em (SILVA; BACON, 2015).

$$i_d = i_\alpha \cos\theta + i_\beta \sin\theta \quad (26)$$

A partir disso, as componentes das correntes na frequência fundamental são decompostas em termos contínuos (CC), enquanto que as correntes harmônicas são decompostas em termos oscilantes (AC) (SILVEIRA, 2017). Sendo assim, é empregado um filtro passa baixa (FPB) para obter as componentes CC das correntes  $i_d$ .

Por fim, a correntes de referência fornecidas pelo algoritmo SRF está indicada a seguir:

$$i_s^* = i_{sd} \cos\theta \quad (27)$$

#### 4.6 CONTROLE CLÁSSICO

O controle clássico tem desempenhado um papel fundamental no ramo da ciência e engenharia. Seja por meio da ação proporcional, integral e derivativa (PID), posicionamento de polos, dentre outros. Esses tipos de controlador possuem como característica uma parte fixa, em que seus parâmetros são estáticos no tempo, ou seja, seus ganhos são sintonizados para um ponto de operação de processo, enquanto os sistemas dinâmicos reais são não lineares e com parâmetros variáveis

no tempo (PIRES, 2007). Dessa forma, caso seja necessário, esses ganhos não são modificados automaticamente (FERNADES, 2008).

Controladores PID são bastante empregados nas indústrias. São produzidos em massa e possuem uma estrutura simples e padronizada, dessa forma, apenas os ganhos são ajustados. Isso os torna bastante populares devido serem de baixo custo, robustos e versáteis.

#### 4.6.1 Projetos dos Controladores Convencionais

No trabalho de Angélico, Campanhol e Silva, (2014) é apresentado uma metodologia baseada na análise de frequência via diagrama de bode. Nesta metodologia a frequência de cruzamento e margem de fase são requisitos de projetos. O procedimento para obtenção dos ganhos  $K_i$  e  $K_p$  são descritos adiante.

Etapa 1 – Plotar o diagrama de Bode do sistema a ser compensado ( $G_p(s)$ ) e avaliar o ângulo de fase ( $\varphi_p$ ) na frequência de cruzamento especificada  $\omega_c$ .

Etapa 2 – Verificar a contribuição angular ( $\varphi_c$  atraso de fase) que o compensador deve fornecer para atender às especificações de margem de fase desejada  $MF_d$  na frequência de cruzamento especificada  $\omega_c$ . A contribuição angular é determinada pela equação (28).

$$\varphi_c = MF_d - (\varphi_p + 180^\circ) \quad (28)$$

Etapa 3 – Com a finalidade de ajustar o ângulo de fase do sistema compensado em malha aberta  $G_{MAC}(s)$  de acordo com a margem de fase é necessário adicionar um compensador de fase com a planta a ser compensada, conforme exemplificado na equação (29).

$$C(s) = \frac{T_i s + 1}{s} \quad (29)$$

Em que  $T_i$  é dado por (30).

$$T_i = \frac{tg(\omega_c + 90^\circ)}{\omega_c} \quad (30)$$

Etapa 4 – Incluir um ganho em série com o sistema compensado, equação (31), com o objetivo que o módulo compensado em malha aberta  $G_{MAC}$  cruze 0db na frequência de cruzamento especificada.

$$K_c = \frac{1}{|G_{MAC}|} \quad (31)$$

Sendo assim, de acordo com a equação (29), que descreve a função de transferência do controlador PI, os ganhos  $K_i$  e  $K_p$  podem ser obtidos pelas equações (32), (33) e (34) respectivamente.

$$G_{PI}(s) = K_i \left( \frac{T_i s + 1}{s} \right) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (32)$$

$$K_p = K_i T_i \quad (33)$$

$$K_i = K_c \quad (34)$$

#### 4.6.2 Projeto dos controladores PI dos inversores operando como fonte de corrente

Nesta seção é realizado o projeto dos controladores PI, aplicados na malha de controle da corrente nos sistemas PV-C-UPQC e PV-D-UPQC. A Tabela 1 abaixo mostra as especificações para o projeto do controlador PI.



**Tabela 1 - Especificações de projeto dos controladores PI dos conversores que operam como fonte de corrente.**

Parâmetros	PV-C-UPQC	PV-D-UPQC
Frequência de cruzamento	$\omega_C = 2,5\text{kHz}$	$\omega_C = 2,5\text{kHz}$
Margem de fase desejada	$MF_{di} = 85^\circ$	$MF_{di} = 85^\circ$
Frequência de chaveamento	$f_{sw} = 20\text{kHz}$	$f_{sw} = 20\text{kHz}$
Indutância de acoplamento	$L_f = 2,4\text{mH}$	$L_f = 2,4\text{mH}$
Indutância do filtro	$L_{fp} = 1,5\text{mH}$	$L_{fs} = 1,5\text{mH}$
Resistência do filtro	$R_{fp} = 0,21\Omega$	$R_{fs} = 0,21\Omega$
Indutância de dispersão do transformador	-	$L_t = 115\mu\text{H}$
Resistência de dispersão do transformador	-	$R_t = 0,08\Omega$
Tensão no barramento CC	$V_{dc} = 308\text{V}$	$V_{dc} = 308\text{V}$

Fonte: Aatoria Própria (2020).

De acordo com o procedimento apresentado na seção 4.6 e em conjunto com a equação (2), os ganhos obtidos para o controlador de corrente dos conversores que operam como fonte de corrente estão exibidos na Tabela 2.

**Tabela 2 - Ganhos dos controladores PI de corrente dos conversores que operam como fonte de corrente.**

$K_{i_i} = 94,0620$	$K_{P_i} = 0,0763$
---------------------	--------------------

Fonte: Aatoria Própria (2020).

#### 4.6.3 Projeto dos controladores PI dos inversores operando como fonte de tensão

A Tabela 3 abaixo mostra as especificações para o projeto do controlador PI, utilizado na malha de controle da tensão nos sistemas PV-C-UPQC e PV-D-UPQC. Os ganhos encontrados para esta malha de controle estão apresentados na Tabela 4.

**Tabela 3 - Especificações de projeto dos controladores PI dos conversores que operam como fonte de tensão.**

Parâmetros	PV-C-UPQC	PV-D-UPQC
Frequência de cruzamento na malha de tensão	$\omega_{Cv} = 3\text{kHz}$	$\omega_{Cv} = 3\text{kHz}$
Frequência de cruzamento na malha de corrente	$\omega_{Ci} = 1,25\text{kHz}$	$\omega_{Ci} = 1,25\text{kHz}$
Margem de fase desejada na malha de tensão	$MF_{dv} = 85^\circ$	$MF_{dv} = 85^\circ$
Margem de fase desejada na malha de corrente	$MF_{di} = 85^\circ$	$MF_{di} = 85^\circ$
Frequência de chaveamento	$f_{sw} = 20\text{kHz}$	$f_{sw} = 20\text{kHz}$
Indutância de acoplamento	$L_{fs} = 1,73\text{mH}$	$L_{fp} = 1,73\text{mH}$
Capacitância de filtragem	$C_{fs} = 60\mu\text{F}$	$C_{fp} = 60\mu\text{F}$
Resistência série do indutor de acoplamento	$R_{fs} = 0,21\Omega$	$R_{fp} = 0,21\Omega$
Indutância de dispersão do transformador	$L_t = 115\mu\text{H}$	-
Resistência de dispersão do transformador	$R_t = 0,08\Omega$	-
Tensão no barramento CC	$V_{dc} = 308\text{V}$	$V_{dc} = 308\text{V}$

Fonte: Autoria Própria (2020).

**Tabela 4 - Ganhos dos controladores PI de tensão dos conversores que operam como fonte de tensão.**

Ganhos dos Controladores PI da malha externa	Ganhos dos Controladores PI da malha interna
$K_{pv} = 0,0440$	$K_{pi} = 1,1267$
$K_{iv} = 24,8629$	$K_{ii} = 1858,0162$

Fonte: Autoria Própria (2020).

#### 4.6.4 Projeto do controlador PI da Malha de Tensão do Barramento CC

Os parâmetros de projeto do controlador PI de tensão do barramento CC estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Especificações de projeto do controlador PI da malha de tensão do barramento CC.**

Frequência de cruzamento	$\omega_{cv} = 7,5\text{Hz}$
Margem de fase desejada	$MF_{dv} = 88,9^\circ$
Capacitância de filtragem	$C_{dc} = 2115\mu\text{F}$
Tensão no eixo síncrono direto	$v_d = 180\text{V}$
Tensão no barramento CC	$V_{dc} = 308\text{V}$

**Fonte: Autoria Própria (2020).**

Na Tabela 6 estão apresentados os ganhos dos controles obtidos por meio da modelagem da planta de tensão do barramento CC apresentada na seção 3.3 do capítulo 3 em conjunto com o procedimento de projeto do controlador PI.

**Tabela 6 - Ganhos dos controladores PI de corrente dos inversores.**

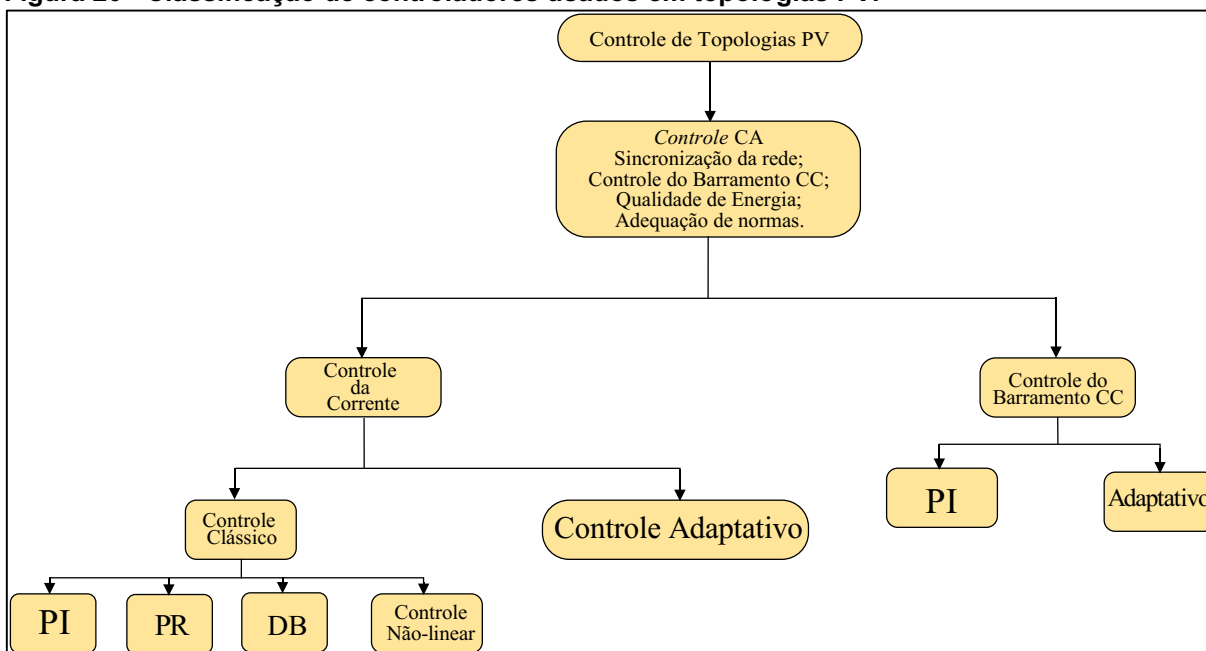
$K_{iv} = 0,3086$	$K_{pi} = 0,3410$
-------------------	-------------------

**Fonte: Autoria Própria (2020).**

#### 4.7 CONTROLE ADAPTATIVO

No contexto estudado, as estruturas que envolvem sistemas PV empregam técnicas de controle que podem ser classificadas conforme a Figura 20. O controle de conversores CC-CA consiste-se em duas malhas de controle: O controle da tensão do barramento CC que gera a referência para a malha de corrente, o controle do barramento CC possui um comportamento mais lento, enquanto que a malha de corrente é mais rápida e encarregada de realizar as interações com a rede elétrica, como requisitos de qualidade. Essa malha de corrente interna gera o sinal de referência para o bloco PWM (KOMURCUGIL; KUKRER, 2006).

**Figura 20 - Classificação de controladores usados em topologias PV.**



Fonte: Adaptado de Komurcugil (2020).

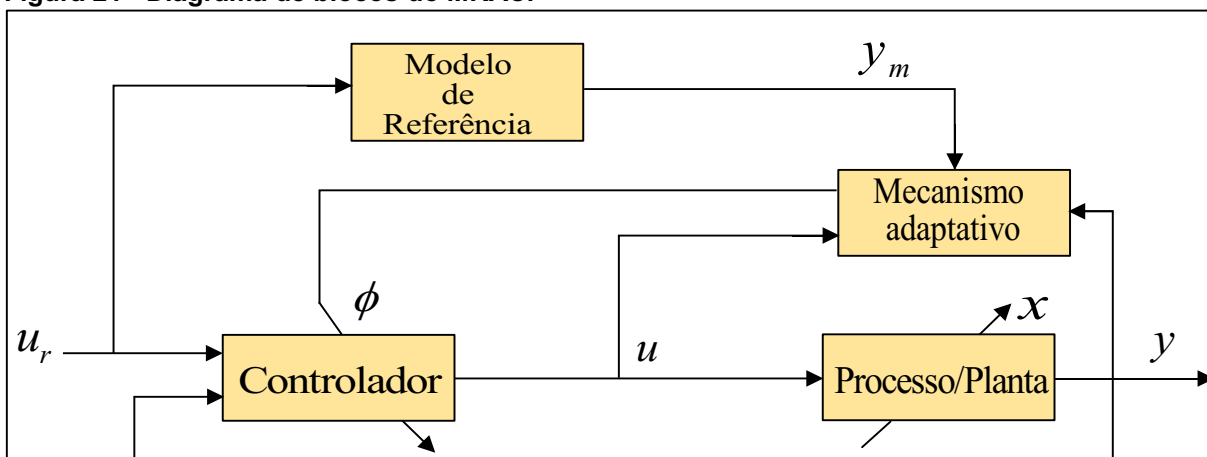
Nesse sentido, as técnicas de controle convencionais que utilizam ganhos fixos, tais como PI e PID, não são capazes de assegurar um bom desempenho do sistema perante aos pontos de operação variáveis, que é justamente o caso deste trabalho, que emprega sistemas PV que exibem características que afetam todos os parâmetros de saída do sistema, tais como corrente e tensão de saída.

Diante dessas circunstâncias, o controle adaptativo é uma alternativa para sistemas que apresentam mudanças na dinâmica ou ainda distúrbios, pois o mesmo tem a capacidade de alterar seu comportamento conforme essas tais mudanças.

#### 4.7.1 Controle Adaptativo por Modelo de Referência

O Controle Adaptativo por Modelo de Referência (*Model Reference Adaptive Control - MRAC*) pode ser analisado como tendo duas malhas de controle. Conforme ilustra a Figura 21, a malha interna consiste em uma malha de alimentação comum que engloba o controlador e o processo. A malha externa ajusta os parâmetros do controlador com base na função de erro gerada pela saída do modelo em relação ao processo (ASTROM; WITTENMARK, 2008).

Figura 21 - Diagrama de blocos do MRAC.

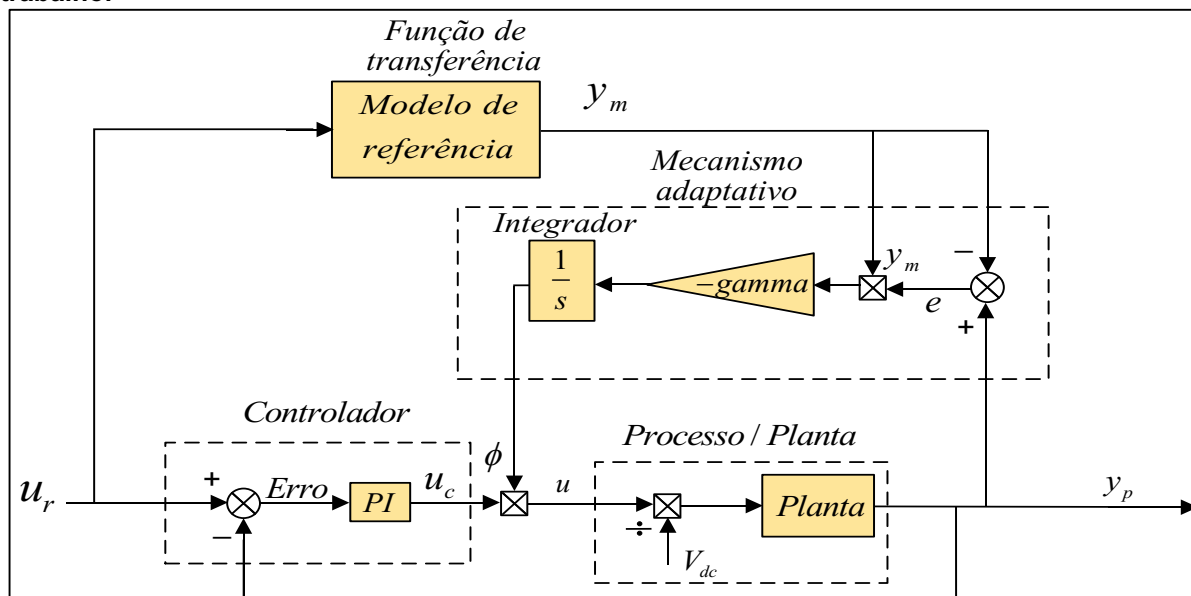


Fonte: Autoria Própria (2020).

A dinâmica do processo segue um modelo de referência e isso só é possível comparando a saída do modelo com a saída do processo. Essa diferença, denominada de erro, deve ser minimizada de acordo com as alterações dos parâmetros do controlador, de acordo com o mecanismo de ajuste. O objetivo é obter os melhores ganhos para que a saída do processo do sistema seja mais próxima com a saída do modelo (MACABO; TERRA, 2016).

O trabalho propõe um controlador MRAC cujo diagrama é ilustrado na Figura 22. Esse controlador é aplicado tanto no controle de tensão do barramento CC, quanto no de corrente.

Figura 22 - Diagrama de blocos do controle adaptativo por modelo de referência aplicado neste trabalho.



Fonte: Autoria Própria (2020).

O Modelo de Referência é responsável por modelar o comportamento desejado do sistema em malha fechada. Dessa forma, o mesmo indica como o sistema geral responde a uma determinada entrada.

O Modelo da planta tem como objetivo representar a modelagem matemática do sistema. Em ambas as aplicações, tanto no controle do barramento CC, quanto no controle de corrente, a tensão no barramento CC  $V_{dc}$  é considerada como variável ( $x$ ), já que esse parâmetro muda conforme condições de irradiação solar. O sinal gerado da planta é  $y_p$ , portanto o controlador deve adaptar seus valores de parâmetros para obter a resposta desejada de forma que expressa a equação (35).

$$e(t) = y_p(t) - y_m(t) \quad (35)$$

O Controlador PI é parte do controle que é fixa e os ganhos são ajustados para manter as condições iniciais da planta e obter um melhor desempenho geral. A característica mais interessante desse controlador é que os ganhos fixos do controlador PI no controle de corrente são projetados com as mesmas especificações de projeto do controlador PI convencional.

A variável de saída do mecanismo adaptativo é  $\phi$ . Essa variável se adapta com base no erro  $e$  entre a saída da planta  $y_p$  e a saída do Modelo de Referência  $y_m$ . A rapidez que pode se adaptar (ou alterar sua saída) depende do parâmetro chamado taxa de aprendizado  $gamma$ . Quanto maior o valor de  $gamma$ , mais rápido ele pode se adaptar a qualquer alteração da planta. Mas há efeitos que podem levar à instabilidade.

Ou seja, a ideia básica de adaptação é a seguinte: supõe-se que a componente do sinal de controle seja proveniente da variável  $y_m$  através do ganho  $gamma$ . Se o ganho não estiver perfeitamente correto, essa componente contribuirá para o erro de rastreamento  $e$ , portanto, o erro de rastreamento e o sinal  $y_m$  serão correlacionados. Essa correlação é usada para gerar a variável  $\phi$ .

$$\dot{\phi}(t) = gamma * e(t) * y_m(t) \quad (36)$$

A interação entre a variável de saída do mecanismo adaptativo e o controlador é  $u$ , representado por:

$$u = u_c * \theta \quad (37)$$

Por fim, a saída do controlador é dada por  $y_p$ , conforme:

$$y_p = V_{dc} * u * planta \quad (38)$$

Como  $V_{dc}$  é o parâmetro do modelo que pode variar, este foi desacoplado da planta que representa a função de transferência do sistema real. Na próxima seção é exemplificado com o projeto dos controladores.

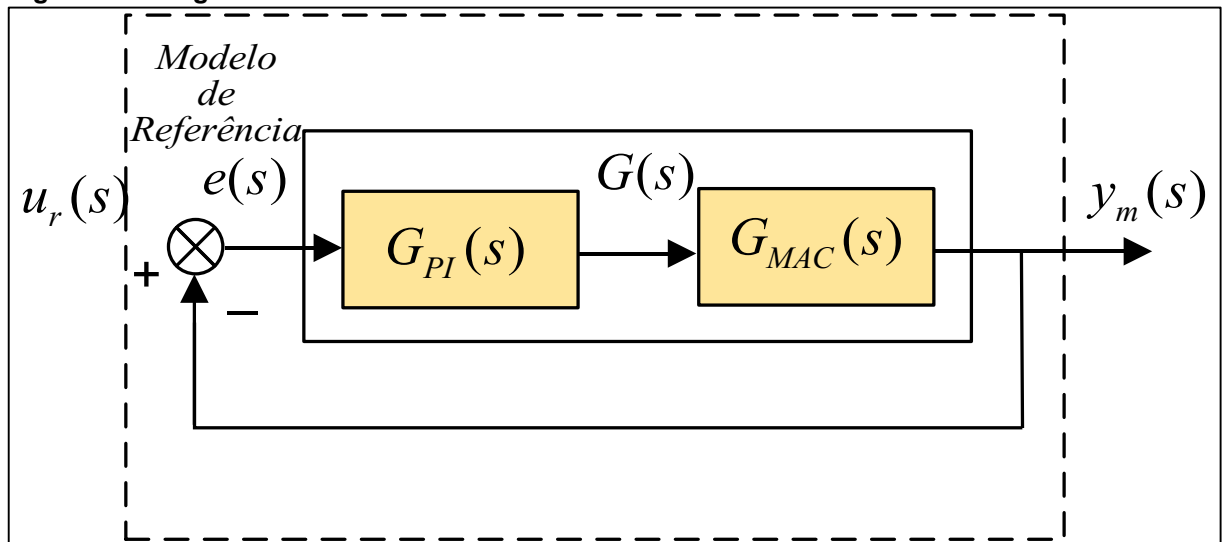
#### 4.7.2 Projeto dos Controladores Adaptativos

Seguem abaixo as três etapas envolvidas no projeto dos Controladores Adaptativos:

Etapa 1 – (Controlador PI) projetar os ganhos do controlador conforme o procedimento apresentado na seção 4.6. Como  $V_{dc}$  é a variável que se altera no sistema, a mesma foi desacoplada da função de transferência. Isso porque, posteriormente, os ganhos serão divididos pela real tensão do barramento CC.

Etapa 2 – (Modelo de Referência) é a função de transferência em malha fechada do sistema compensado  $G_{MFC}(s)$ . Para a obtenção da mesma, é necessário a função de transferência do controlador PI  $G_{PI}(s)$  (definida na equação (32)) e a função de transferência em malha aberta do sistema compensado  $G_{MAc}(s)$  (definida na equação (2) para o conversor série/paralelo operando com fonte de corrente e em (20) para a tensão do barramento CC.) A Figura 23 ilustra o diagrama de blocos da estrutura do sistema de controle em malha fechada.

Figura 23 - Diagrama de blocos do Modelo de Referência.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Em que  $G(s)$  é a multiplicação entre  $G_{PI}(s)$  e  $G_{MAC}(s)$ , como segue:

$$G(s) = G_{PI}(s) * G_{MAC}(s) \quad (39)$$

A função de transferência em malha fechada do sistema compensado é dada por:

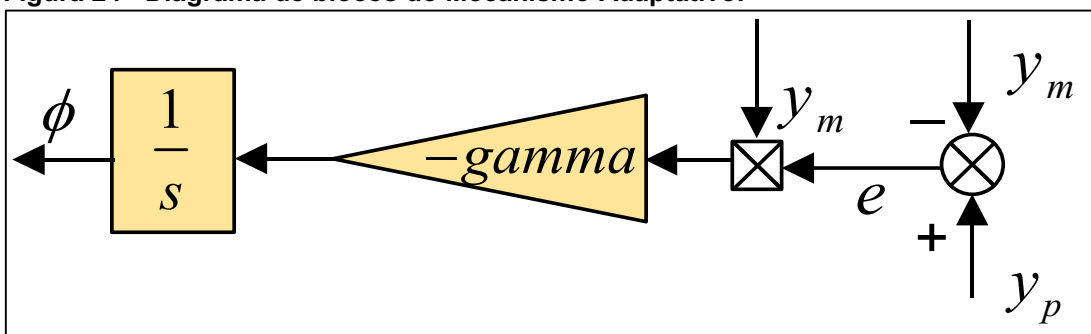
$$G_{MFC}(s) = \frac{y_m(s)}{u_r(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad (40)$$

É importante salientar que apesar de  $G_{PI}(s)$  e  $G_{MAC}(s)$  serem obtidos por meio da metodologia do controlador clássico PI, seus requisitos de projetos serão distintos, conforme apresentado no próximo capítulo.

