

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE
COMPUTAÇÃO

LÁZARO RUBENS ARAÚJO PINTO

**Aplicação de Controlador Preditivo
Baseado em Modelo (MPC) para
Sistema de Geração Distribuída
Constituído por Inversor Trifásico a
Quatro Braços**

Goiânia
2017

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

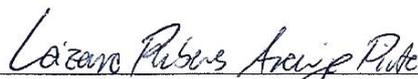
Nome completo do autor: Lázaro Rubens Araújo Pinto

Título do trabalho: Aplicação de Controlador Preditivo Baseado em Modelo (MPC) para Sistema de Geração Distribuída Constituído por Inversor Trifásico a Quatro Braços

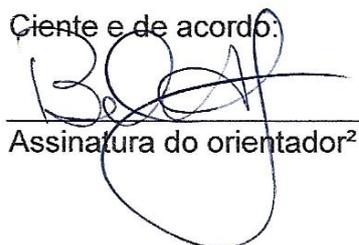
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do autor²

Ciente e de acordo:


Assinatura do orientador²

Data: 20 / 09 / 2017

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa.

² A assinatura deve ser escaneada.

LÁZARO RUBENS ARAÚJO PINTO

Aplicação de Controlador Preditivo Baseado em Modelo (MPC) para Sistema de Geração Distribuída Constituído por Inversor Trifásico a Quatro Braços

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Área de concentração: Sistemas Eletroeletrônicos (SEE).

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga

Co-Orientador: Prof. Dr. Sérgio Pires Pimentel

Goiânia
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Pinto, Lázaro Rubens Araújo

Aplicação de Controlador Preditivo Baseado em Modelo (MPC) para Sistema de Geração Distribuída Constituído por Inversor Trifásico a Quatro Braços [manuscrito] / Lázaro Rubens Araújo Pinto. - 2017. 110 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga; co orientador Dr. Sérgio Pires Pimentel.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2017.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Controle Preditivo. 2. Inversor Trifásico a Quatro Braços. 3. Geração Distribuída. 4. Qualidade da Energia Elétrica. 5. Processamento de Energia Elétrica. I. Alvarenga, Bernardo Pinheiro de, orient. II. Título.

CDU 621.3

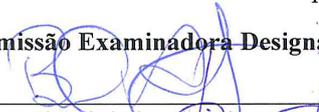
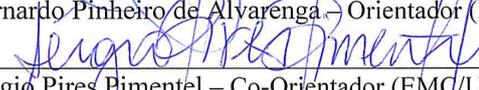
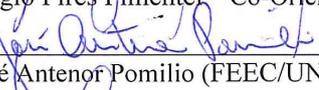


Ata de Dissertação de Mestrado

Ata da sessão de julgamento da Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação, área de concentração Engenharia Elétrica, do candidato **Lázaro Rubens Araújo Pinto**, realizada em 7 de agosto de 2017.

Aos sete dias do mês de agosto de dois mil e dezessete, às 13:00 horas, na sala *Caryocar brasiliensis*, bloco “A” da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG), reuniram-se os seguintes membros da Comissão Examinadora designada pela Coordenadoria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação: Os Doutores Bernardo Pinheiro de Alvarenga – Orientador (EMC/UFG), Sérgio Pires Pimentel – Co-Orientador (EMC/UFG), José Antenor Pomílio (FEE/UNICAMP) e Enes Gonçalves Marra (EMC/UFG), para julgar a Dissertação de Mestrado de **Lázaro Rubens Araújo Pinto**, intitulada **“Aplicação de Controlador Preditivo Baseado em Modelo (MPC) para Sistema de Geração Distribuída Constituído por Inversor Trifásico a Quatro Braços”**, apresentada pelo Candidato como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre, em conformidade com a regulamentação em vigor. O Professor Doutor Bernardo Pinheiro de Alvarenga, Presidente da Comissão, abriu a sessão e apresentou o candidato que discorreu sobre seu trabalho, após o que, foi arguido pelos membros da Comissão na seguinte ordem: José Antenor Pomílio e Enes Gonçalves Marra. A parte pública da sessão foi então encerrada e a Comissão Examinadora reuniu-se em sessão reservada para deliberar. A Comissão julgou então que o candidato, tendo demonstrado conhecimento suficiente, capacidade de sistematização e argumentação sobre o tema de sua Dissertação, foi considerado **APROVADO** e deve satisfazer as exigências listadas na Folha de Modificação de Dissertação de Mestrado, em anexo a esta Ata, no prazo máximo de 60 (sessente) dias, ficando o professor orientador responsável por atestar o cumprimento dessas exigências. Os membros da Comissão Examinadora descreveram as justificativas para tal avaliação em suas respectivas Folhas de Avaliação, anexas a esta Ata. Nada mais havendo a tratar, o presidente da Comissão declarou encerrada a sessão. Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-graduação desta Universidade, a presente Ata foi lavrada, lida e, julgada conforme, segue assinada pelos membros da Comissão supracitados e pelo candidato. Goiânia, 7 de agosto de 2017.

Comissão Examinadora Designada:

 Bernardo Pinheiro de Alvarenga – Orientador (EMC/UFG)	(Avaliação: <u>aprovado</u>)
 Sérgio Pires Pimentel – Co-Orientador (EMC/UFG)	(Avaliação: <u>Aprovado</u>)
 José Antenor Pomílio (FEE/UNICAMP)	(Avaliação: <u>aprovado</u>)
 Enes Gonçalves Marra (EMC/UFG)	(Avaliação: <u>aprovado</u>)

Candidato:



LÁZARO RUBENS ARAÚJO PINTO

À minha amada avó, Dona Beatriz,
Aos meus pais, Seu Rubens e Dona Ana-Beatriz,
E ao meu irmão Flávio.
Amo vocês.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus.