Etapa 3 – Mecanismo adaptativo – A Figura 24 apresenta o diagrama de blocos do mecanismo adaptativo. Nota-se a presença de  $\gamma$ . É necessário determinar empiricamente um valor para  $\gamma$ , ou seja, não há critérios a serem adotados.



Figura 24 - Diagrama de blocos do Mecanismo Adaptativo.

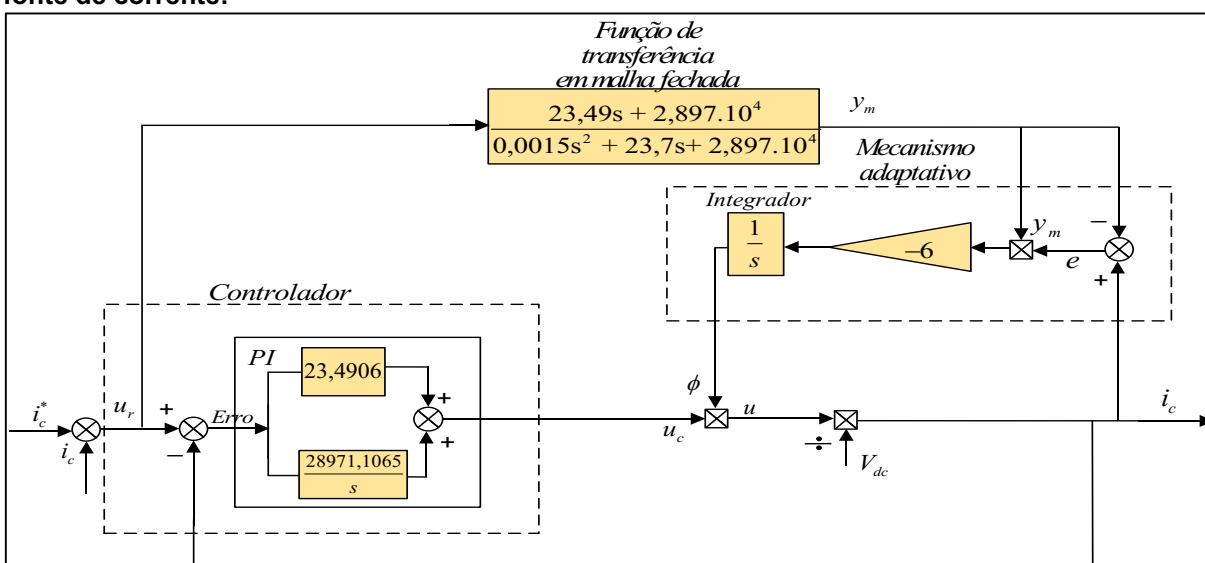


Fonte: Autoria Própria (2020).

#### 4.7.3 Projeto do controlador adaptativo dos conversores operando como fonte de corrente

Por meio da metodologia descrita na seção 4.7.2 foi possível obter os ganhos dos controladores adaptativos dos conversores paralelo/série (PV-C-UPQC/PV-D-UPQC) que operam como fonte de corrente. Sendo assim, os parâmetros de projeto estão apresentados na Tabela 7 e os ganhos obtidos na Tabela 8. A Figura 25 ilustra a arquitetura do controle adaptativo nos conversores que operam como fonte de corrente. Já a figura 26 apresenta as funções de transferências do Modelo de Referência.

Figura 25 - Arquitetura de blocos do controle adaptativo dos conversores que operam como fonte de corrente.



Fonte: Autoria Própria (2020).

**Tabela 7 - Especificações de projeto dos controladores adaptativo dos conversores que operam como fonte de corrente.**

Parâmetros	PV-C-UPQC	PV-D-UPQC
Frequência de cruzamento	$\omega_C = 2,5\text{kHz}$	$\omega_C = 2,5\text{kHz}$
Margem de fase desejada	$MF_{di} = 85^\circ$	$MF_{di} = 85^\circ$
Frequência de chaveamento	$f_{sw} = 20\text{kHz}$	$f_{sw} = 20\text{kHz}$
Indutância de acoplamento	$L_f = 2,4\text{mH}$	$L_f = 2,4\text{mH}$
Indutância do filtro	$L_{fp} = 1,5\text{mH}$	$L_{fs} = 1,5\text{mH}$
Resistência do filtro	$R_{fp} = 0,21\Omega$	$R_{fs} = 0,21\Omega$
Indutância de dispersão do transformador	-	$L_t = 115\mu\text{H}$
Resistência de dispersão do transformador	-	$R_t = 0,08\Omega$
Tensão no barramento CC do controlador PI	$V_{dc} = 1\text{V}$	$V_{dc} = 1\text{V}$
Tensão no barramento CC para modelo de referência	$V_{dc} = 308\text{V}$	$V_{dc} = 308\text{V}$
$\gamma$	-6	-6

Fonte: Autoria Própria (2020).

**Tabela 8 - Ganhos dos controladores adaptativos de corrente dos conversores que operam como fonte de corrente.**

Função de transferência em malha fechada do sistema compensado	Ganhos dos controladores PI de corrente dos inversores.
$\frac{23,49s + 2,897 \cdot 10^4}{0,0015s^2 + 23,7s + 2,897 \cdot 10^4}$	$K_{pi} = 23,4906$
	$K_{ii} = 28971,1065$

Fonte: Autoria Própria (2020).

A função de transferência em malha fechada do controle de corrente compensado é obtida utilizando a metodologia da Etapa 2 da seção 4.7.2:

Conforme apresenta a equação (40)  $G(s)$  é a multiplicação entre  $G_{PI}(s)$  e

$G_{MAC}(s)$ :

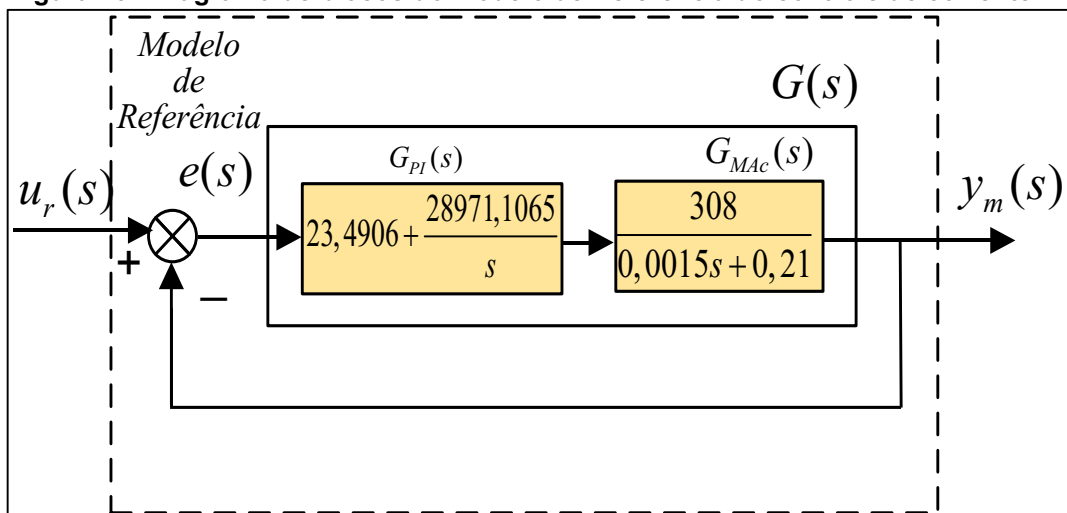
$$G(s) = \left( 23,4906 + \frac{28971,1065}{s} \right) * \left( \frac{308}{0,0015s + 0,21} \right)$$

$$= \frac{23,49s + 2,897 \cdot 10^4}{0,0015s^2 + 0,21s} \quad (41)$$

Logo, a função de transferência do sistema compensado:

$$G_{MFC}(s) = \frac{y_m(s)}{u_r(s)} = \frac{23,49s + 2,897 \cdot 10^4}{0,0015s^2 + 23,7s + 2,897 \cdot 10^4} \quad (42)$$

Figura 26 - Diagrama de blocos do Modelo de Referência do controle de corrente.



Fonte: Autoria Própria (2020).

#### 4.7.4 Projeto do controlador adaptativo da Malha de Tensão do Barramento CC

Os parâmetros de projeto do controlador adaptativo de tensão do barramento CC estão apresentados na Tabela 9. Os ganhos obtidos estão dispostos na Tabela 10 e a Figura 27 apresenta a arquitetura do diagrama de blocos do controle adaptativo.

**Tabela 9 - Especificações de projeto do controlador adaptativo da malha de tensão do barramento CC.**

Parâmetros	PV-C-UPQC	PV-D-UPQC
Frequência de cruzamento	$\omega_{Cv} = 500\text{Hz}$	$\omega_{Cv} = 500\text{Hz}$
Margem de fase desejada	$MF_{dv} = 85^\circ$	$MF_{dv} = 85^\circ$
Capacitância do barramento CC	$C_{dc} = 2115\mu\text{F}$	$C_{dc} = 2115\mu\text{F}$
Tensão no eixo síncrono direto	$v_d = 180\text{V}$	$v_d = 180\text{V}$
Tensão no barramento CC do controlador PI	$V_{dc} = 1\text{V}$	$V_{dc} = 1\text{V}$
Tensão no barramento CC para modelo de referência	$V_{dc} = 308\text{V}$	$V_{dc} = 308\text{V}$
<i>gamma</i>	-6	-6

Fonte: Aatoria Própria (2020).

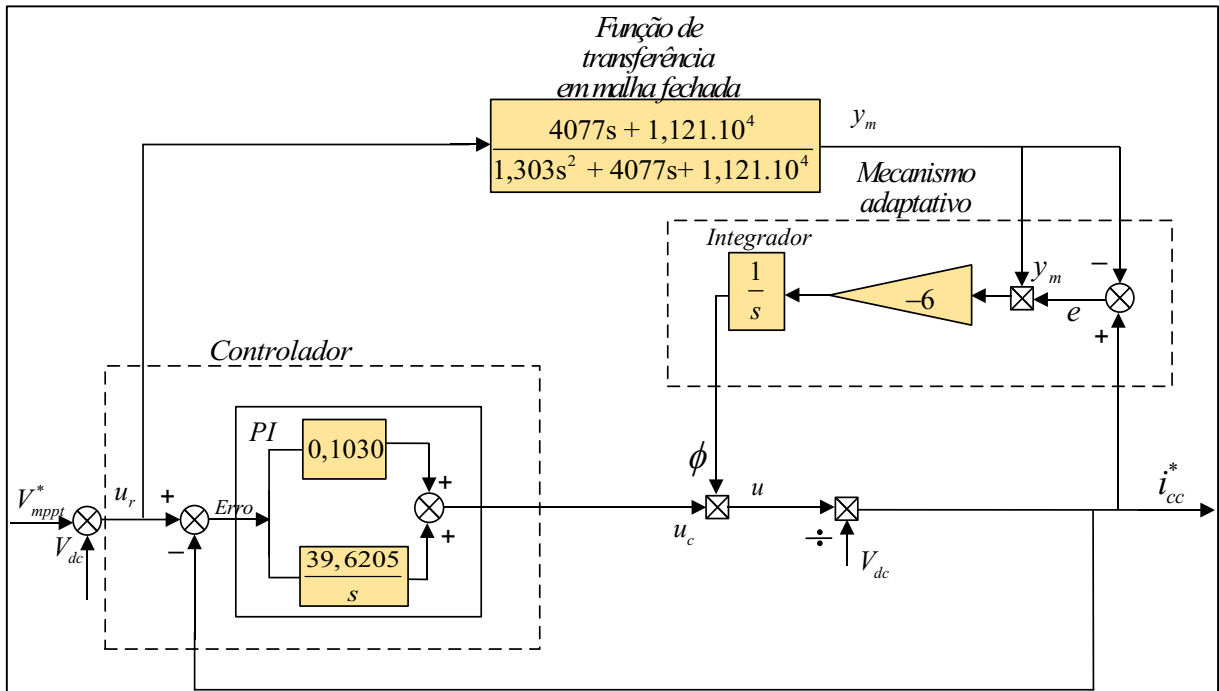
**Tabela 10 - Ganhos dos controladores PI de corrente dos inversores.**

Função de transferência em malha fechada do sistema compensado	Ganhos dos controladores PI de corrente dos inversores.
$\frac{4077s + 1,121 \cdot 10^6}{1,303s^2 + 4077s + 1,121 \cdot 10^6}$	$K_{pv} = 0,1030$
	$K_{iv} = 39,6205$

Fonte: Aatoria Própria (2020).

Assim como apresentando na seção 4.7.3, a função de transferência em malha fechada do controle de tensão do barramento CC compensado é obtida utilizando a metodologia da Etapa 2 da seção 4.7.2.

Figura 27 - Arquitetura de blocos do controle adaptativo da malha de tensão do barramento CC.



Fonte: Autoria Própria (2020).

## CAPÍTULO 5 – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do sistema PV-UPQC operando nos modos dual e convencional e considerando as estratégias de controle clássica e adaptativa. As validações das concepções teóricas são obtidas por meio de simulações computacionais realizadas no software MATLAB, ambiente *Simulink*. O sistema de controle adaptativo deve garantir, em comparação ao clássico, melhores resultados de desempenhos (estático e dinâmico). Em relação ao comportamento da tensão do barramento CC perante as situações de alteração de carga e variação de irradiação, deve otimizar o aproveitamento dos recursos de geração de energia e ainda apresentar um melhor desempenho em relação a taxa de distorção harmônica de corrente na rede elétrica. Também, além da estrutura de potência do sistema PV-UPQC, foram implementados os algoritmos do SRF e MPPT P&O.

As simulações foram realizadas considerando um sistema elétrico monofásico alimentando cargas não lineares com suas respectivas DHT de corrente, conforme apresentado na Tabela 11. As estruturas utilizadas no presente estudo estão dispostas na Tabela 12. Já os parâmetros utilizados na construção do modelo de simulação para o módulo solar *Sunmodule SW 245*, do fabricante *SolarWord*, em condições padrão de teste estão dispostos na Tabela 13. Nas simulações foram considerados 10 módulos em série, logo, o controle do barramento CC foi controlado em 308V.

**Tabela 11 - Parâmetros das duas cargas simuladas.**

Carga 1 – Retificador monofásico de onda completa com carga RL	$R = 12\Omega$	$L = 200\text{mH}$	DHT=37,04%
Carga 2 – Retificador monofásico de onda completa com carga RL	$R = 6\Omega$	$L = 200\text{mH}$	DHT=34,58%

Fonte: Autoria Própria (2020).

**Tabela 12 - Especificações de simulação da topologia PV-UPQC .**

Tensão eficaz na rede elétrica	$V_s = 127V$
Frequência nominal da rede elétrica	$f_s = 60Hz$
Tensão no barramento CC	$V_{dc} = 308V$
Capacitância do barramento CC	$C_{dc} = 2115\mu F$
Frequência de chaveamento	$f_{sw} = 20kHz$
<b>PV-C-UPQC</b>	
Indutor de acoplamento do inversor paralelo	$L_{fp} = 1,5mH$
Resistência interna do indutor de acoplamento do inversor paralelo	$R_{fp} = 0,21\Omega$
Indutor de dispersão do transformador de acoplamento paralelo	$L_t = 115\mu H$
Resistência de dispersão do transformador de acoplamento paralelo	$R_t = 0,08\Omega$
Indutor de acoplamento do inversor série	$L_{fs} = 1,73mH$
Resistência interna do indutor de acoplamento do inversor série	$R_{fs} = 0,21\Omega$
<b>PV-D-UPQC</b>	
Indutor de acoplamento do inversor série	$L_{fs} = 1,5mH$
Resistência interna do indutor de acoplamento do inversor série	$R_{fs} = 0,21\Omega$
Indutor de dispersão do transformador de acoplamento série	$L_t = 115\mu H$
Resistência de dispersão do transformador de acoplamento série	$R_t = 0,08\Omega$
Indutor de acoplamento do inversor paralelo	$L_{fp} = 1,73mH$
Resistência interna do indutor de acoplamento do inversor paralelo	$R_{fp} = 0,21\Omega$

Fonte: Autoria Própria (2020).

**Tabela 13 - Parâmetros do módulo solar Sunmodule SW 245 poly (STC°).**

Máxima Potência	$P_{m\acute{a}x} = 245W$
Tensão Máxima	$V_{mpp} = 30.8V$
Corrente Máxima	$I_{mpp} = 7,96A$
Corrente de curto circuito	$I_{sc} = 8,25A$
Tensão de circuito aberto	$V_{oc} = 37.7V$

Fonte: SolarWord (2017).

## 5.1 COMPORTAMENTO ESTÁTICO DO SISTEMA PV-UPQC

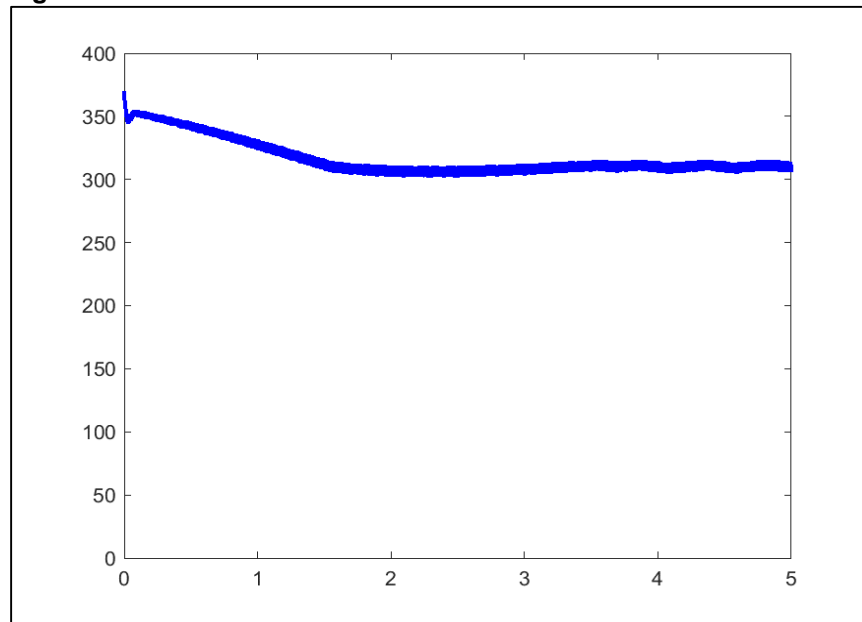
Neste modo de operação, para ambas estratégias de compensação, considerou-se a situação que o sistema PV opera em STC, e alimenta a carga titulada como carga 1, conforme apresentada na Tabela 11. Também nesta análise são consideradas tensões de rede não senoidais, em que há à presença de harmônicos de 3° e 5° ordem. É importante ressaltar que para a supressão de harmônicos de

tensão em ambas simulações foram aplicados o controle clássico. A seção 5.1.2 apresenta os resultados utilizando estratégia convencional (C) e a seção 5.1.3 apresenta os resultados da estratégia de compensação dual (D).

#### 5.1.2 Comportamento estático do sistema PV-C-UPQC com controle clássico

As Figuras 28 e 29 apresentam os resultados obtidos em uma simulação para o sistema PV-C-UPQC operando com o controle clássico, nas condições apresentadas na seção 5.1. A Figura 28 apresenta a tensão do barramento CC. Na Figura 29 são mostradas as formas de onda da tensão da rede ( $v_s$ ), corrente na carga ( $i_L$ ), tensão na carga ( $v_L$ ) e corrente da rede ( $i_s$ ). É possível notar que a UPQC realiza a supressão de harmônico de corrente e também os harmônicos de tensão.

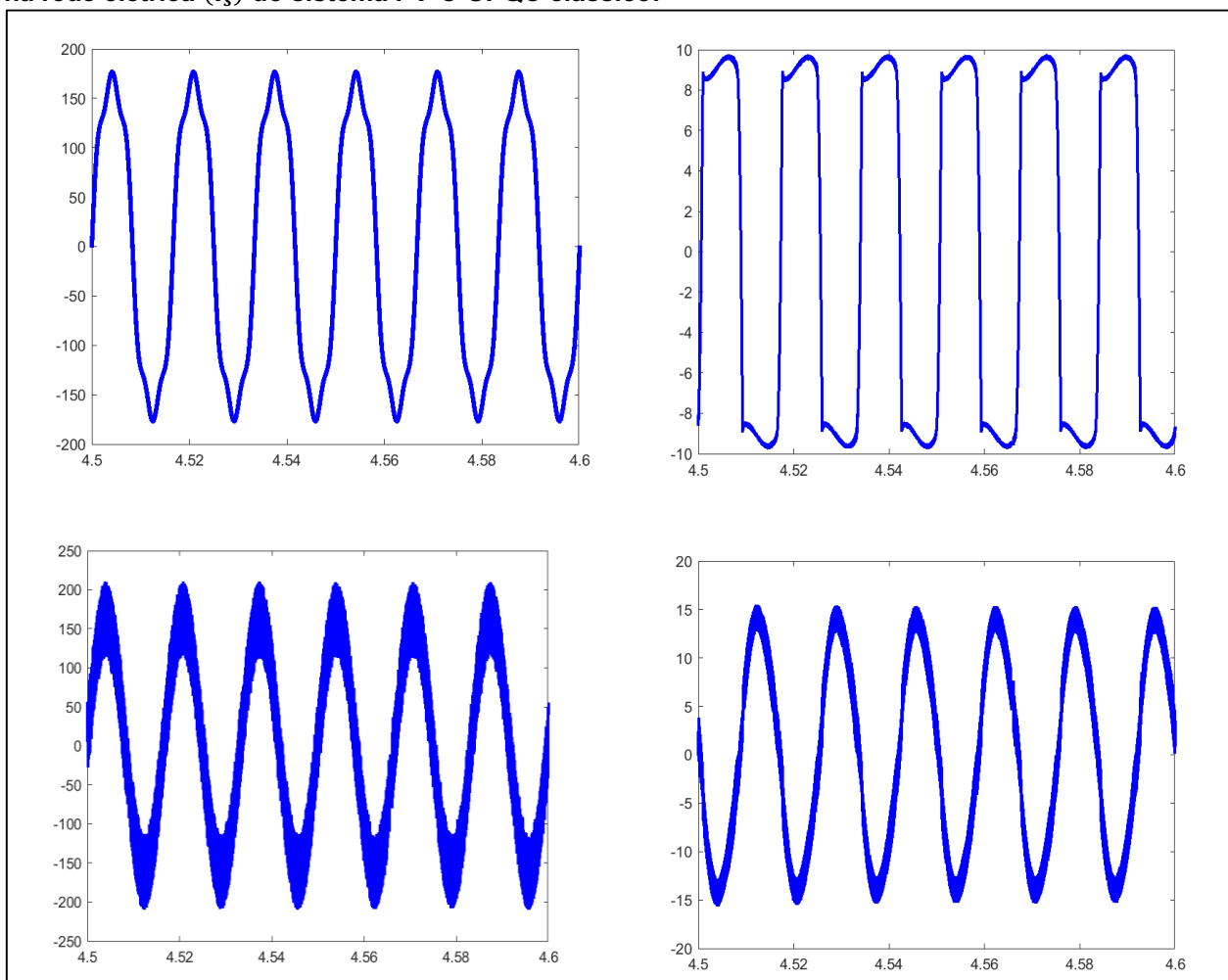
**Figura 28 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-C-UPQC clássico.**



Fonte: Autoria Própria (2020).



**Figura 29 - Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ), corrente da carga ( $i_L$ ), tensão na carga ( $v_L$ ), e corrente na rede elétrica ( $i_s$ ) do sistema PV-C-UPQC clássico.**



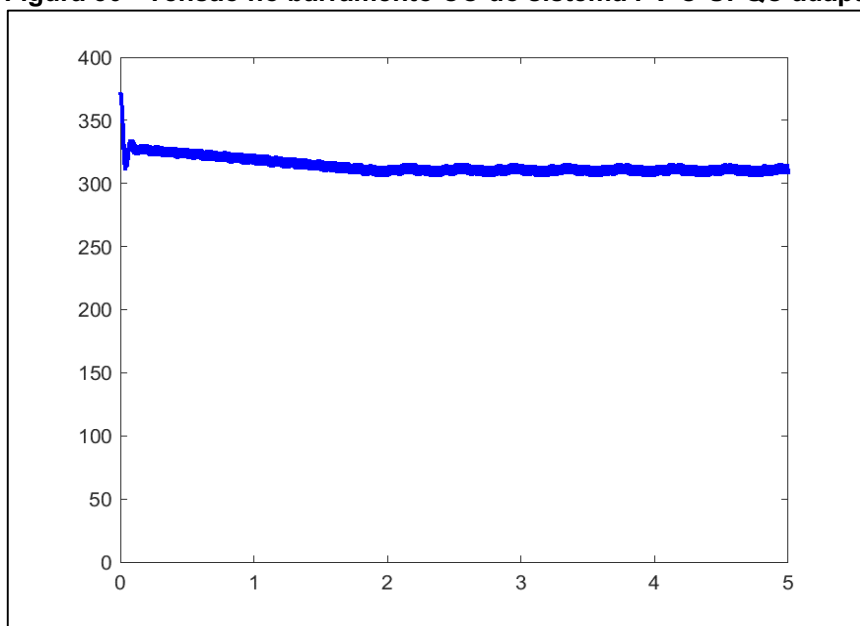
Fonte: Autoria Própria (2020).

### 5.1.3 Comportamento estático do sistema PV-C-UPQC com controle adaptativo

Os resultados de simulação para a PV-C-UPQC operando com o controle adaptativo estão dispostos entre a Figuras 30 a 33. A Figura 30 exibe a tensão no barramento CC. Já na Figura 31 estão mostradas as formas de onda da tensão da rede ( $v_s$ ), corrente na carga ( $i_L$ ), tensão na carga ( $v_L$ ) e corrente da rede ( $i_s$ ).

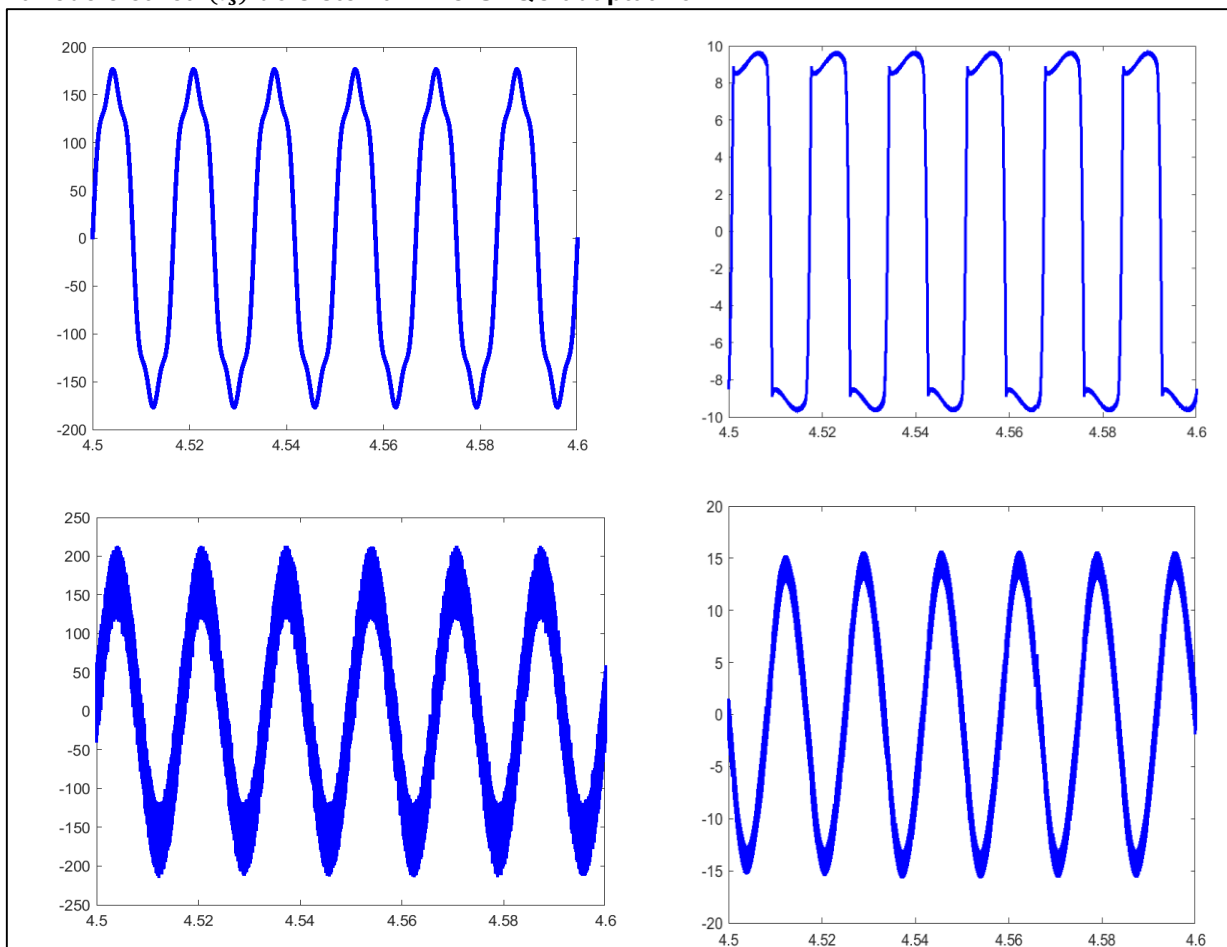
A Figura 32 mostra o sinal de referência e o sinal de saída do controle de corrente e a Figura 33 apresenta o sinal de referência e o sinal de saída do controle do barramento CC.

Figura 30 - Tensão no barramento CC do sistema PV-C-UPQC adaptativo.



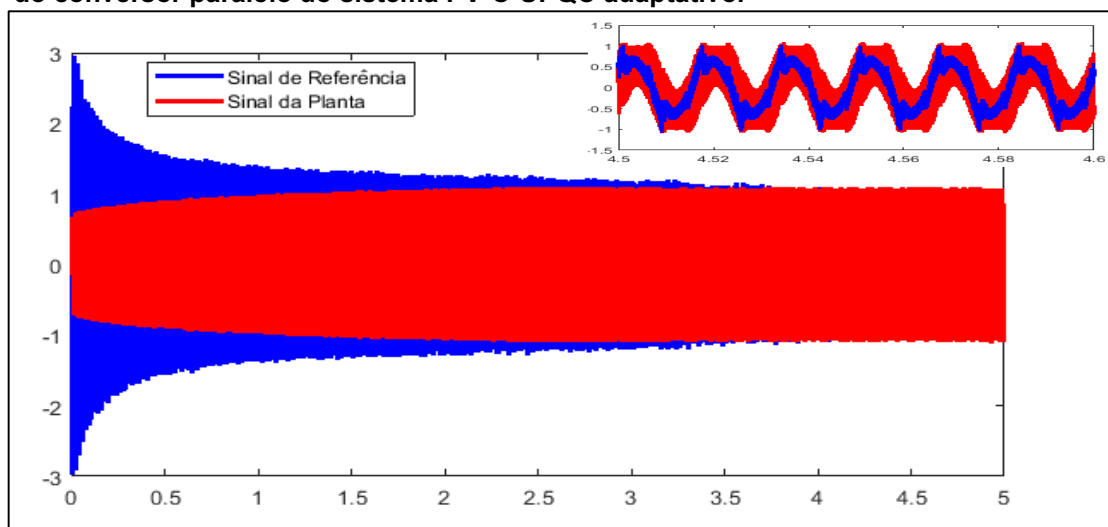
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 31 - Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ), corrente da carga ( $i_L$ ), tensão na carga ( $v_L$ ), e corrente na rede elétrica ( $i_s$ ) do sistema PV-C-UPQC adaptativo.



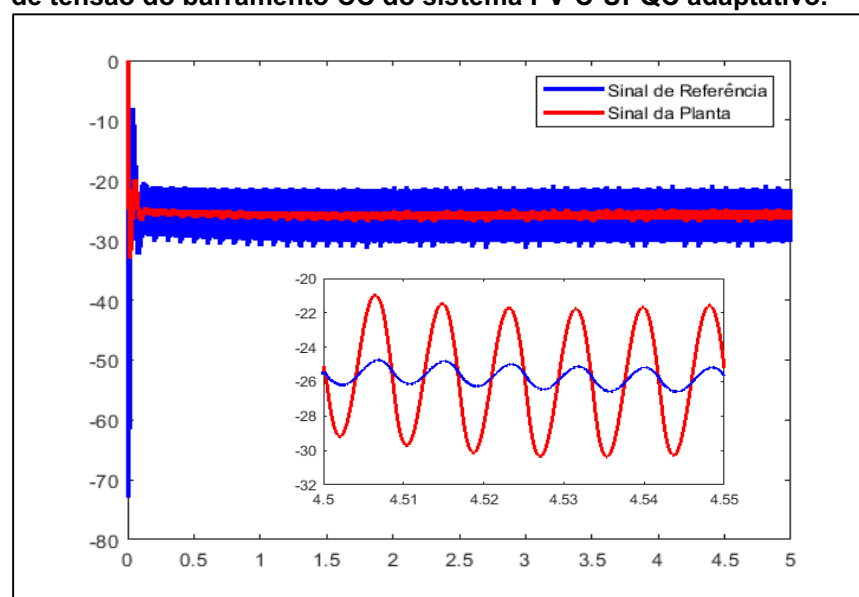
Fonte: Autoria Própria (2020).

**Figura 32 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de corrente do conversor paralelo do sistema PV-C-UPQC adaptativo.**



Fonte: Autoria Própria (2020).

**Figura 33 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de tensão do barramento CC do sistema PV-C-UPQC adaptativo.**



Fonte: Autoria Própria (2020).

### 5.1.3 Resultados da DHT do sistema PV-C-UPQC

A Tabela 14 apresenta as taxas de distorção harmônica total DHT das correntes da rede elétrica para o sistema PV-C-UPQC empregado o controle clássico e adaptativo. Já a Tabela 15 apresenta a DTH para tensão da carga, ambas com controle clássico.

**Tabela 14 - Distorção Harmônica Total na rede elétrica no sistema PV-C-UPQC.**

DHT $i_s$ [%]	DHT $i_s$ [%]	Diferença percentual [%]
Clássico	Adaptativo	
6,95	3,31	52,37

Fonte: Autoria Própria (2020).

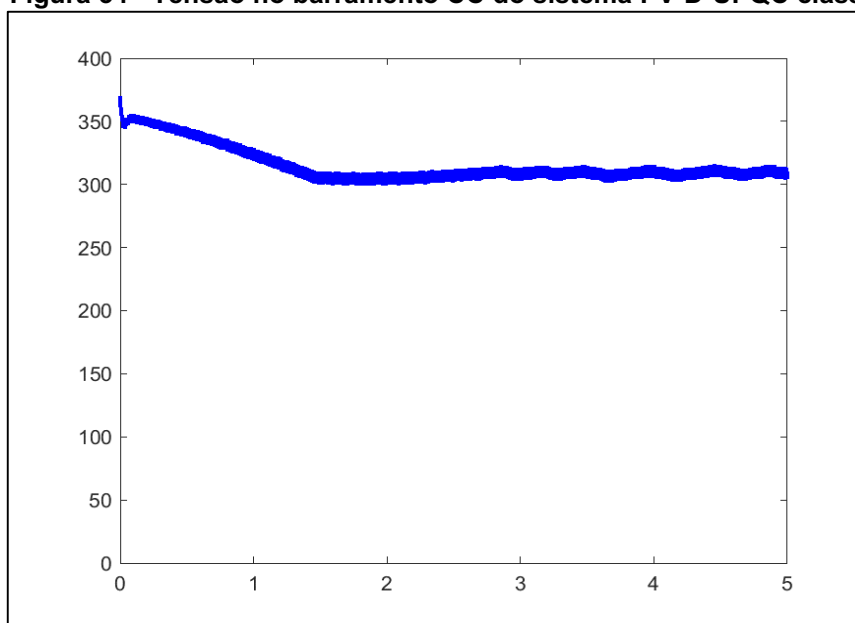
**Tabela 15 - Distorção Harmônica Total na carga no sistema PV-C-UPQC.**

DHT $v_s$ [%]	DHT $v_L$ [%]	DHT $v_L$ [%]
	Clássico	Clássico
13,02	1,08	1,12

Fonte: Autoria Própria (2020).

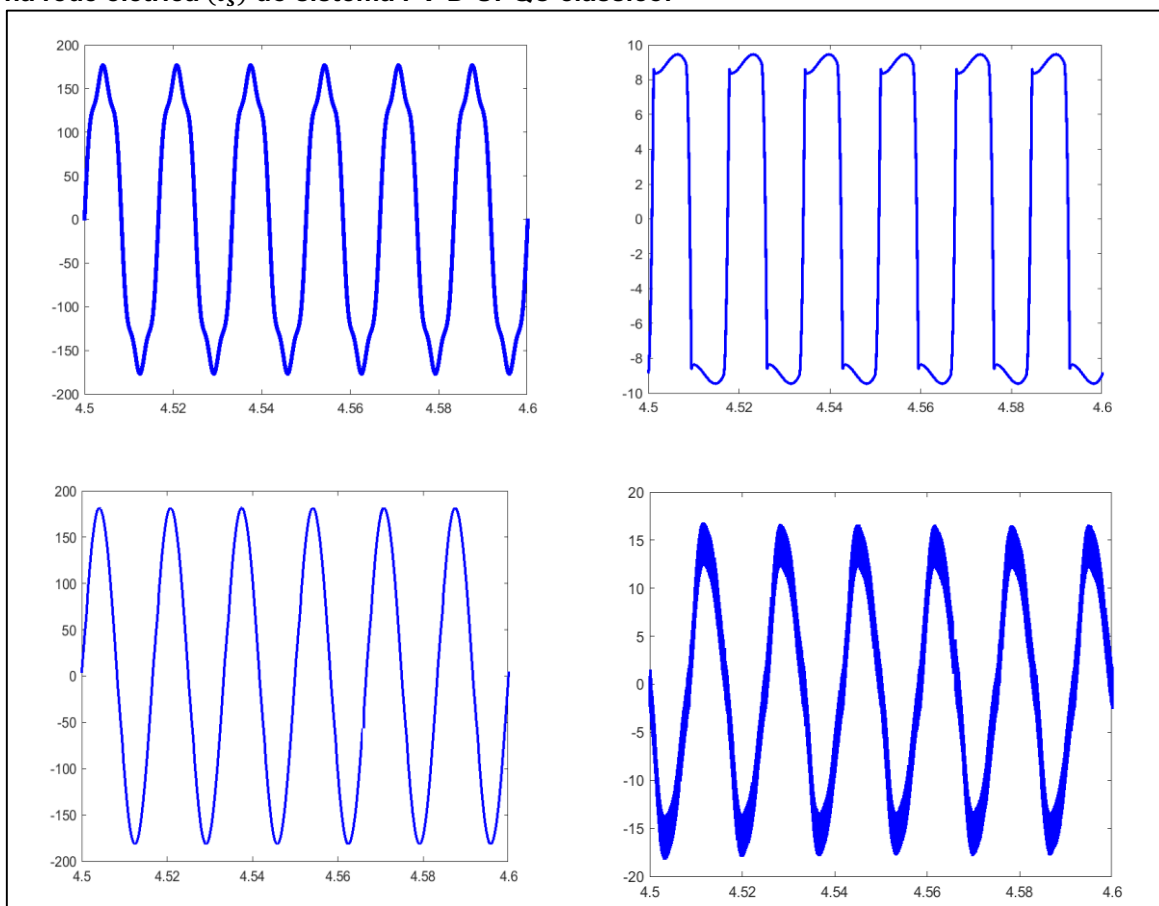
#### 5.1.4 Comportamento estático do sistema PV-D-UPQC com controle clássico

Para o modo dual, foram obtidas as mesmas informações. As Figuras 34 e 35 apresentam os resultados obtidos em uma simulação para o sistema operando com o controle clássico, nas condições apresentadas na seção 5.1. A Figura 34 apresenta a tensão do barramento CC. Na figura 35 são mostradas as formas de onda da tensão da rede ( $v_s$ ), corrente na carga ( $i_L$ ), tensão na carga ( $v_L$ ) e corrente da rede ( $i_s$ ).

**Figura 34 - Tensão no barramento CC do sistema PV-D-UPQC clássico.**

Fonte: Autoria Própria (2020).

**Figura 35 - Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ), corrente da carga ( $i_L$ ), tensão na carga ( $v_L$ ), e corrente na rede elétrica ( $i_s$ ) do sistema PV-D-UPQC clássico.**



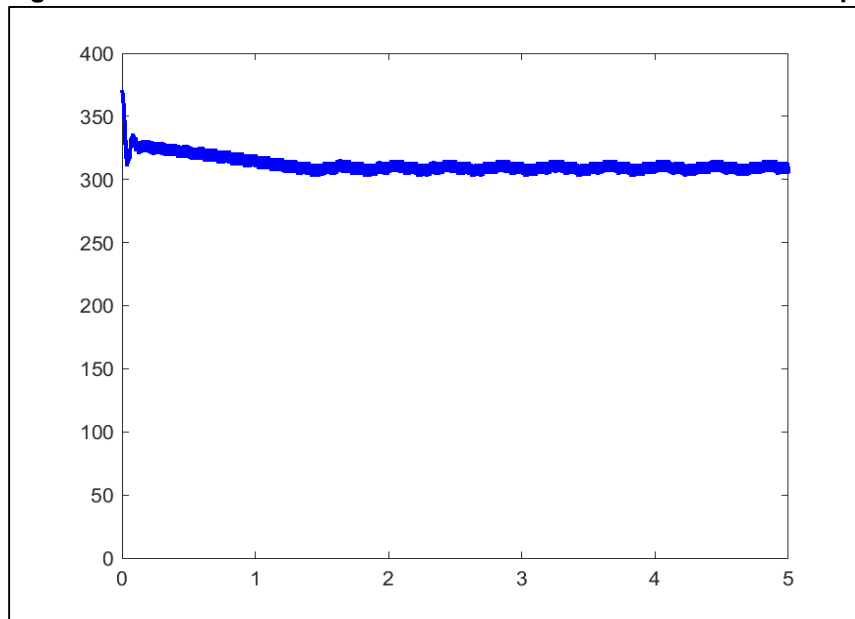
Fonte: Autoria Própria (2020).

### 5.1.5 Comportamento estático do sistema PV-D-UPQC com controle adaptativo

Os resultados de simulação para a PV-D-UPQC operando com o controle adaptativo estão dispostos entre a Figura 36 a 39. A Figura 36 apresenta a tensão no barramento CC. Já na Figura 37 estão mostradas as formas de onda da tensão da rede ( $v_s$ ), corrente na carga ( $i_L$ ), tensão na carga ( $v_L$ ) e corrente da rede ( $i_s$ ).

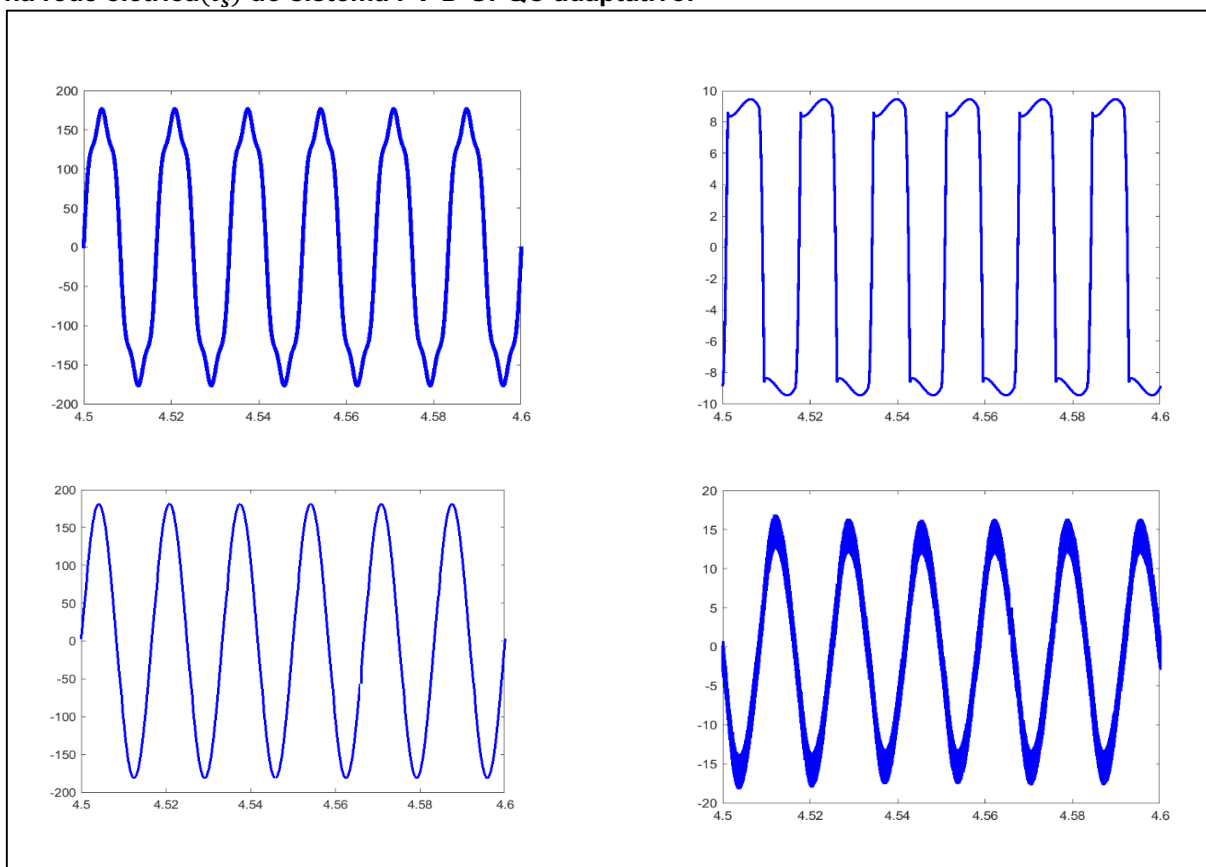
A Figura 38 apresenta o sinal de referência e o sinal de saída do controle de corrente e a Figura 39 apresenta o sinal de referência e o sinal de saída do controle do barramento CC.

**Figura 36 - Tensão no barramento CC do sistema PV-D-UPQC adaptativo.**



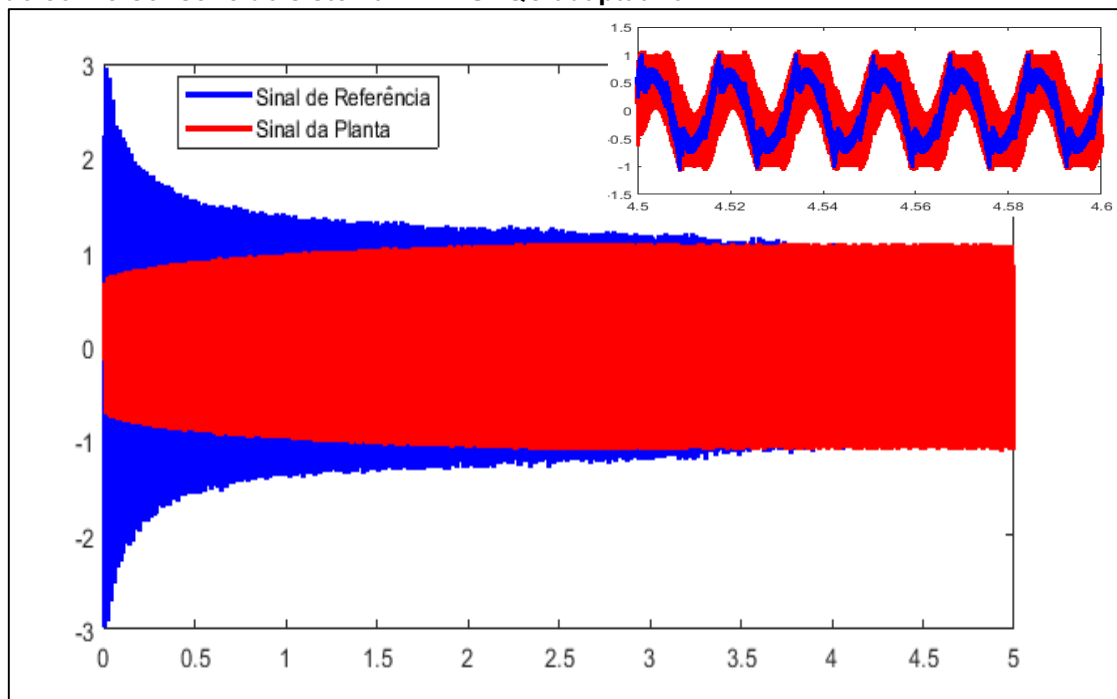
Fonte: Autoria Própria (2020).

**Figura 37 - Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ), corrente da carga ( $i_L$ ), tensão na carga ( $v_L$ ), e corrente na rede elétrica ( $i_s$ ) do sistema PV-D-UPQC adaptativo.**



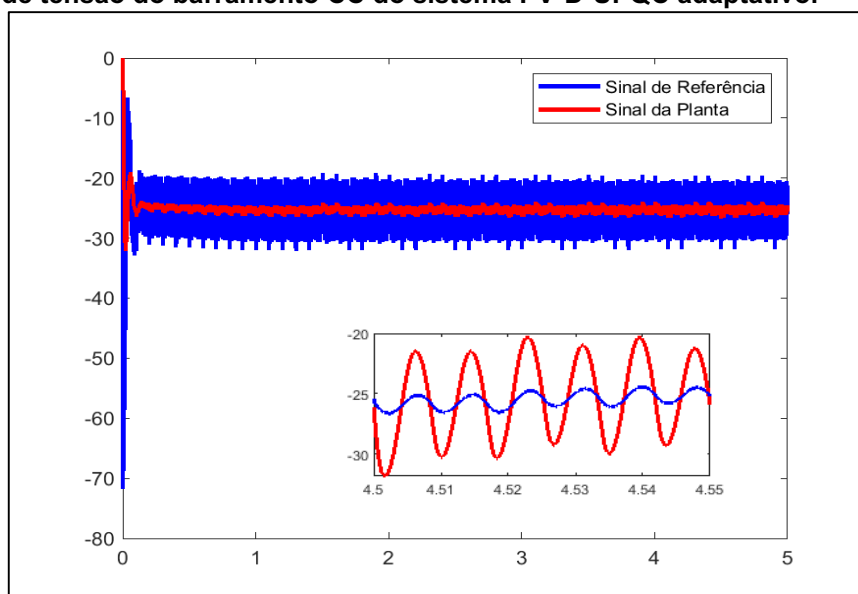
Fonte: Autoria Própria (2020).

**Figura 38 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de corrente do conversor série do sistema PV-D-UPQC adaptativo.**



Fonte: Autoria Própria (2020).

**Figura 39 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de tensão do barramento CC do sistema PV-D-UPQC adaptativo.**



Fonte: Autoria Própria (2020).

### 5.1.6 Resultados da DHT do sistema PV-D-UPQC

A Tabela 16 exhibe as taxas de distorção harmônica total (DHT) das correntes da rede elétrica para o sistema PV-D-UPQC empregado o controle clássico e

adaptativo. Já a Tabela 17 apresenta a DHT para tensão da carga, ambas com controle clássico.

**Tabela 16 - Distorção Harmônica Total na rede elétrica no sistema PV-D-UPQC.**

DHT $i_s$ [%]	DHT $i_s$ [%]	Diferença percentual [%]
Clássico	Adaptativo	
8,55	3,96	53,68

Fonte: Aatoria Própria (2020).

**Tabela 17 - Distorção Harmônica Total na carga no sistema PV-D-UPQC.**

DHT $v_s$ [%]	DHT $v_L$ [%]	DHT $v_L$ [%]
	Clássico	Clássico
13,02	1,12	1,42

Fonte: Aatoria Própria (2020).

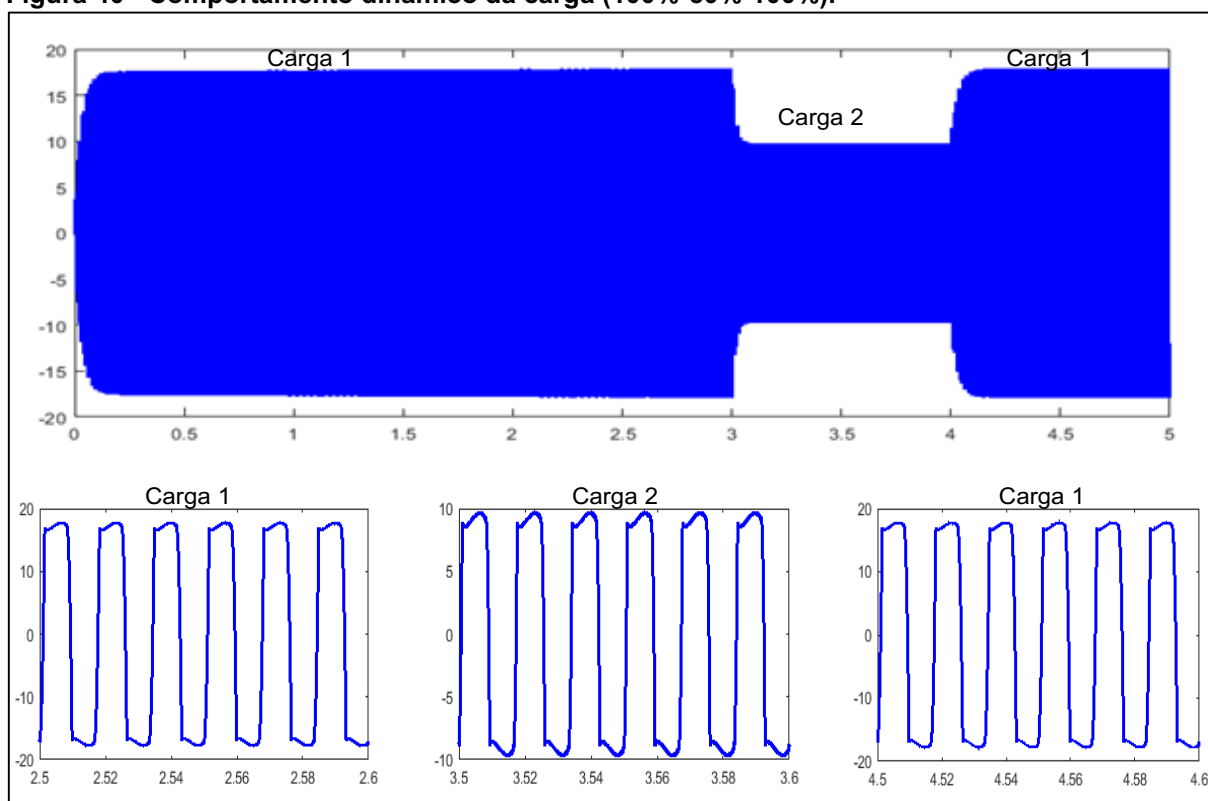
## 5.2 COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA PV-UPQC

Os sistemas PV-UPQC foram implementados para dois modos distintos para análise e validação do controle adaptativo do comportamento dinâmico, sendo estes descritos a seguir:

Modo de Operação 1 (MOP 1) – Neste modo de operação ocorre degrau de carga, conforme exibe a Figura 40. Inicialmente a carga 1 está em operação. Em 3 segundos entra a carga 2 e aos 4 segundos a carga 1 entra novamente.



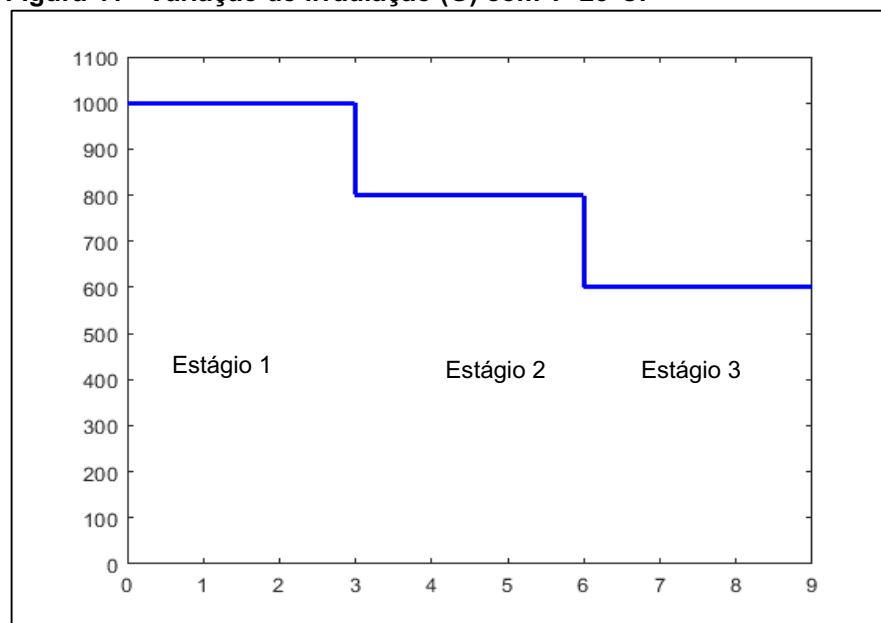
**Figura 40 - Comportamento dinâmico da carga (100%-50%-100%).**



Fonte: Autoria Própria (2020).

Modo de Operação 2 (MOP 2) – Para essa análise do comportamento dinâmico do sistema PV-UPQC são consideradas diferentes valores de irradiações ( $1000\text{W}/\text{m}^2 - 800\text{W}/\text{m}^2 - 600\text{W}/\text{m}^2$ ), cujo comportamento está exibido na Figura 41. A temperatura se mantém em  $25^\circ\text{C}$ .

**Figura 41 - Variação de irradiação (G) com  $T=25^\circ\text{C}$ .**



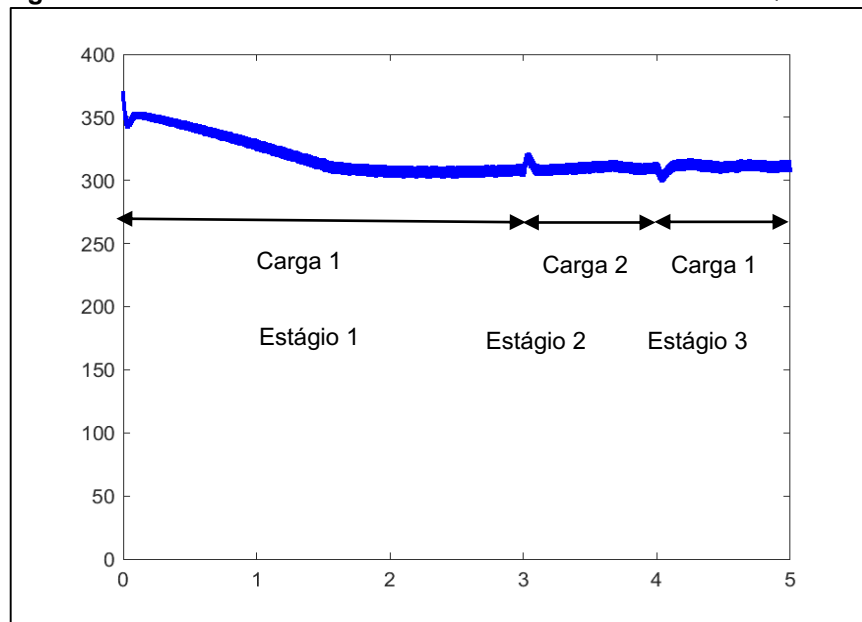
Fonte: Autoria Própria (2020).

Em ambos modos de operação não há nenhum distúrbio de tensão na rede elétrica. Ou seja, é senoidal com amplitude nominal.

### 5.2.1 Comportamento dinâmico do sistema PV-C-UPQC com controle clássico (Modo de Operação 1)

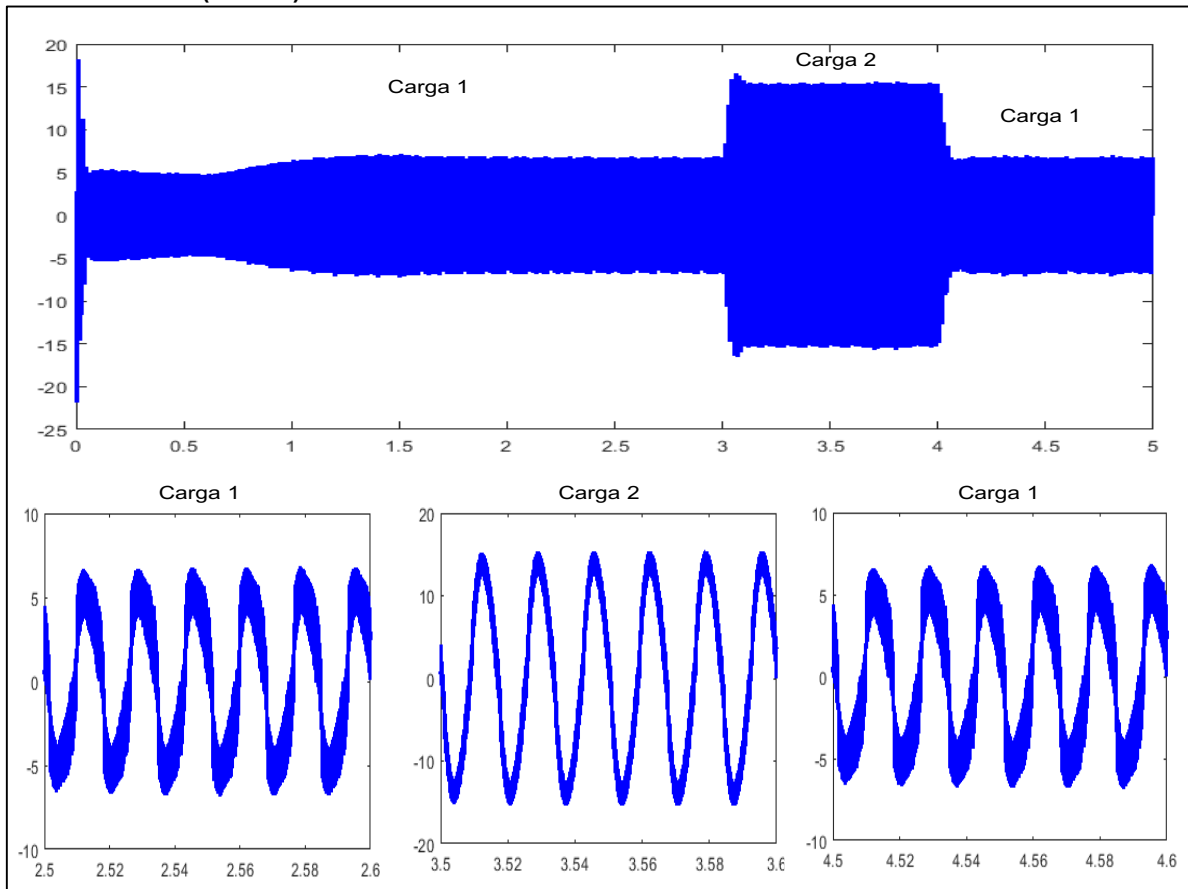
A Figura 42 mostra o comportamento da tensão do barramento CC para os degraus de carga do sistema PV-C-UPQC. A Figura 43 apresenta o comportamento da corrente da rede ( $i_s$ ) e a Figura 44 a tensão da rede ( $v_s$ ), tensão na carga ( $v_L$ ) .

**Figura 42 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-C-UPQC clássico (MOP 1).**



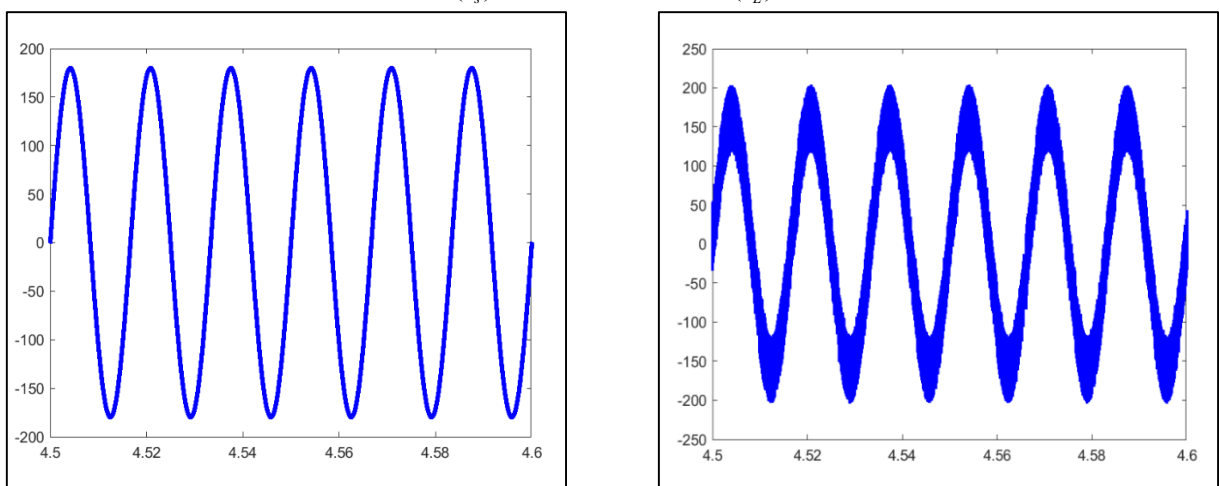
Fonte: Autoria Própria (2020).

**Figura 43 - Comportamento dinâmico da rede elétrica ( $i_s$ ) para variação de carga em PV-C-UPQC clássico (MOP 1).**



Fonte: Autoria Própria (2020).

**Figura 44 - Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ) e tensão na carga ( $v_L$ ).**



(a) Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ).

Fonte: Autoria Própria (2020).

(b) Tensão na carga ( $v_L$ ).

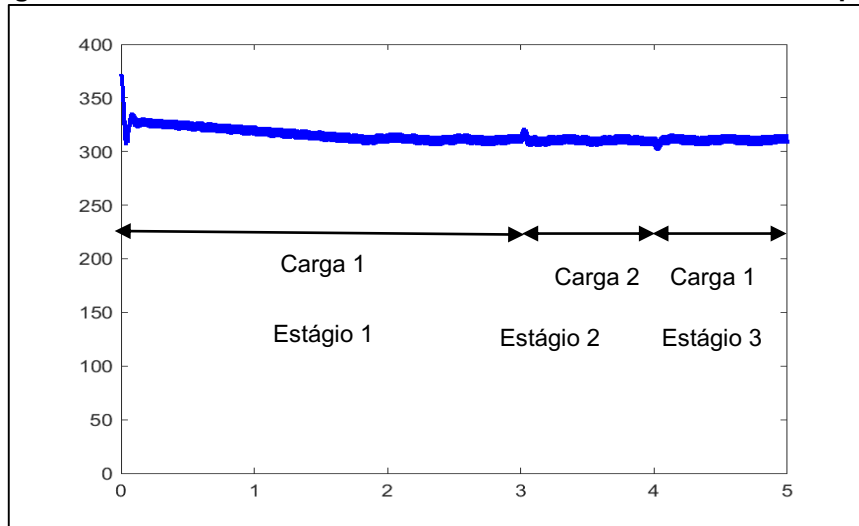
Fonte: Autoria Própria (2020)

5.2.2 Comportamento dinâmico do sistema PV-C-UPQC com controle adaptativo (Modo de Operação 1)

Os resultados apresentados a seguir são referentes ao sistema PV-C-UPQC empregando o controle adaptativo. A Figura 45 mostra o comportamento da tensão no barramento CC. A Figura 46 exibe a corrente na rede elétrica ( $i_s$ ) para os degraus de carga. A Figura 47 apresenta a tensão na rede elétrica ( $v_s$ ) e na carga ( $v_L$ ).

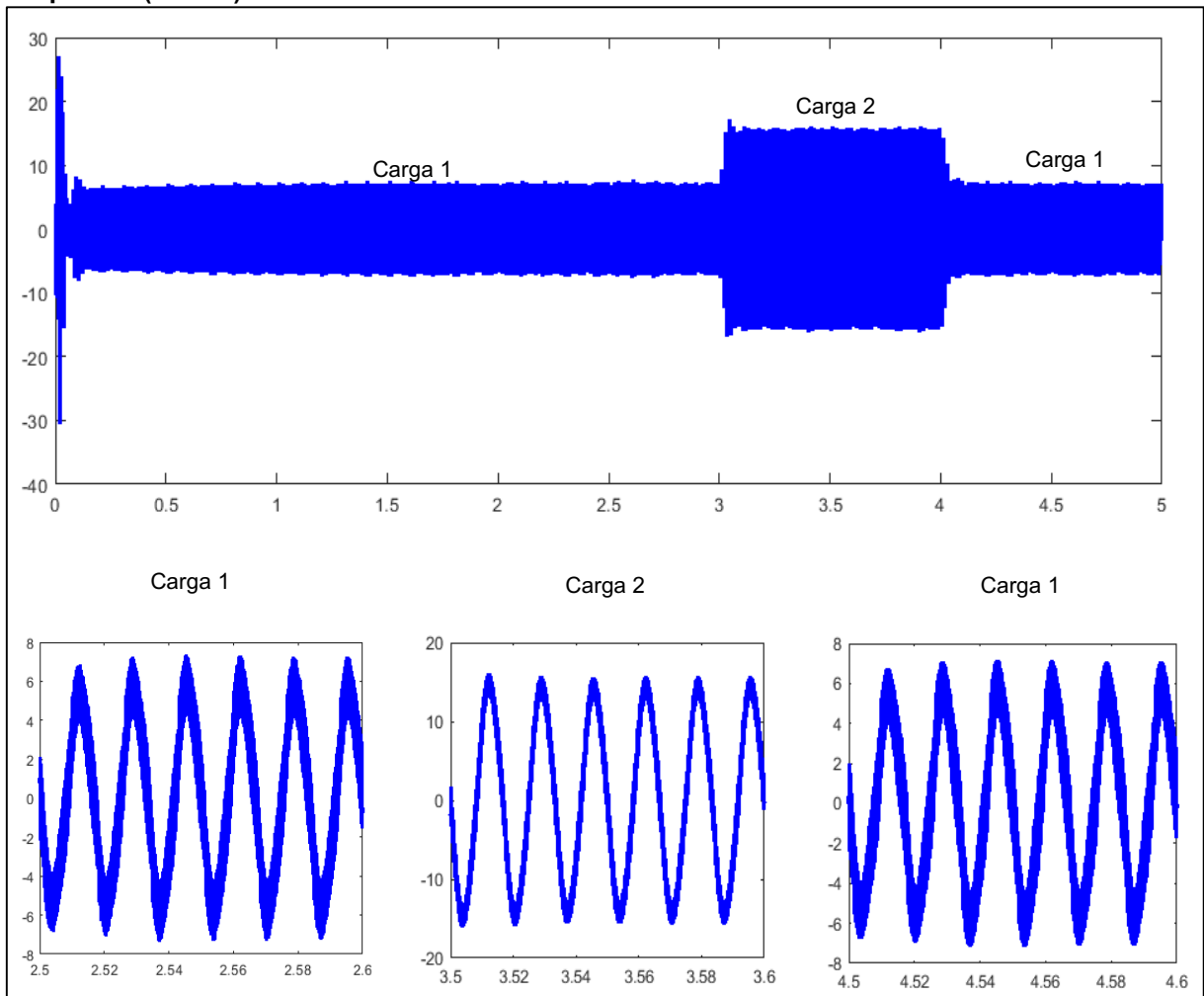
A Figura 48 apresenta o sinal de referência e o sinal de saída do controle de corrente e a Figura 49 exibe o sinal de referência e o sinal de saída do controle do barramento CC.

**Figura 45 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-C-UPQC adaptativo (MOP 1).**



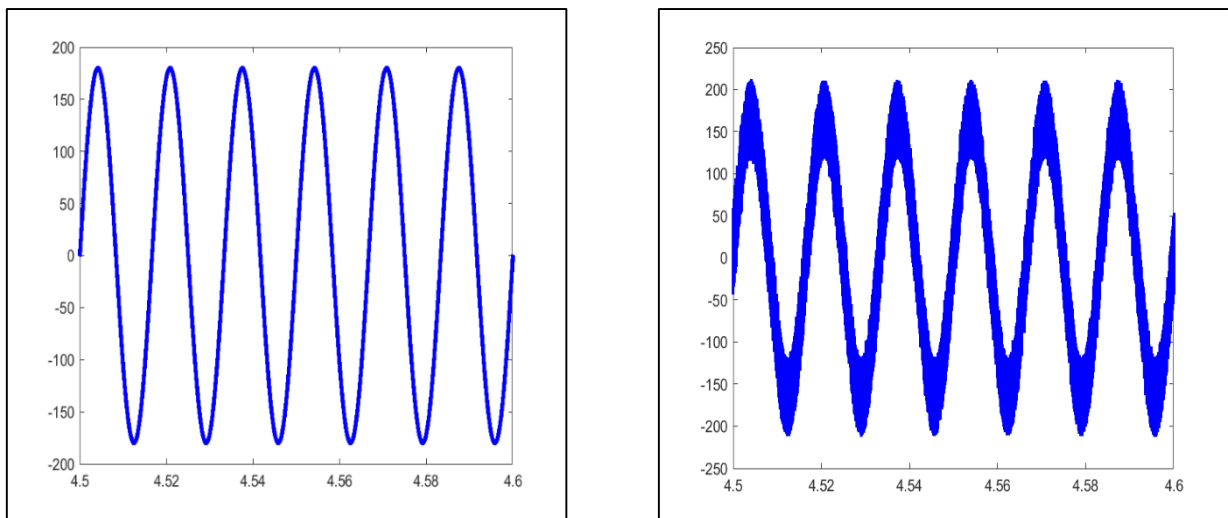
Fonte: Autoria Própria (2020).

**Figura 46 - Comportamento dinâmico da rede elétrica para variação de carga em PV-C-UPQC adaptativo (MOP 1).**



Fonte: Autoria Própria (2020).

**Figura 47 - Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ) e tensão na carga ( $v_L$ ).**



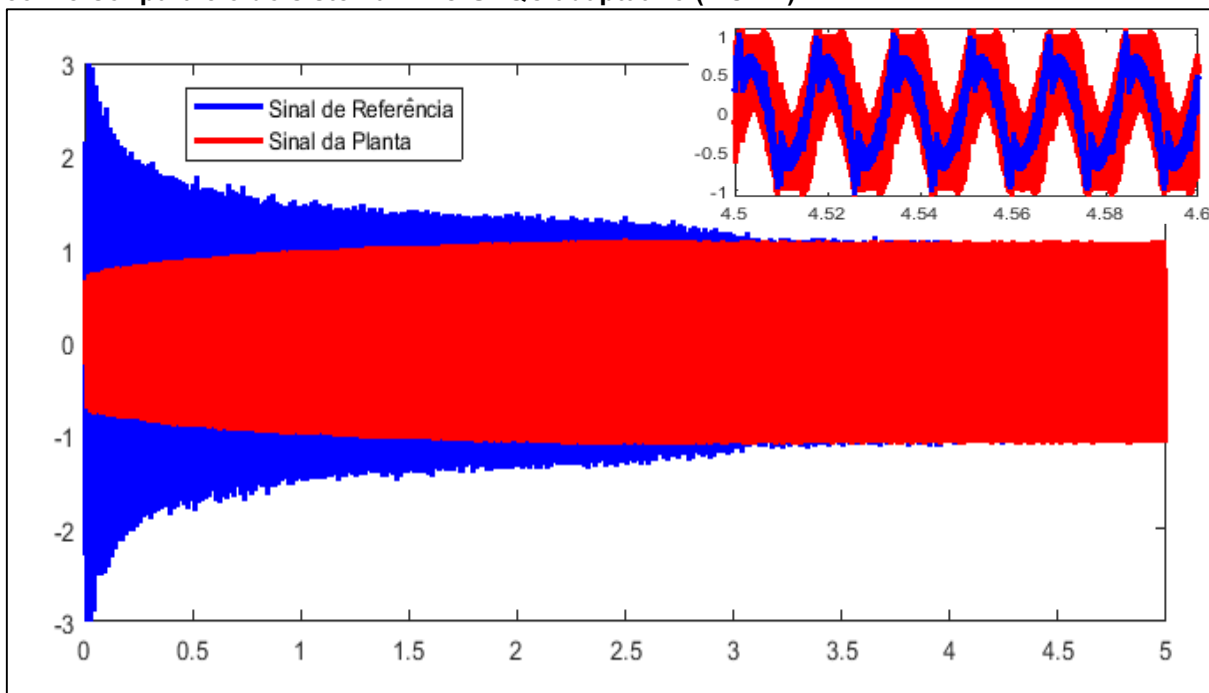
(a) Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ).

Fonte: Autoria Própria (2020).

(b) Tensão na carga ( $v_L$ ).

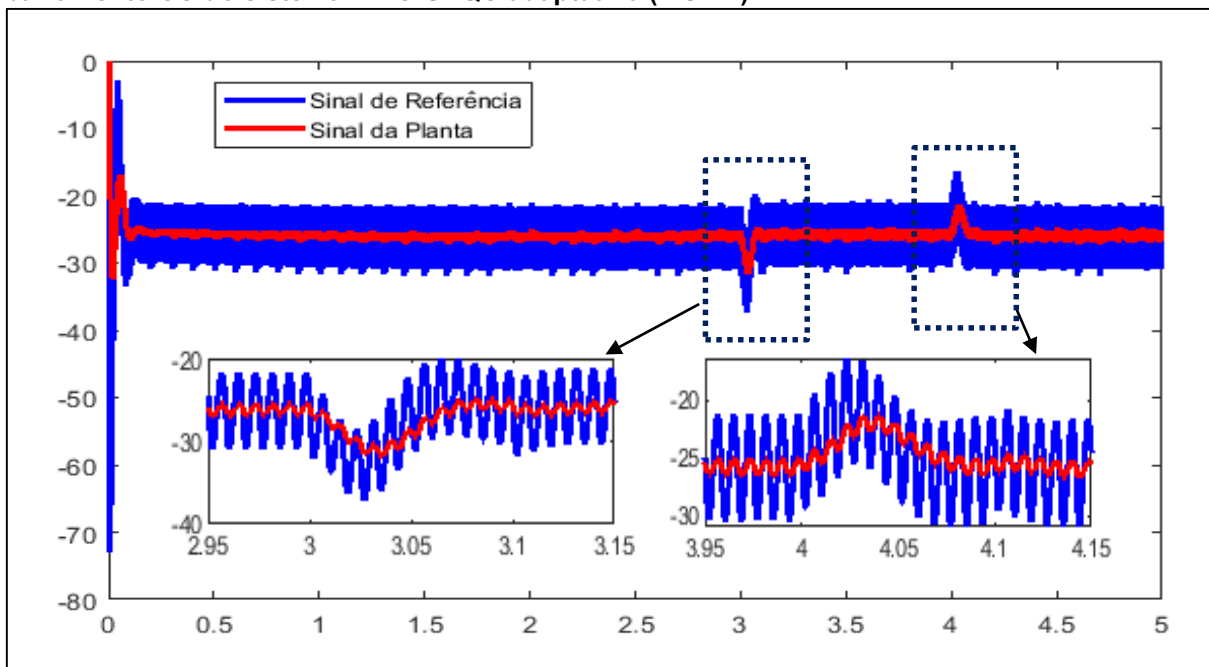
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 48 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de corrente do conversor paralelo do sistema PV-C-UPQC adaptativo (MOP 1).



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 49 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de tensão do barramento CC do sistema PV-C-UPQC adaptativo (MOP 1).



Fonte: Autoria Própria (2020).

### 5.2.3 Resultados da DHT do sistema PV-C-UPQC (Modo de Operação 1)

A Tabela 18 exibe os valores de DHT na rede elétrica em ambas as estratégias de controle. Nota-se que o controle adaptativo apresenta resultados mais satisfatórios.

A resposta do sistema a um degrau de carga (carga 1 para carga 2), e vice-versa, que são apresentadas nas Figuras 42 e 45 como forma de onda de tensão no barramento CC. Pode-se notar que quando empregado o controle adaptativo, o sistema apresenta um sobressinal positivo e um sobressinal negativo nos momentos de degrau de carga muito menor em relação ao controle clássico, conforme apresentado na Tabela 19. Além disso, como já mencionado, a tensão do barramento CC é controlada em 308V, é possível notar que busca por esse valor é muito mais rápida, (tempo de assentamento).

**Tabela 18 - Distorção Harmônica Total na rede elétrica no sistema PV-C-UPQC (MOP 1).**

	Tempo [s]		
	2,5	3,5	4,5
<b>DHT <math>i_s</math> [%]</b> Clássico	21,38	7,19	21,18
<b>DHT <math>i_s</math> [%]</b> Adaptativo	8,31	3,44	9,64
<b>Diferença percentual [%]</b>	61,13	52,16	54,49

Fonte: Autoria Própria (2020).

**Tabela 19 - Índices de desempenho dos controladores do sistema dinâmico PV-C-UPQC (MOP 1).**

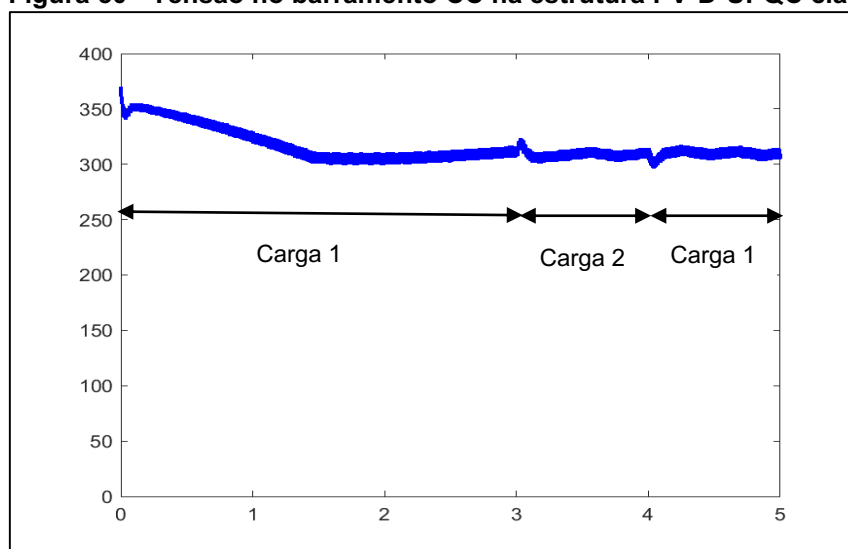
Sistema	Parâmetro	Estágio	
		2	3
<b>PV-C-UPQC Controle Clássico</b>	Sobressinal Positivo [%]	3,14	-
	Sobressinal Negativo [%]	-	1,65
	Tempo de assentamento [s]	0,10	0,50
<b>PV-C-UPQC Controle Adaptativo</b>	Sobressinal Positivo [%]	2,53	-
	Sobressinal Negativo [%]	-	0,65
	Tempo de assentamento [s]	0,05	0,25
-	Diferença percentual Sobressinal [%]	19,43	60,61
-	Diferença percentual Tempo de assentamento [%]	50,00	50,00

Fonte: Autoria Própria (2020).

### 5.2.4 Comportamento dinâmico do sistema PV-D-UPQC com controle clássico (Modo de Operação 1)

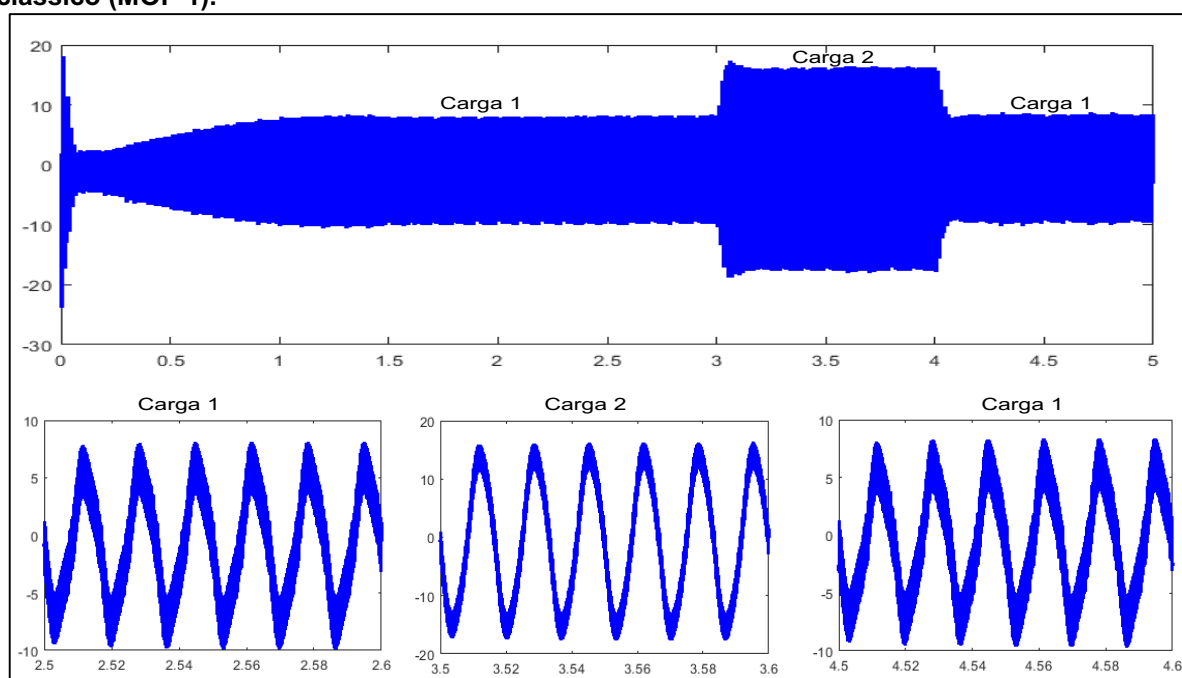
A Figura 50 mostra o comportamento da tensão do barramento CC para os degraus de carga para o sistema PV-D-UPQC. A Figura 51 mostra a corrente da rede ( $i_s$ ) e a Figura 52 a tensão da rede ( $v_s$ ), tensão na carga ( $v_L$ )

**Figura 50 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-D-UPQC clássico (MOP 1).**



Fonte: Autoria Própria (2020).

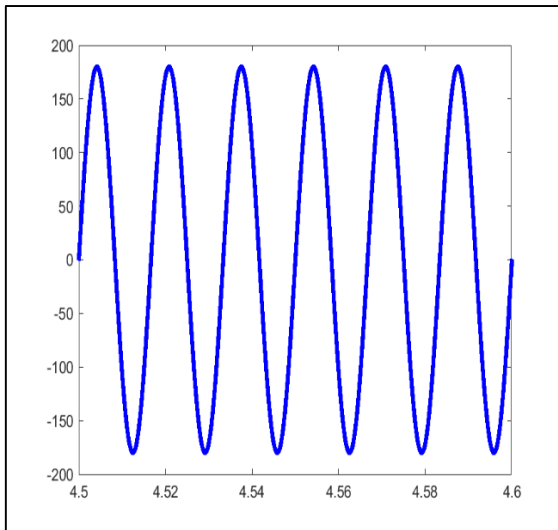
**Figura 51 - Comportamento dinâmico da rede elétrica ( $i_s$ ) para variação de carga em PV-D-UPQC clássico (MOP 1).**



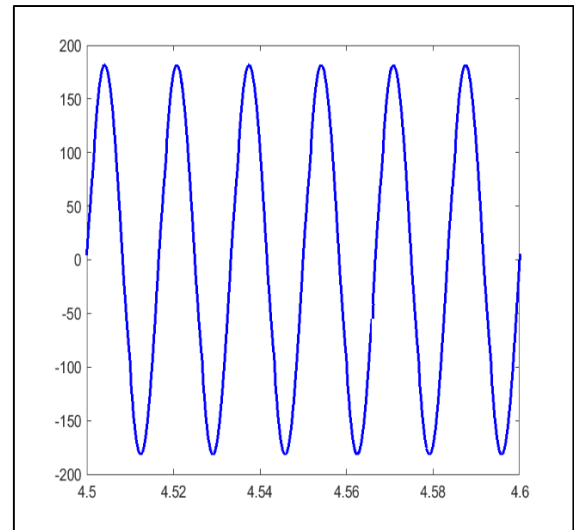
Fonte: Autoria Própria (2020).



**Figura 52 - Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ) e tensão na carga ( $v_L$ ).**



**(a) Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ).**  
**Fonte: Autoria Própria (2020).**



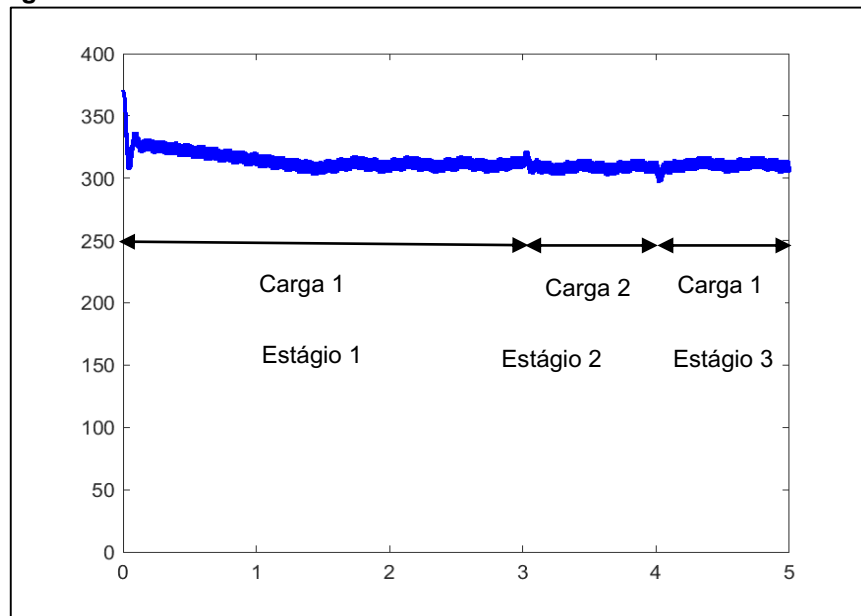
**(b) Tensão na carga ( $v_L$ ).**  
**Fonte: Autoria Própria (2020).**

### 5.2.5 Comportamento dinâmico do sistema PV-D-UPQC com controle adaptativo (Modo de Operação 1)

A Figura 53 apresenta a dinâmica da tensão no barramento CC operando com o controle adaptativo. A Figura 54 exibe a corrente na rede elétrica ( $i_s$ ) para os degraus de carga. A Figura 55 (a) apresenta a tensão na rede elétrica ( $v_s$ ) e (b) na carga ( $v_L$ ).

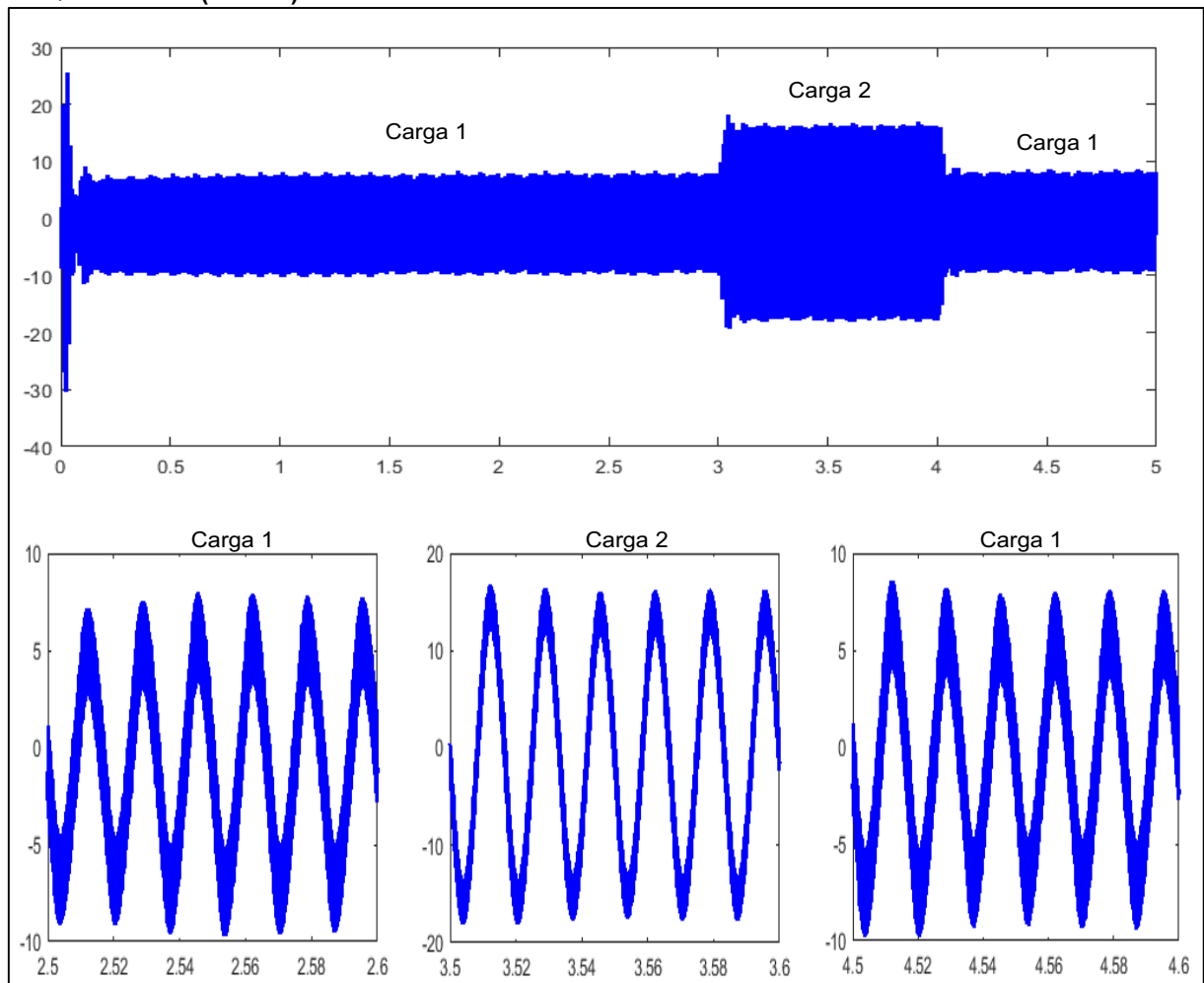
A Figura 56 apresenta o sinal de referência e o sinal de saída do controle de corrente e a Figura 57 apresenta o sinal de referência e o sinal de saída do controle do barramento CC.

Figura 53 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-D-UPQC clássico (MOP 1).



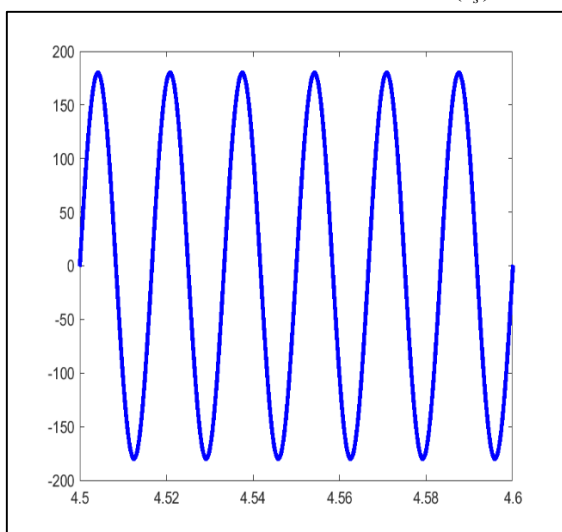
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 54 - Comportamento dinâmico da rede elétrica ( $i_s$ ) para variação de carga em PV-D-UPQC clássico (MOP 1).



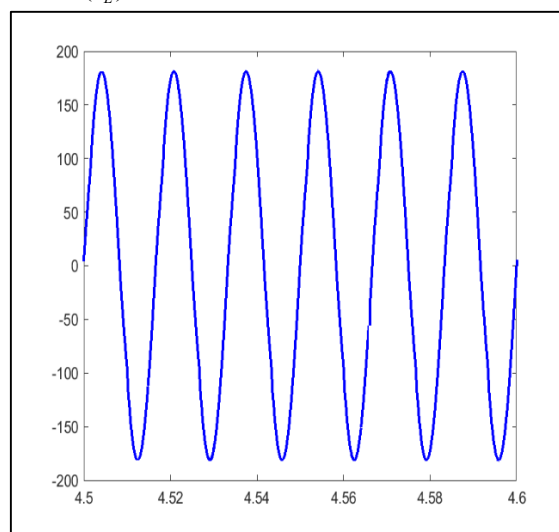
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 55 - Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ) e tensão na carga ( $v_L$ ).



(a) Tensão na rede elétrica ( $v_s$ ).

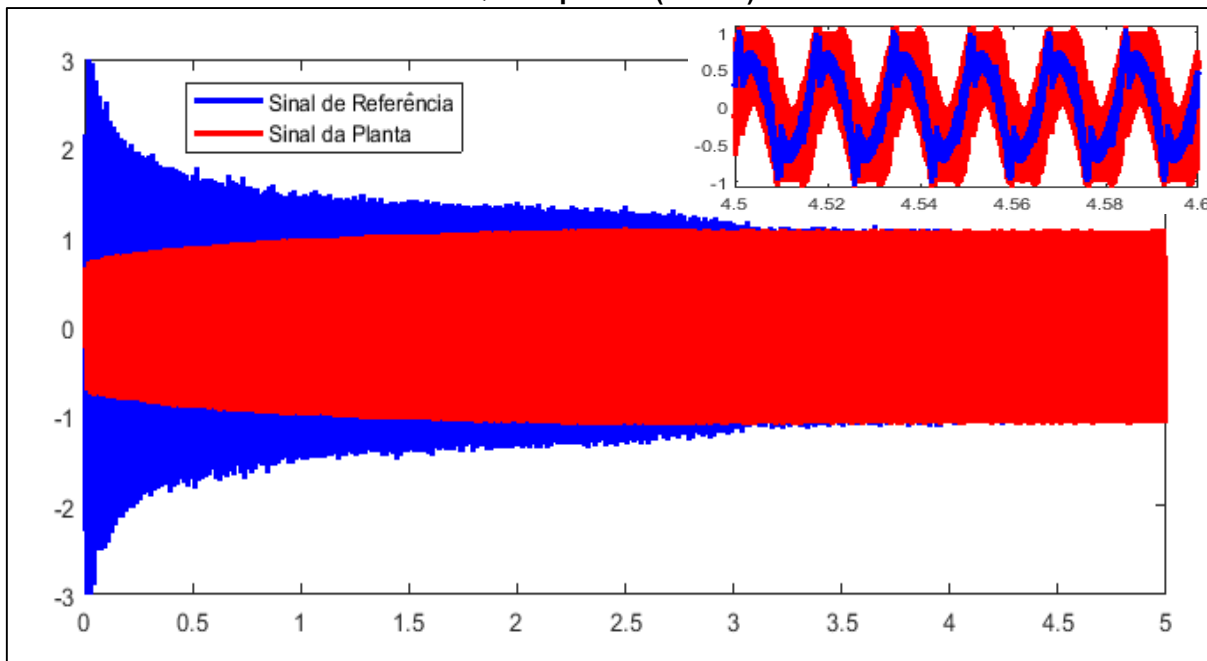
Fonte: Autoria Própria (2020).



(b) Tensão na carga ( $v_L$ ).

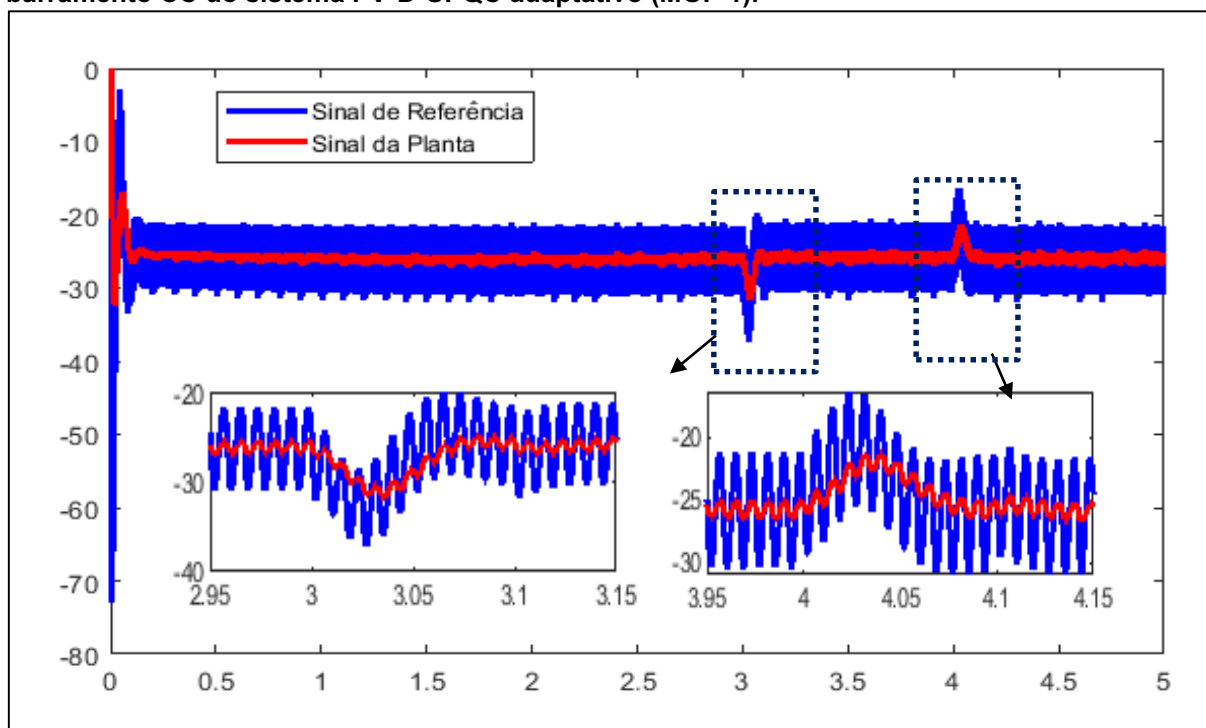
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 56 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de corrente do conversor série do sistema PV-D-UPQC adaptativo (MOP 1).



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 57 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de tensão do barramento CC do sistema PV-D-UPQC adaptativo (MOP 1).



Fonte: Autoria Própria (2020).

### 5.2.6 Resultados da DHT do sistema PV-D-UPQC (Modo de Operação 1)

Verifica-se que em todas as situações as correntes drenadas na rede elétrica possuem um formato senoidal. Porém, nos resultados apresentados da estratégia de controle adaptativo é possível notar que a corrente da rede elétrica é mais próxima a frequência de 60Hz.

A Tabela 20 exhibe os valores de DHT na rede elétrica em ambas as estratégias de controle. A Tabela 21 apresenta os índices de desempenho dos controladores, percebe-se, a redução do sobressinal positivo e negativo e tempo de assentamento quando aplicado o controle adaptativo.

Tabela 20 - Distorção Harmônica Total na rede elétrica no sistema PV-D-UPQC (MOP 1).

	Tempo [s]		
	2,5	3,5	4,5
DHT $i_s$ [%]			
Clássico	12,37	5,39	12,28
Adaptativo	5,63	2,31	6,01
Diferença percentual [%]	54,49	57,14	51,06

Fonte: Autoria Própria (2020).

Tabela 21 - Índices de desempenho dos controladores do sistema dinâmico PV-D-UPQC (MOP 1).

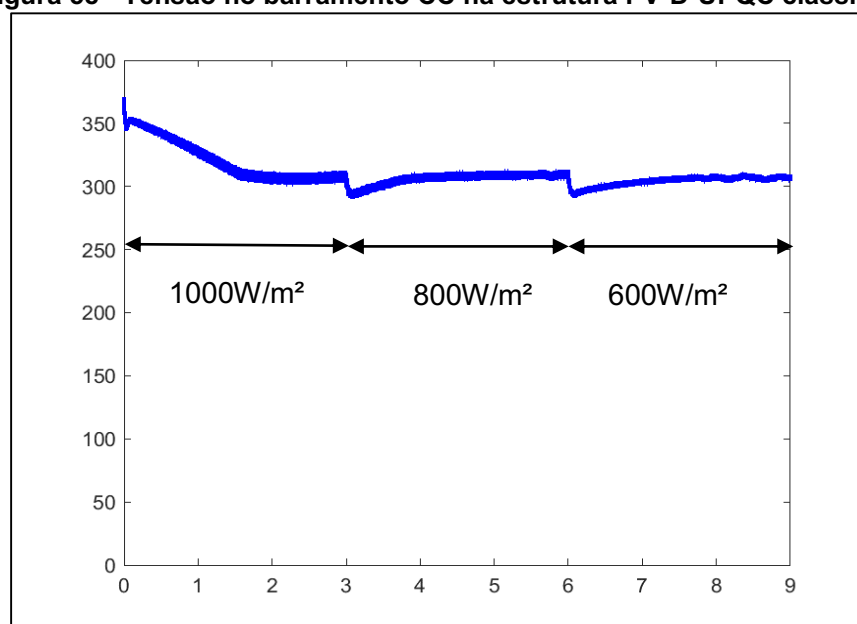
Sistema	Parâmetro	Estágio	
		2	3
PV-D-UPQC Controle Clássico	Sobressinal Positivo [%]	3,14	-
	Sobressinal Negativo [%]	-	1,98
	Tempo de assentamento [s]	0,55	0,50
PV-D-UPQC Controle Adaptativo	Sobressinal Positivo [%]	2,53	-
	Sobressinal Negativo [%]	-	1,31
	Tempo de assentamento [s]	0,06	0,10
-	Diferença percentual Sobressinal [%]	19,43	33,84
-	Diferença percentual Tempo de assentamento [%]	89,09	80,00

Fonte: Autoria Própria (2020).

### 5.2.7 Comportamento dinâmico do sistema PV-C-UPQC com controle clássico (Modo de Operação 2)

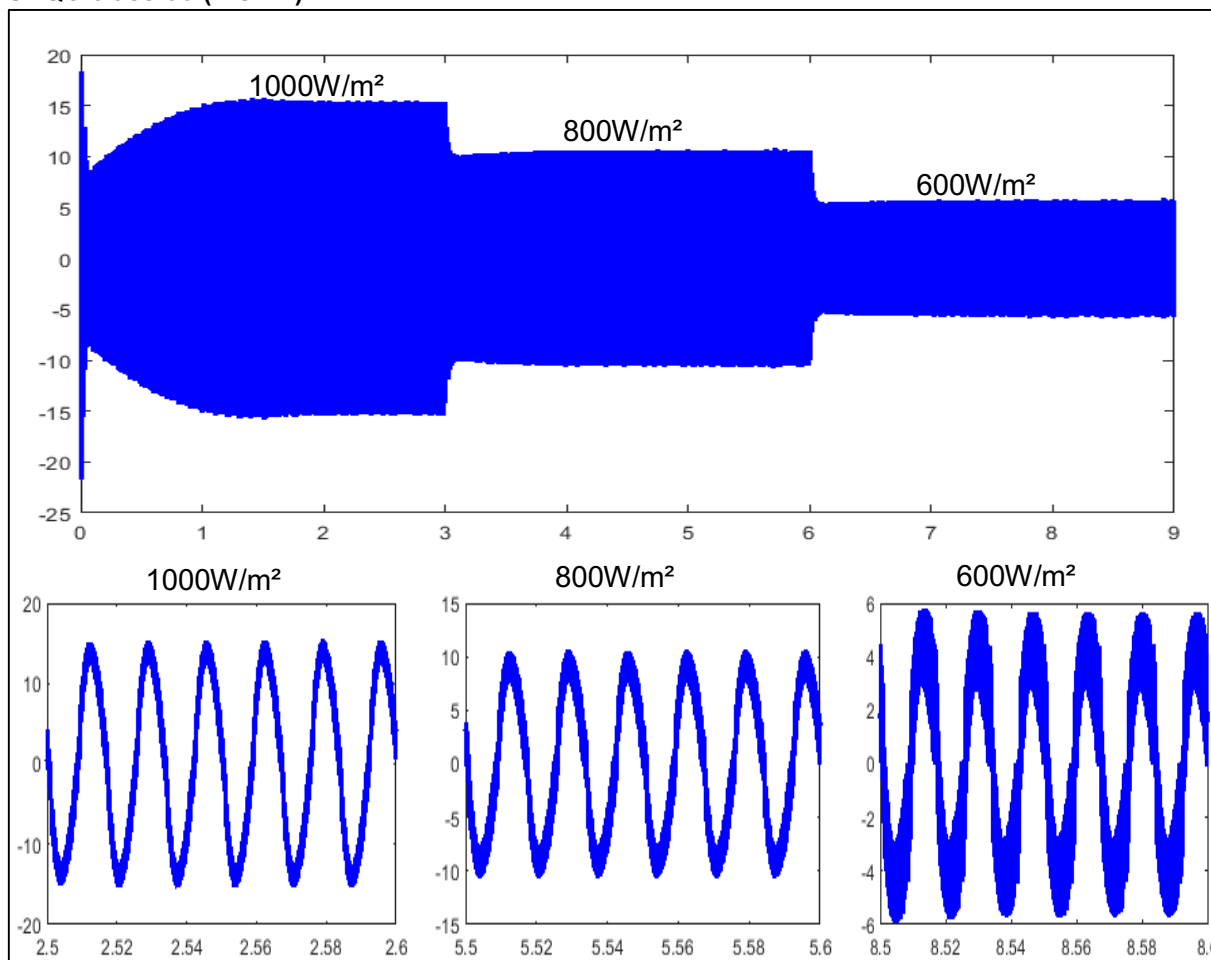
A Figura 58 mostra a dinâmica da tensão do barramento CC em resposta à submissão de degraus de irradiações. A Figura 59 mostra a corrente da rede ( $i_s$ ).

Figura 58 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-D-UPQC clássico (MOP 2)



Fonte: Autoria Própria (2020).

**Figura 59 - Comportamento dinâmico da rede elétrica ( $i_s$ ) para variação de carga em PV-C-UPQC clássico (MOP 2).**



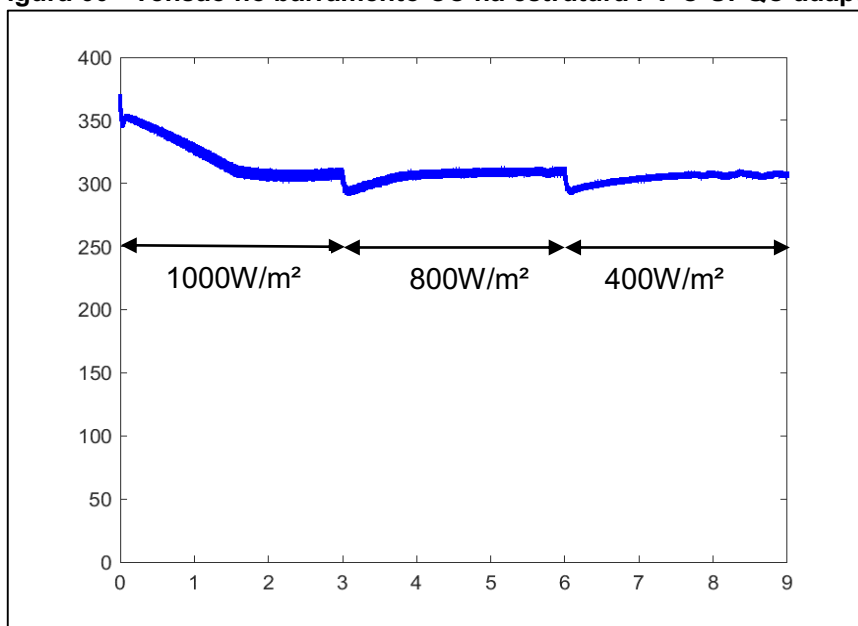
Fonte: Autoria Própria (2020).

### 5.2.8 Comportamento dinâmico do sistema PV-C-UPQC com controle adaptativo (Modo de Operação 2)

As próximas Figuras estão exibidos os resultados obtidos empregando o controle adaptativo. A Figura 60 mostra a tensão no barramento CC. A Figura 61 exibe a corrente na rede elétrica ( $i_s$ ) para os degraus de irradiação ..

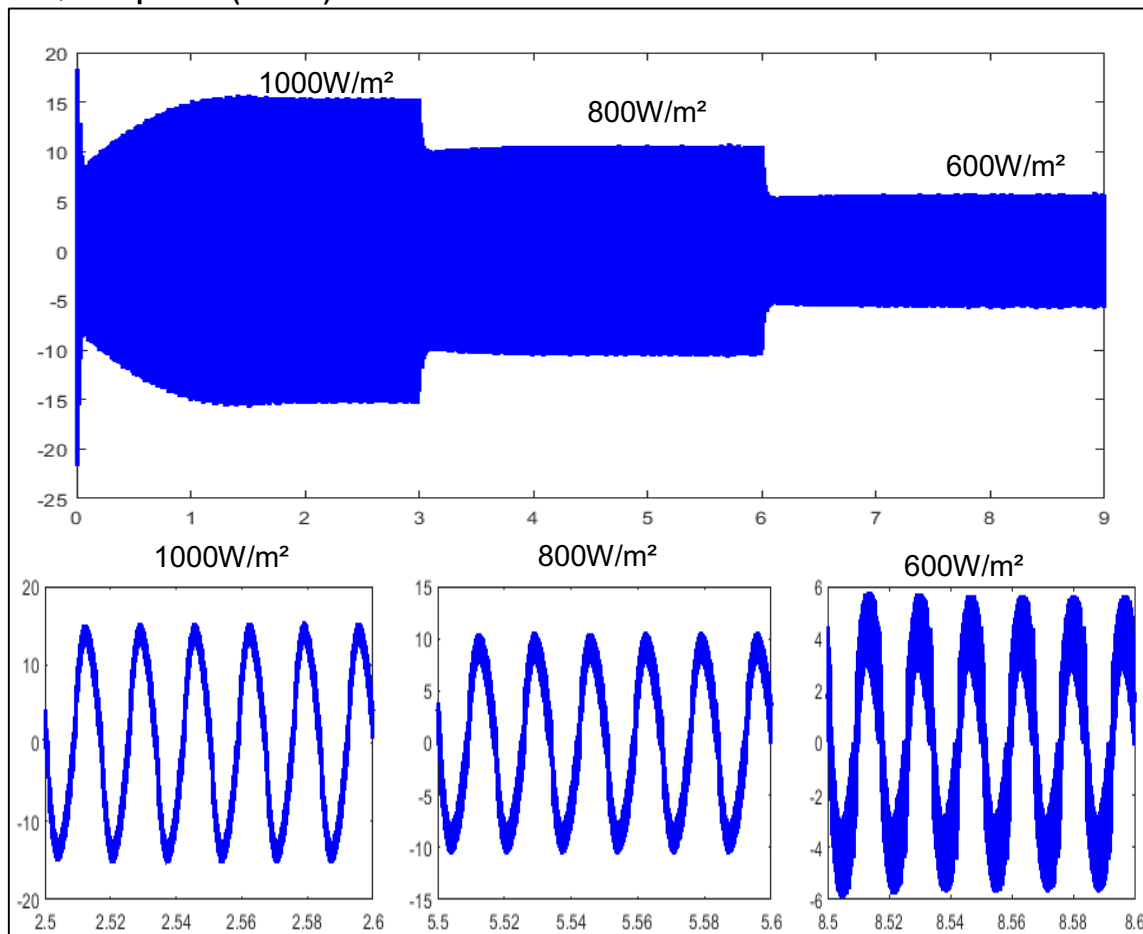
A Figura 62 apresenta o sinal de referência e o sinal de saída do controle de corrente e a Figura 63 apresenta o sinal de referência e o sinal de saída do controle do barramento CC.

Figura 60 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-C-UPQC adaptativo (MOP 2).



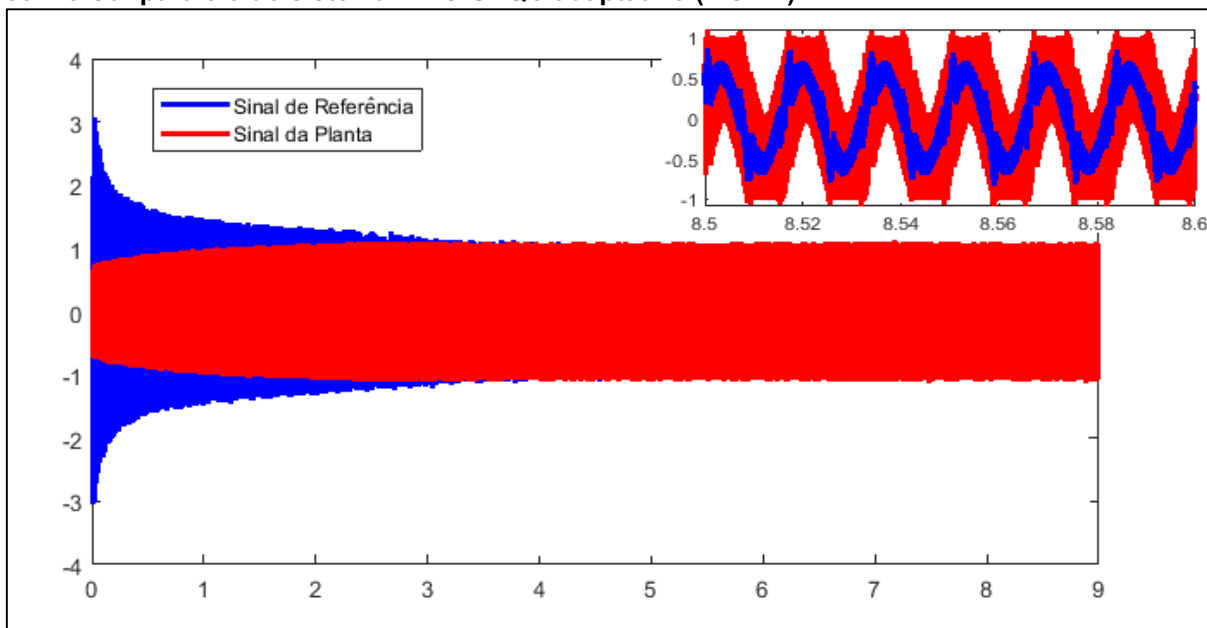
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 61 - Comportamento dinâmico da rede elétrica ( $i_s$ ) para variação de carga em PV-C-UPQC adaptativo (MOP 2).



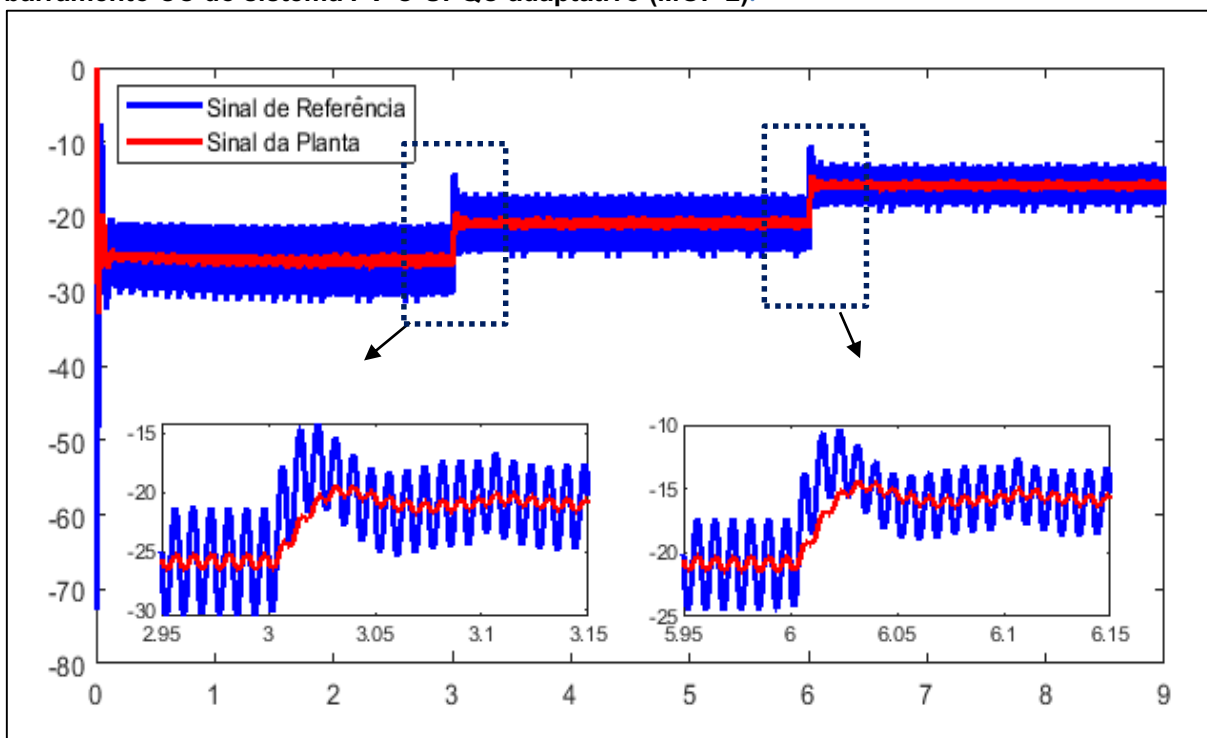
Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 62 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de corrente do conversor paralelo do sistema PV-C-UPQC adaptativo (MOP 2).



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 63 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de tensão do barramento CC do sistema PV-C-UPQC adaptativo (MOP 2).



Fonte: Autoria Própria (2020).



### 5.2.9 Resultados da DHT do sistema PV-C-UPQC (Modo de Operação 2)

A Tabela 22 exibe os valores de DHT na rede elétrica obtidos em ambas as estratégias de controle. A Tabela 23 mostra os principais parâmetros de controle: sobressinal positivo e sobressinal negativo e tempo de assentamento dos três estágios.

**Tabela 22 - Distorção Harmônica Total na rede elétrica no sistema PV-C-UPQC (MOP 2).**

	Tempo [s]		
	2,5	5,5	8,5
<b>DHT <math>i_s</math> [%]</b>			
Clássico	7,28	9,11	15,46
<b>DHT <math>i_s</math> [%]</b>			
Adaptativo	2,91	4,25	6,98
<b>Diferença percentual [%]</b>	60,03	53,35	54,85

Fonte: Autoria Própria (2020).

**Tabela 23 - Índices de desempenho dos controladores do sistema dinâmico PV-C-UPQC (MOP 2).**

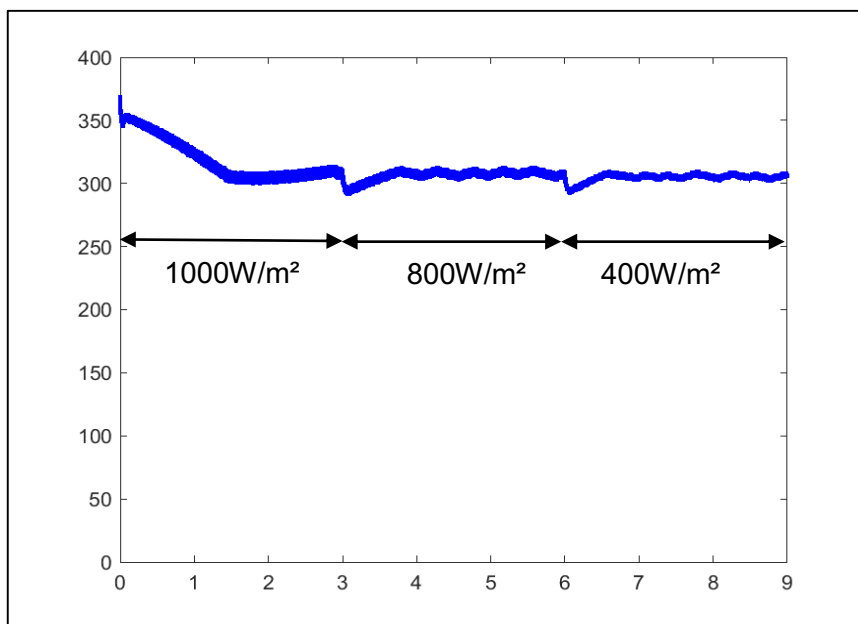
Sistema	Parâmetro	Estágio	
		2	3
PV-C-UPQC Controle Clássico	Sobressinal Positivo [%]	-	-
	Sobressinal Negativo [%]	4,76	4,76
	Tempo de assentamento [s]	1,25	1,90
PV-C-UPQC Controle Adaptativo	Sobressinal Positivo [%]	-	-
	Sobressinal Negativo [%]	1,65	2,67
	Tempo de assentamento [s]	0,40	0,75
-	Diferença percentual Sobressinal [%]	65,34	43,9
-	Diferença percentual Tempo de assentamento [%]	-	-

Fonte: Autoria Própria (2020).

### 5.2.10 Comportamento dinâmico do sistema PV-D-UPQC com controle clássico (Modo de Operação 2)

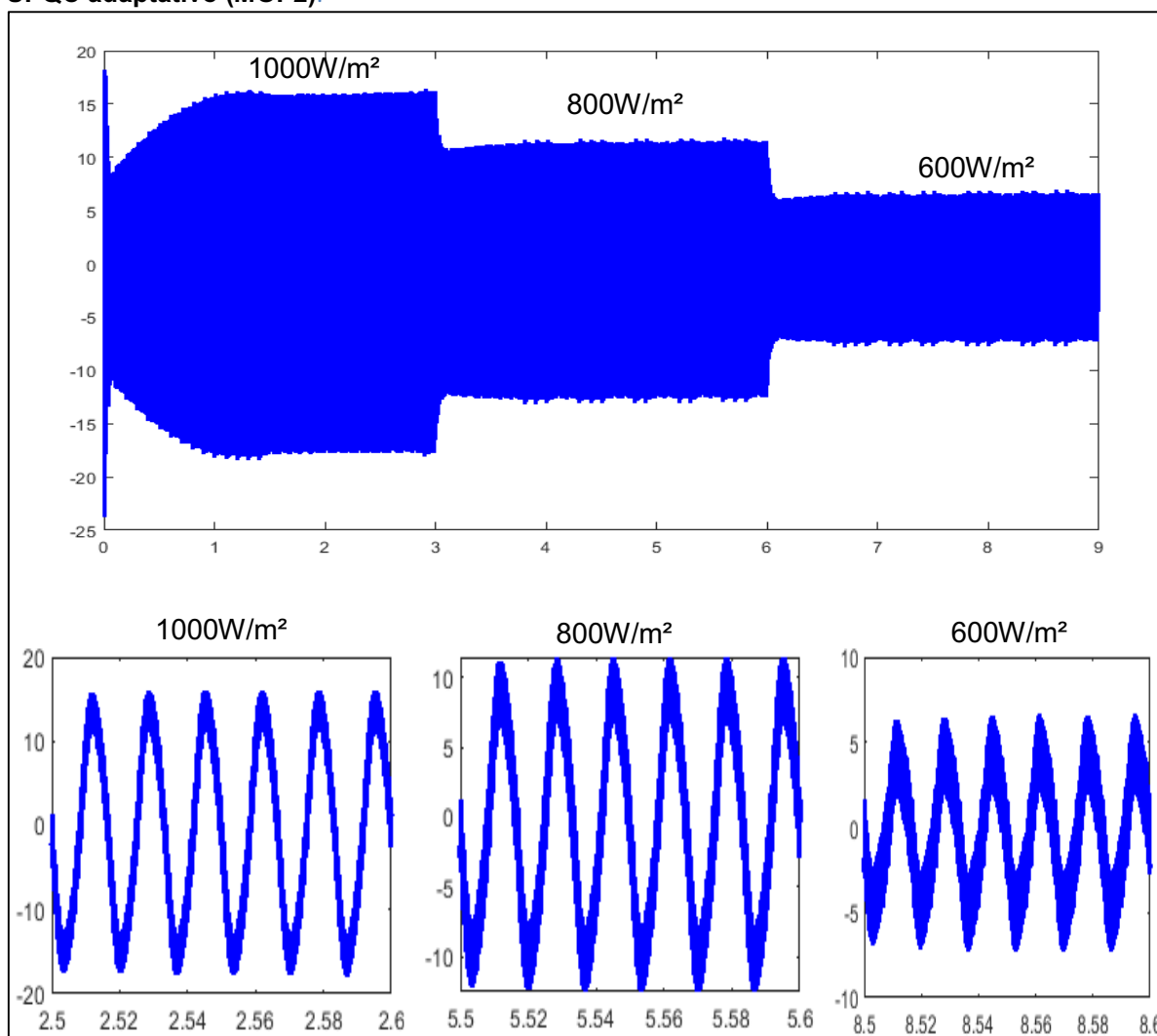
A Figura 64 mostra o comportamento da tensão do barramento CC para os degraus de irradiação. A Figura 65 mostra a corrente da rede ( $i_s$ ).

**Figura 64 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-D-UPQC clássico (MOP 2).**



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 65 - Comportamento dinâmico da rede elétrica ( $i_s$ ) para variação de carga em PV-D-UPQC adaptativo (MOP2).



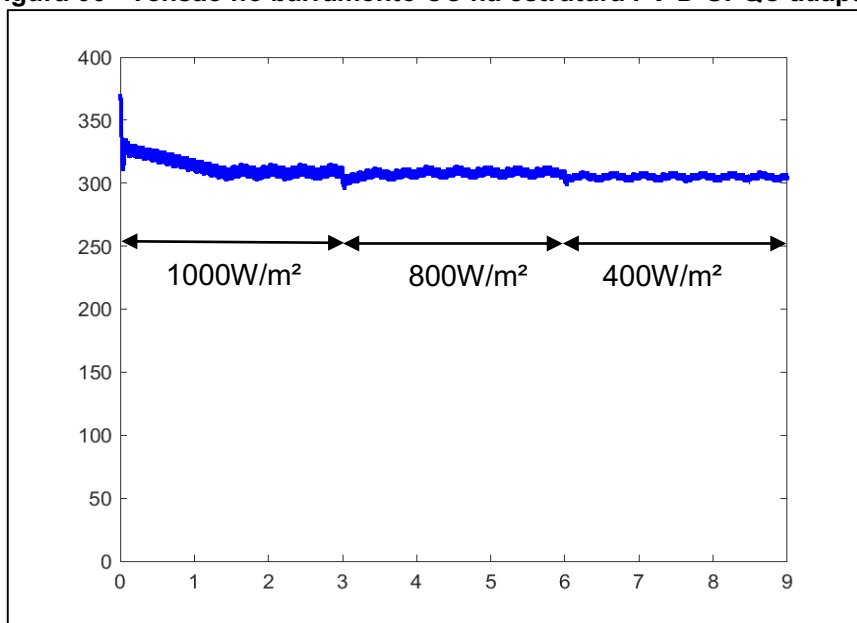
Fonte: Autoria Própria (2020).

### 5.2.11 Comportamento dinâmico do sistema PV-D-UPQC com controle adaptativo (Modo de Operação 2)

As próximas Figuras estão exibidos os resultados obtidos empregando o controle adaptativo. A Figura 66 mostra a tensão no barramento CC. A Figura 67 exibe a corrente na rede elétrica ( $i_s$ ) para os degraus de carga.

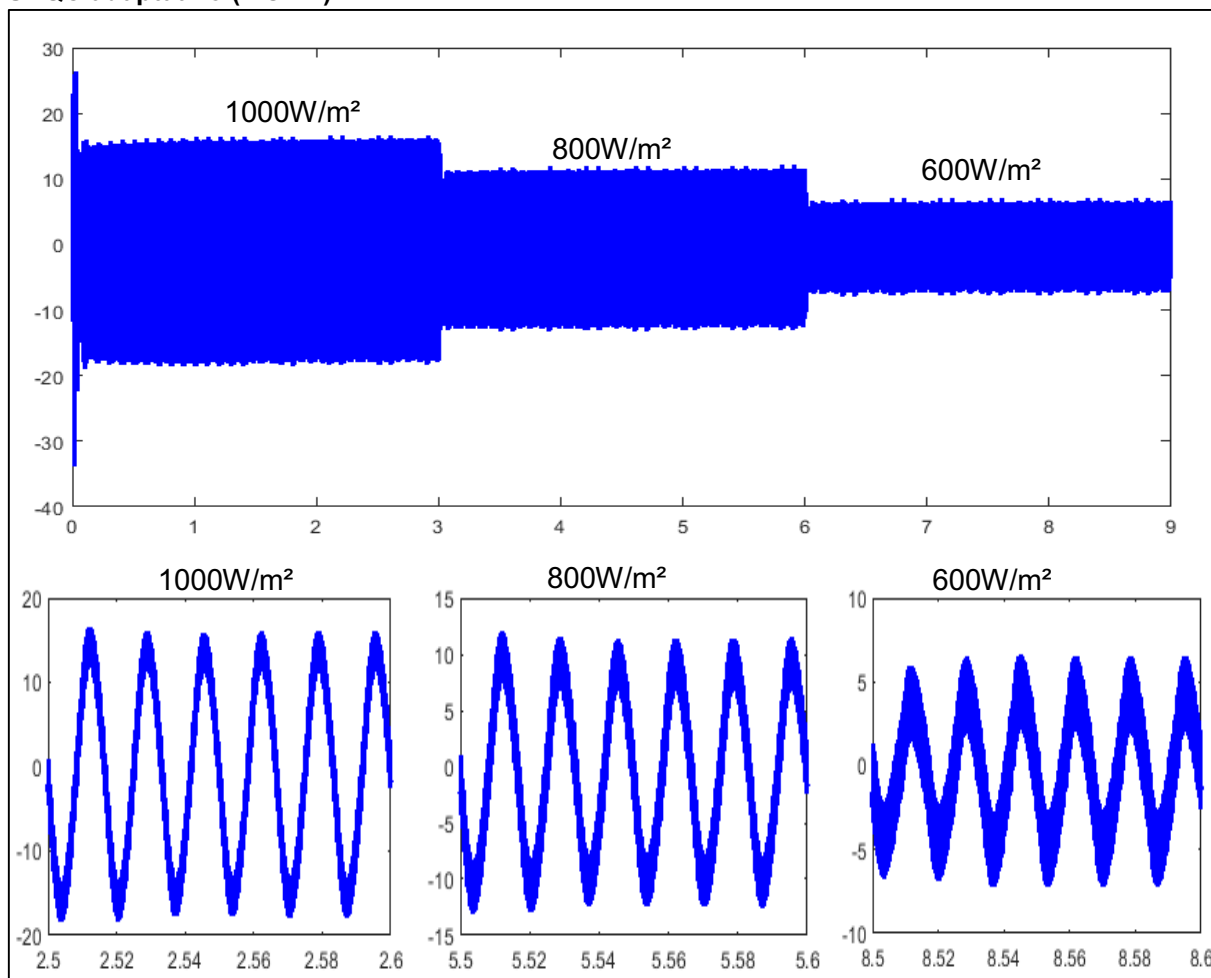
A Figura 68 apresenta o sinal de referência e o sinal de saída do controle de corrente e a Figura 69 apresenta o sinal de referência e o sinal de saída do controle do barramento CC.

**Figura 66 - Tensão no barramento CC na estrutura PV-D-UPQC adaptativo (MOP 2).**



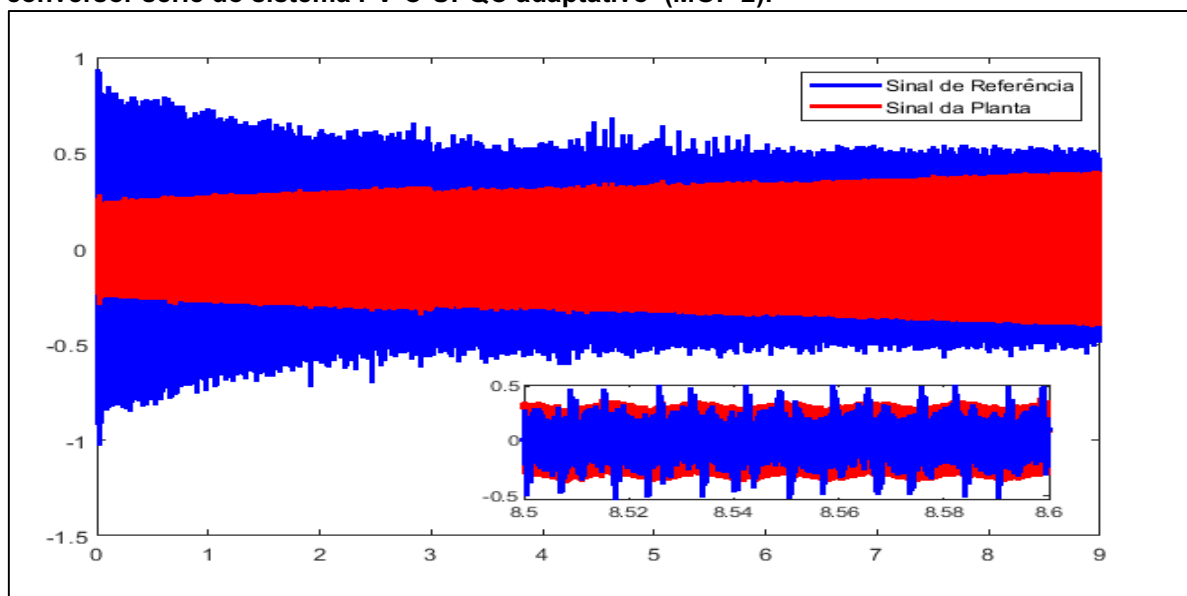
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 67 - Comportamento dinâmico da rede elétrica ( $i_s$ ) para variação de carga em PV-D-UPQC adaptativo (MOP 2).



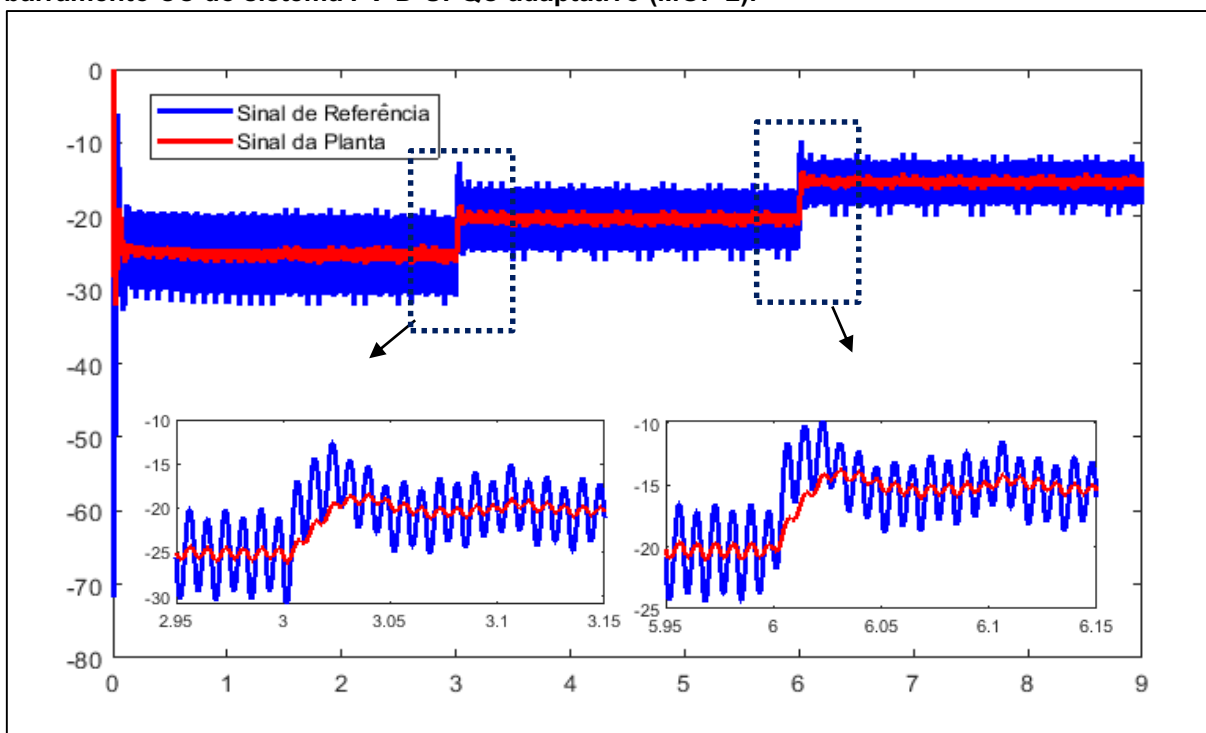
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 68 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de corrente do conversor série do sistema PV-C-UPQC adaptativo (MOP 2).



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 69 - Sinal do modelo de referência e sinal de saída da planta do controle de tensão do barramento CC do sistema PV-D-UPQC adaptativo (MOP 2).



Fonte: Autoria Própria (2020).

### 5.2.12 Resultados da DHT do sistema PV-D-UPQC (Modo de Operação 2)

A Tabela 24 apresenta os valores de DHT na rede elétrica em ambas as estratégias de controle. A Tabela 25 exibe os índices de desempenho de controladores do sistema. Nota-se que todos os parâmetros, em ambos os estágios há uma diferença percentual acima de 40% quando comparado o controlador clássico e adaptativo.

Tabela 24 - Distorção Harmônica Total na rede elétrica no sistema PV-D-UPQC (MOP 2).

	Tempo [s]		
	2,5	5,5	8,5
DHT $i_s$ [%]			
Clássico	5,42	6,53	10,43
DHT $i_s$ [%]			
Adaptativo	2,95	4,16	7,35
Diferença percentual [%]	45,57	36,29	29,53

Fonte: Autoria Própria (2020).

**Tabela 25 - Índices de desempenho dos controladores do sistema dinâmico PV-D-UPQC (MOP 2).**

Sistema	Parâmetro	Estágio	
		2	3
PV-D-UPQC Controle Clássico	Sobressinal Positivo [%]	-	-
	Sobressinal Negativo [%]	4,76	4,40
	Tempo de assentamento [s]	0,75	0,60
PV-D-UPQC Controle Adaptativo	Sobressinal Positivo [%]	-	-
	Sobressinal Negativo [%]	3,01	2,32
	Tempo de assentamento [s]	0,40	0,25
-	Diferença percentual Sobressinal [%]	36,76	47,27
-	Diferença percentual Tempo de assentamento [%]	46,67	58,33

Fonte: Autoria Própria (2020).

### 5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CONTROLES CLÁSSICO E ADAPTATIVO

Nesta seção, é apresentada uma análise comparativa completa envolvendo o sistema PV-UPQC monofásico operando sob duas estratégias de controle: a clássica e a adaptativa. O sistema PV-UPQC também é avaliado em duas estratégias de compensação: a convencional e dual.

Com relação a estratégia de controle, testes computacionais estáticos e dinâmicos foram realizados para avaliar e detectar sob qual estratégia de controle o sistema PV-UPQC demonstraria melhor desempenho. Para avaliar os desempenhos estáticos, o cenário apresentado envolveu carga não linear, bem como tensões harmônicas na rede elétrica. Por outro lado, as performances dinâmicas foram avaliadas considerando a variação de carga e variação da irradiação. Além disso, aspectos relacionados ao controle e geração de referências de controle foram abordados neste trabalho.

Após as simulações computacionais de avaliação do comportamento estático, é possível concluir que os resultados em relação a DHT da rede elétrica são mais satisfatórios empregando o controle adaptativo ao invés do controle clássico, independente da estratégia de compensação e em ambos modos de operação submetidos.

Em relação aos resultados do desempenho dinâmico, pode-se pontuar que além da DHT da rede elétrica apresentar valores significativamente inferiores, o tempo

de assentamento do buscar pelo novo MPPT quando ocorre a variação, seja de irradiação ou carga, é muito mais rápido no controle adaptativo.

Apesar de não ser o objetivo deste trabalho, é importante frisar que a performance dos resultados do sistema PV-UPQC, utilizando a estratégia de compensação no modo dual, é mais satisfatória que no modo convencional.

#### 5.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a descrição da estrutura e os resultados da estratégia de controle clássica e adaptativa do sistema PV-UPQC operando no modo convencional e dual. Dessa forma, para cada modo de operação (PV-C-UPQC e PV-D-UPQC) foram apresentados resultados empregando controle clássico e convencional a fim de realizar a análise comparativa. Foram propostos três cenários e os resultados mais pertinentes para cada análise foram apresentados. Por último, foi apresentado uma análise ressaltando os principais aspectos de desempenho de controle e também os resultados de taxa de distorções harmônicas das correntes na rede elétrica, um dos parâmetros de análise desse trabalho.

## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO

O trabalho de conclusão de curso apresentou o estudo, desenvolvimento e análise de controladores adaptativos aplicados no sistema de geração distribuída de simples estágio operando integrado a um condicionador de qualidade de energia monofásico em estratégia de compensação dual e convencional.

O sistema PV-UPQC realizou simultaneamente o processamento de energia ativa gerada pelo sistema PV e o condicionamento ativo de potência. Garantindo tensão senoidal à carga e corrente senoidal à rede elétrica. Dessa forma, o sistema, que além de ser baseado em uma fonte alternativa e renovável, também tem a função de reduzir os dilemas de QEE presentes no SEP.

A maior contribuição deste trabalho consiste em uma proposta de estratégia de controle adaptativo para os controladores de corrente do UPQC em modo dual e convencional com a finalidade de compensar os harmônicos de corrente. Além disso, foi proposta também a mesma estratégia para o controlador de tensão do barramento CC com o propósito de melhorar o desempenho de estabilidade do barramento CC perante as variações de irradiação do sistema PV e carga. Para mostrar a eficiência do controle adaptativo proposto é feita uma análise comparativa com o controle clássico (controlador PI).

Para isso, foi necessário o modelo matemático das plantas dos conversores série e paralelo e barramento CC, tanto para obtenção de ganhos dos controladores PI quanto para os controladores adaptativo.

A arquitetura do sistema de controle adaptativo foi proposta para o controle de corrente e controle do barramento CC. Este controlador foi capaz de garantir estabilidade e desempenho do sistema quando submetido a variações paramétricas e condições variadas da carga. A base teórica deste controlador foi discutida detalhadamente e o procedimento apresentado de maneira genérica.

Após diversas simulações computacionais para comparação do controlador proposto com estratégia já conhecida, foi possível constatar que, de fato, os resultados do controle adaptativo baseado em MRAC, apresentaram valores muito satisfatórios em relação ao controlador clássico PI, isso em todos os modos de operação submetidos. Em relação a compensação de harmônicos na rede elétrica, os valores de DHT chegaram a ser em média 54% inferiores.



No que se refere a parâmetros de controle, os resultados demonstraram que o controle adaptativo proposto apresenta desempenho superior, como tempo de assentamento mais rápidos e sobressinais (positivo/negativo) menores quando comparados com o controlador clássico PI.

Além disso, uma grande vantagem do controlador adaptativo é garantir estabilidade do barramento CC sob condições distúrbios da rede elétrica e carga, assim como variações de irradiação do sistema DG sem a necessidade de alterar/ajustar parâmetros do controlador, tendo em vista que se trata de uma estratégia de controle adaptativa.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA – ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST**. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 12 abr., 2019.

AKAGI H. Active Harmonic Filters. **Proceedings of the IEEE**, v. 93, n. 12, 2128-2141, 2005. ISSN 0018-9219.

ALVES, M. G. **Mini inversores para aproveitamento de energia fotovoltaica, com técnicas de MPPT, sincronismo e conexão com a rede de CA em BT, proteção de ilhamento, gerenciamento da energia e da operação**. 2013. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia - Unesp, Ilha Solteira, 2013.

ARAUJO, N. P. D. **Condicionador Unificado de Qualidade de Energia Baseado em Conversor Matricial Indireto para um Sistema Fotovoltaico**. 2016. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Instituto Superior Técnico Lisboa, Lisboa, 2016.

AREDES, M.; WATANABE, E. H. New control algorithms for series and shunt three-phase four-wire active power filters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 3, 1649-1656. ISSN 0885-8977.

ASTRÖM, K. J; WITTENMARK, B. **Adaptive Control**. 2nd Edition. Dover Publications. 2008.

BARRIVIERA, R. et al. Implementação de um Sistema UPS Monofásico com Condicionamento Ativo de Potência Série e Paralelo. **Eletrônica de Potência**, Campo Grande, v. 17, n. 7, p. 753-762, 2012.

BRITO, M. A. G. et al. Contribuição ao estudo dos principais algoritmos de extração da máxima potência dos painéis fotovoltaicos. **Eletrônica de Potência**, v. 17, n. 3, p. 592-600, jun. 2012.

BRITO, M. A. G. et al. Research on photovoltaics: Review, trends and perspectives. Power Electronics Conference (COBEP), 2011 Brazilian, 11-15 Set. 2011. P531-537.

BRITO, M. A. G. **Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos para Aplicações Fotovoltaicas: Técnicas para obtenção de MPPT, detecção e proteção de ilhamento, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica**. 2013. 221 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Feis/unesp, Ilha Solteira, 2013.

CAMPANHOL, L. B. G. **Sistemas fotovoltaico trifásico de único estágio conectado a sistemas de geração distribuída operando como condicionador de qualidade de energia unificado usando estratégia dual de compensação ativa de potência**. 2017. 251p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

CAMPANHOL, L. B. G; SILVA, S. A. O; SAMPAIO, L. P. A three-phase four-wire grid-connected photovoltaic system with active power line conditioning. In: **PCIM Europe**

**2014; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of.** VDE, 2014. p. 1-8.

CONFERÊNCIA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 24., 2018, Katowice, Polônia. **Conferência das partes da convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima.** Katowice, Polônia, 2018. 24 p. Disponível em:< <http://www.brazil.gov.br/documents/brazil-na-cop24-factsheet-dez2018-port.pdf>> Acesso em: 6 jul. 2020.

DURGAN, R. C.; MCDERMOTT, T. E. Distributed generation: Operating conflicts for distributed generation interconnected with utility distribution systems. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 8, p. 19-25, 2002.

FAHMY A. M. et al. Single-phase grid connected distributed generation interfacing converter with power quality improvement capability. **IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, Vienna, Austria, p. 2169-2174, 2014. ISSN 1553-572X. Disponível em:< [10.1109/IECON.2013.6699467](https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6699467)>.

FERNADES, M. V. **Controlador Adaptativo por Modelo e Referência e Estrutura Variável Aplicado ao Controle de Ângulo de Carga e Fluxo de Campo de um Gerador Síncrono.** 2008. 94f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação. UFRN, 2008.

FLORA, L. D.; GRÜNDLING, H. A. Design of a robust model reference adaptive voltage controller for an electrodynamic shaker. **Revista Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP)**, v. 13, n. 3, p. 133 -140, 2008.

FTHENAKISV.M.; CHULKIM H.; ALSEMA, E. Emissions from photovoltaic life cycles. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 42, p. 2168-2174, 2008.

GARCIA, F.H.; KRENZINGER, A.; ALÉ, J.A.V. Avaliação do Funcionamento do Sistema Híbrido Eólico Fotovoltaico do LES-UFRGS. **Anais do 5th Latin American Congress on Electricity Generation and Transmission**, v. CD-ROM, São Pedro SP, 2003.

GIANELLI, C. D. A. **Estudo comparativo entre Controle Adaptativo e Controle Fuzzy.** .2013. 88f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2013.

GOPAL, B.; MURTHY, P. K; SREENIVAS, G. N. A review on UPQC for power quality improvement in distribution system. **Double blind peer reviewed international research journal**, USA, v. 13, n.7, p. 42-48, 2013. ISSN 2249-4596.

GREEN, M. A.; EMERY, K.; YOSHIRO, H.; WARTA, W. Solar cell efficiency tables (version 37): **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Chichester, v. 19, p. 84-92, 2011. HEDAOO, N.; GUPTA, M. Review on Power Quality using Unified Power Quality Conditioner (UPQC). **IJournals: International Journal of Software & Hardware Research in Engineering**, v. 5, n. 8, p. 21-24, 2017. ISSN 2347-4890.

IEA – International Energy Agency. Solar PV – Tracking Clean Energy Progress. Disponível em: <<https://www.iea.org/tcep/power/renewables/solar/>>. Acesso em: 22 abr. 2019.

IOANNOU, P. A.; SUN, J. **Robust Adaptive Control**. [S.l.: s.n.], 1996.

KAMRAN, F.; HABELTLER, T., A Novel On-Line UPS with Universal Filtering Capabilities, **IEEE/PESC'95**, pp. 500-506, 1995.

KANIESKI, J. M. et al. Controle RMRAC de um sistema de armazenamento de energia à bateria com geração ótima de referências. **Congresso Brasileiro de Automática**, Juiz de Fora, Brasil, 2008.

KOMURCUGIL H.; KUKRER, O. A new control strategy for single-phase shunt active power filters using a Lyapunov function. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 53, n. 1, p. 305-312, 2006. Disponível em:<[10.1109/TIE.2005.862218](https://doi.org/10.1109/TIE.2005.862218)>.

LI, C. et al. Adaptive Control for Single-Phase Unified Power Quality Conditioner Using Neural Networks. **2007 Second International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications**, Zhengzhou, China, p. 146-150, 2007. Disponível em:<[10.1109/BICTA.2007.4806438](https://doi.org/10.1109/BICTA.2007.4806438)>.

LIMONGI, L. R. **Filtros Ativos de Potência para Compensação de Harmônicos de Corrente e Potência Reativa**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

MACABO, M. D. O.; TERRA, R. R. M. **Projeto de controlador adaptativo por modelo de referência para um motor de corrente contínua simulando uma roda de reação**. 2016. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Instituto Federal Fluminense - IFF, Campos dos Goytacazes, 2016.

MAHMUD, M. A.; POTA, H. R.; HOSSAIN, M. J. Nonlinear Current Control Scheme for a Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic System. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, [S.L], v. 5, n. 1, p. 218-227, 2014. Disponível em:<[10.1109/TSTE.2013.2279884](https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2279884)>.

MASTROMAURO, R. A.; LISERRE, M.; DELL'AQUILA, A. Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems With Power Quality Conditioner Functionality. **2007 European Conference on Power Electronics and Applications**, Aalborg, Denmark, 2007.

MEZA, C. et al. Lyapunov-Based Control Scheme for Single-Phase Grid-Connected PV Central Inverters. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 20, n. 2, p. 520 - 529, 2012. Disponível em:<[10.1109/TCST.2011.2114348](https://doi.org/10.1109/TCST.2011.2114348)>.

MODESTO et al. A Versatile Unified Power Quality Conditioner Applied to Three-Phase Four-Wire Distribution Systems Using a Dual Control Strategy. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 31, n. 8, p. 5503-5514, 2016.

MODESTO, R. A. Estudo, Projeto e Implementação de Sistemas UPQC/UPS Trifásicos Aplicados no Condicionamento Ativo de Energia Elétrica. 2015. 243f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, 2015.

OLIVEIRA, F. M. et al. Grid-ried photovoltaic system based on PSO MPPT technique with active power line conditioning. **IET Power Electronics**, v. 9, n. 6, p 1180-1191, 2016.

OLIVEIRA, T. R. **Distribuição local de energia em corrente contínua: estudo desenvolvimento e implementação de um protótipo de nanorrede c.c. dedicado aos setores residencial e comercial**. 2016. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

PANIGRAHI, R.; MISHRA, S. K; SRIVASTAVA, S. C. Grid Integration of Small-Scale Photovoltaic Systems - A Review. **2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)**. IEEE. Portland, OR, USA. November, 2018. Disponível em: <[10.1109/IAS.2018.8544503](https://doi.org/10.1109/IAS.2018.8544503)>.

PATEL, N. et al. Multifunctional Grid Interactive Solar Photovoltaic Systems: A Comprehensive Review. **INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH**, v. 8, n. 4, p. 2116-2130, 2018.

PENG, F.Z. A Application issues of active power filters. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 4, n. 5, p. 21-30, 1998.

REN21 - **Renewables 2018 Global Status Report**. Renewable Energy Policy Network for 21<sup>st</sup> Century. 2018.

RONG Y. et al. Double Integration Control for Single-Phase Unified Power Quality Conditioner Based on A Neuron Adaptive Harmonic Detection. **Proceedings of the 18th World Congress The International Federation of Automatic Control**, Milano (Italy), p. 2815-2820, 2011. Disponível em :< [10.3182/20110828-6-IT-1002.00570](https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.00570)>.

SAMPAIO, L P.; **Uma nova metodologia de projeto e controle para o inversor Boost (CSI) monofásico para o aproveitamento de fontes alternativas e renováveis de energia elétrica**. 2010. 111f. Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia - Unesp, Ilha Solteira, 2013.

SANTOS, Priscila Alves dos. **Potencial Teórico e Técnico de Geração de Energia a Partir de Biomassa e Fotovoltaica para o estado de São Paulo**. 2017. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Departamento de Sistemas e Energia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

SILVA, S. A. O. D. et al. Single-phase grid-connected photovoltaic system with active power line conditioning. **Eletrônica de Potência**, v. 20, n. 1, p. 8-18, 2015. ISSN 1414-8862.

SILVA, S. A. O. et al. Sistema fotovoltaico com condicionamento ativo de energia usando mppt baseado em pso e malha feed-forward de controle de tensão do barramento cc. **Eletrônica de Potência**, v.21, n.2, p. 105-116, 2016.

SILVA, S. A. O. **Sistema de energia ininterrupta *line interactive* trifásicos com compensação ativa de potência série e paralela**. 2001. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

SILVA, S. A. O.; BACON, V. D. An adaptive phase-locked loop structure for three-phase utility grid-connected systems. **2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)**, Fortaleza, 2015.

SILVEIRA, R. D. **Estudo comparativo de sistemas fotovoltaicos trifásicos de simples e duplo estágio operando com condicionamento ativo de potência**. 2017. 113f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, 2017.

SINGH, B.; AL-HADDAD, K.; CHANDRA, A. A review of active filters for power quality improvement. **IEEE transactions on industrial electronics**, v. 46, n. 5, p. 960-971, 1999.

SINGH, M. et al. Grid Interconnection of Renewable Energy Sources at the Distribution Level with Power-Quality Improvement Features. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 1, 307-315. ISSN 0885-8977.

SOUZA, K. C. A.; SANTOS, W. M. D.; MARTINS, D.C. Optimization of the magnetic core volume in a single-phase grid-connected pv system with active and reactive power control. **Eletrônica de Potência**, v. 18, n. 4, p. 1224-1234, 2013. ISSN 1414-8862.

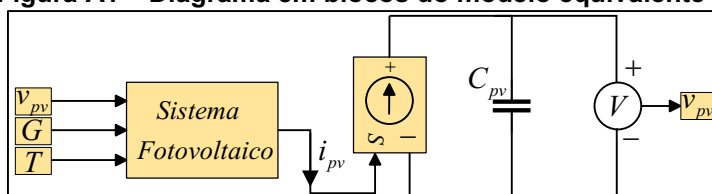
TOLMASQUIM, M. T. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica/ Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.). – EPE: Rio de Janeiro, 2016.

ZILLES, R. et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo, Oficina de Textos, 2012.

## APÊNDICE A – Modelo Equivalente da Célula Fotovoltaica

Na literatura, (CASARO; MARTINS, 2008) apresenta o equacionamento por meio de um circuito equivalente que descreve o funcionamento da célula fotovoltaica considerando as não idealidades, o qual pode ser representado por uma fonte de corrente conectada em paralelo com um capacitor, Figura A.1.

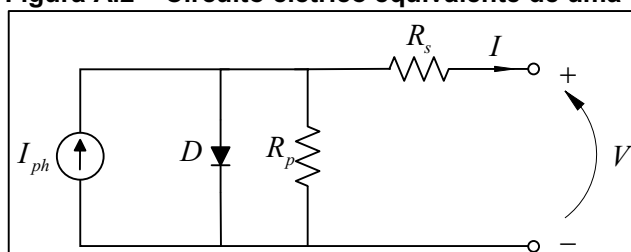
**Figura A1 – Diagrama em blocos do modelo equivalente do sistema PV.**



Fonte: Autoria Própria (2020).

Onde,  $v_{pv}$  e  $i_{pv}$  representam a tensão e a corrente do sistema fotovoltaico. As variáveis  $G$  e  $T$  indicam as condições climáticas, sendo a temperatura em Kelvin e a irradiação solar em  $W/m^2$ , respectivamente.

**Figura A.2 – Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.**



Fonte: Autoria Própria (2020).

A determinação da corrente  $i_{pv}$ , mostrada na Figura A.1 de saída da célula fotovoltaica é expressa pela equação (A.1).

$$i_{pv} = I * M_p \quad (A.1)$$

Em que  $M_p$  indica o número de placas fotovoltaicas colocadas em paralelo.

Já  $I$  pode ser obtido pela equação (A.2)

$$I = I_{ph} - I_r (e^{q(V+R_s I)/\eta k T} - 1) - \frac{(V + R_s I)}{R_p} \quad (\text{A.2})$$

Onde:  $V$  é a tensão de saída da célula fotovoltaica,  $I$  é a corrente de saída da célula fotovoltaica,  $I_{ph}$  é a fotocorrente,  $I_r$  é a corrente de saturação reversa da célula,  $R_s$  e  $R_p$  resistência série e paralela, respectivamente,  $q$  é a carga do elétron dada por  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ,  $n$  é o fator de idealizada da junção p-n,  $k$  é a constante de Boltzmann dada por  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ .

A influência das variáveis climáticas  $G$  e  $T$  está condicionado a fotocorrente  $I_{ph}$  que depende desses parâmetros, a equação (A.3) descreve essa relação. Já a corrente de saturação reversa da célula  $I_r$  é descrita pela equação (A.4).

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha(T - T_r)] \left( \frac{G}{1000} \right) \quad (\text{A.3})$$

$$I_r = I_{rr} \left( \frac{T}{T_R} \right)^3 e^{\left[ \frac{qE_g}{\eta k} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (\text{A.4})$$

Em circuito aberto,  $I = 0$  e  $V = V_{oc}$ , a corrente de saturação reversa da célula é dada por:

$$I_r = \frac{I_{ph} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{qV_{oc}/\eta k T} - 1} \quad (\text{A.5})$$

Nas condições STC, a corrente de saturação reversa da célula é igual a corrente de saturação reversa de referência  $I_r = I_{rr}$ , que pode ser obtido por (A.6):

$$I_{rr} = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{qV_{oc}/\eta k T} - 1} \quad (\text{A.6})$$



Onde, nessas três últimas equações,  $I_{sc}$  é a corrente de curto-circuito por célula,  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto por célula,  $\alpha$  é o coeficiente de temperatura de  $I_{sc}$ ,  $T_r$  é temperatura de referência 298 K.

Entretanto para a solução de (A.2) é necessário a utilização de algum método numérico, já que não há solução algébrica. Como uma alternativa de solução, (CASARO; MARTINS, 2008) apresenta o método número de Newton Rapshon, que aplicado em (A.2) resulta nas equações (A.7) e (A.8)

$$f(I) = I_{ph} - I - I_r (e^{q(V+R_s I)/\eta k T} - 1) - \frac{(V + R_s I)}{R_p} \quad (\text{A.7})$$

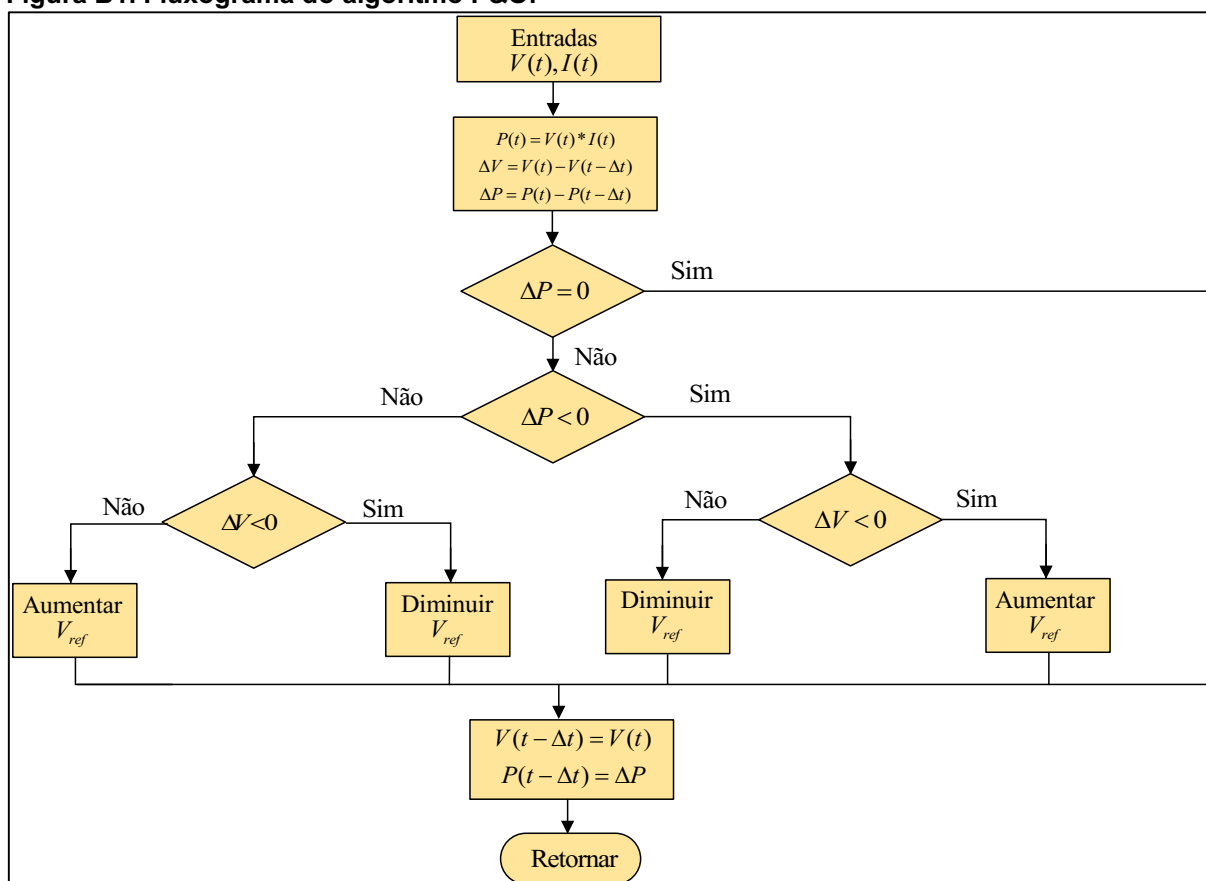
$$f'(I) = -1 - I_r (e^{q(V+R_s I)/\eta k T}) - \frac{q R_s}{\eta k T} - \frac{R_s}{R_p} \quad (\text{A.8})$$

A partir da solução das equações apresentadas é possível gerar as curvas características I-V e P-V.

## APÊNDICE B – Técnica de Seguimento do Ponto de Máxima Potência P&O

O método da Perturbação e Observação (P&O - *Perturb and Observe*) funciona incrementando e decrementando periodicamente a tensão de saída do PV e comparando com a potência do passo anterior e atual. Sendo assim, caso a tensão altere e a potência se intensifica, o sistema de controle atua no ponto de operação continuando na posição medida, entretanto se a tensão não mudar, o ponto de operação atua na posição oposta, conforme pode ser visto na Figura B.1. Este método requer sensores de tensão e de corrente para o cálculo da potência (BRITO, 2013).

Figura B1. Fluxograma do algoritmo P&O.



Fonte: Autoria Própria (2020).

## ANEXO A – Módulo 8 – PRODIST

Referentes aos fenômenos da qualidade do produto em regime permanente, o módulo 8 apresenta, os fenômenos de: tensão em regime permanente; fator de potência; harmônicos; desequilíbrio de tensão; flutuação de tensão; variação de frequência. Neste apêndice será abordado apenas os fenômenos pertinentes ao trabalho.

### A.1 Tensão em regime permanente

No que diz respeito a tensão permanente, a mesma é avaliada sob três perspectivas: no ponto de conexão entre as distribuidoras, no ponto de conexão com o acessante, ou ainda no ponto de conexão com a rede elétrica de distribuição. A forma de validação é feita por limites estabelecidos e indicadores de conformidade. É importante salientar que a medição deve seguir uma padronização entre o valor estabelecido de acordo com o nível de tensão.

### A.2 Fator de Potência

O PRODIST define uma forma de calcular o Fator de Potência (FP) por meio da potência ativa (P) e reativa (Q), ou ainda da energia ativa (EA) e energia reativa (ER), apresentada pela equação (A.1).

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \text{ ou } FP = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (\text{A.1})$$

Em posse disso, os limites tolerados devem estar no range de 0,92 e 1 indutivo e entre 1 e 0,92 capacitivo, isso considerando uma instalação de tensão inferior a 230kV.

### A.3 Flutuação de Tensão

É entendido como flutuação de tensão toda variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão entregue ao usuário. Esse fenômeno pode ser

classificado como adequado, precário ou crítico, quando é sentido o efeito da cintilação luminosa em consumidores de baixa tensão, ou seja, quando ocorre repetitividade no nível e na oscilação luminosa.

#### A.5 Desiquilíbrio de Tensão

Pertinente a sistemas trifásicos, o desiquilíbrio de tensão tem a finalidade de extinguir as componentes de sequência zero do sistema elétrico. Este, pode ser mensurado pelo Fator de Desiquilíbrio (FD), expresso pela equação (A.2).

$$FD = \frac{V_-}{V_+} * 100\% \quad (A.2)$$

Em que,  $V_-$  indica o valor eficaz de tensão de sequência negativa e  $V_+$  o valor eficaz de tensão de sequência positiva.

#### A.6 Variação de Frequência

No Brasil, a frequência operante é de 60Hz, sendo assim, os limites toleráveis apresentado pelo módulo 8 em regime permanente estão definidos entre 59,9Hz e 60,1 Hz.

#### A.7 Harmônicos

Em relação as distorções harmônicas o módulo 8 estabelece limites máximos admissíveis referentes a tensão nominal do sistema de distribuição. Dessa forma, são definidos quatros indicadores que visam reduzir as frequências múltiplas da fundamental no sistema de distribuição. Esses indicadores, são distorção harmônica total de tensão ( $DTT\%$ ), distorção harmônica total de tensão para componentes múltiplas de 3 ( $DTT_3\%$ ), distorção harmônica total de tensão para componentes pares não múltiplas de 3 ( $DTT_p\%$ ) e distorção harmônica total de tensão para componentes ímpares não múltiplas de 3 ( $DTT_i\%$ ), representado pelas equações (A.3), (A.4), (A.5), (A.6) respectivamente.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} * 100\% \quad (\text{A.3})$$

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} * 100\% \quad (\text{A.4})$$

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} * 100\% \quad (\text{A.5})$$

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} * 100\% \quad (\text{A.6})$$

Onde,  $h$  é a ordem harmônica,  $h_{\max}$  é a ordem máxima,  $h_3$  são as ordens harmônicas múltiplas de 3;  $h_p$  são as ordens harmônicas pares não múltiplas de 3;  $h_i$  são as ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3;  $V_h$  é a tensão harmônica de ordem  $h$  e  $V_1$  é a tensão fundamental.

Conforme mencionado, os limites são definidos de acordo com a classe de tensão de pertinte ao consumidor. A Tabela A.1 apresenta os valores dos indicadores apresentados.

Tabela A.1 – Limites de Distorção Harmônicos de Tensão

Indicador (superado em % de 1008 leituras válidas)	$V_n < 1kV$	$1kV < V_n < 69kV$	$69kV < V_n < 230kV$
$DTT\%$	10,0%	8,0%	5,0%
$DTT_3\%$	6,5%	5,0%	3,0%
$DTT_p\%$	7,5%	2,0%	1,0%
$DTT_1\%$	6,5%	6,0%	4,0%

Fonte: ANEEL PRODIST (2018).

No Brasil, a frequência operante é de 60Hz, sendo assim, os limites toleráveis apresentado pelo módulo 8 em regime permanente estão definidos entre 59,9Hz e 60,1 Hz.