Aos meus pais, meu irmão e meus avós que sempre me deram apoio e incentivo nas decisões, cobranças nas responsabilidades e aprendizado nas oportunidades em todas as fases de minha vida. Vocês são os responsáveis por aquele que me tornei.

Agradeço de forma especial, a todos os meus familiares pelo apoio e incentivo.

Aos professores Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga e Dr. Sérgio Pires Pimentel pelo tempo, dedicação, atendimentos nas dúvidas e também por terem acreditado em meu potencial. A minha admiração por vocês é enorme.

Aos professores Fausto Oliveira Carvalho, Ms. Dori Rodrigues de Souza, Ms. Victor Racy Abdalla, Dra. Kênia Alves Pereira Lacerda, Dr. André Luiz Silva Pereira, Dr. Marcelo Semensato, Tiago Romeiro de Jesus, Ms. Fernando Nunes Marques e Dr. Fernando Silva Pereira, pelos ensinamentos, não só na engenharia, pelo apoio e incentivo nesta caminhada profissional.

Aos amigos Luis Fernando, Renato Silva, Renato Prado, Anderson, Thaíssa, Ciliana, Wallison, Arthur, Henrique, Lucas, Beatriz, Morgan, Jéssica e Phillipe pelas inúmeras conversas e ajuda mútua, pela amizade de vocês, pela oportunidade de trocar conhecimento e não menos importante, pela ajuda com a manutenção e softwares, dúvidas com *MatLab* e *LaTeX* e muito mais. E aos amigos de longa data Maikon, Pedro, Jucelino, Leonardo, Gabriel, John, Nataniel e Murilo. Obrigado pelo apoio de todos.

Agradeço à Universidade Federal de Goiás (UFG) e a todos os envolvidos que influenciaram diretamente ou indiretamente para que o programa de pós-graduação pudesse tornar-se uma realidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

E a todos aqueles que de alguma forma me apoiaram e incentivaram concluir mais esta etapa. Vocês são demais.

Muito obrigado a todos vocês!

Resumo

Pinto, Lázaro Rubens Araújo. **Aplicação de Controlador Preditivo Baseado em Modelo (MPC) para Sistema de Geração Distribuída Constituído por Inversor Trifásico a Quatro Braços**. Goiânia, 2017. 109p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás.

Este trabalho propõe uma análise da operação em malha fechada de um sistema de geração distribuída para conexão em um sistema trifásico a quatro fios, a partir do controle de um inversor trifásico a quatro braços. A estratégia de modulação adotada para este inversor é determinada pelo método de controle preditivo baseado em modelo (MPC - *Model Predictive Control*). Justificativas para a utilização dessa topologia e do método de controle são discutidas. A estrutura escolhida para o controle preditivo MPC objetiva o fornecimento de potência ativa e reativa pelo inversor tendo em vista a maximização do fator de potência medido a partir da fonte pela fonte CA a quatro fios (Y-n). Quatro casos são abordados para análise da proposta no inversor trifásico a quatro braços e dois casos para um inversor trifásico em ponte completa (3F) para efeito de comparação. Baseando-se no monitoramento das potências elétricas envolvidas e nas demais grandezas de interesse, foi possível concluir que os resultados de simulações exemplificam o alcance dos objetivos propostos e validam o método adotado, pelo menos em relação à modelagem matemática empregada e à simulação do sistema de geração proposto em ambiente computacional.

Palavras-chave

Controle Preditivo, Inversor Trifásico a Quatro Braços, Geração Distribuída, Qualidade da Energia Elétrica, Processamento de Energia Elétrica

Abstract

Pinto, Lázaro Rubens Araújo. **Application of Model Predictive Controller (MPC) for Distributed Generation System Consisting of Three-Phase Four-Leg Inverter.** Goiânia, 2017. 109p. MSc. Dissertation. Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás.

This work proposes an analysis of the closed-loop operation of a distributed generation system connected to a three-phase four-wire AC power system by a three-phase four-leg inverter. The modulation strategy adopted for this inverter is determined by the Model Predictive Control (MPC) method. Reasons for the use of this topology and the control method are discussed. The chosen structure for the MPC predictive control aims to supply of active and reactive power by the inverter in order to maximize the power factor measured by the four-wire AC source (Y-n). Four possible cases of operation are reported for the analysis of the proposal in the three-phase four-leg inverter and other two cases for a three-phase full-bridge inverter (3F) for comparison purposes. Based on the monitoring of the active powers involved and the other variables of interest, it was possible to exemplify the achievement of the proposed objectives and validate the adopted method, at least under modeling and software simulation level.

Keywords

Predictive Control, Three-Phase Four-Leg Inverter, Distributed Generation, Power Quality, Power Processing Systems

Sumário

Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas	14
1 Introdução	15
1.1 Objetivos	16
1.2 Organização do Trabalho	17
1.3 Publicações Vinculadas	17
2 Conversores e Reguladores Chaveados	18
2.1 Inversor Monofásico em Ponte Completa	19
2.2 Inversor Trifásico em Ponte Completa	20
2.3 Inversor Trifásico a Quatro Braços	21
2.4 Conclusões Parciais	22
3 Modelagem e Controle	23
3.1 Modelagem em Variáveis de Estado	23
3.1.1 Equacionamento de Estados para o Inversor Trifásico em Ponte Completa	25
3.1.2 Equacionamento de Estados para o Inversor Trifásico a Quatro Braços	27
3.2 Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC)	30
3.2.1 Vantagens e Desvantagens do MPC	31
3.2.2 Descrição do Modelo	31
3.3 Conclusões Parciais	33
4 Estudo de Caso	34
4.1 Inversor Trifásico em Ponte Completa	34
4.1.1 Caso 1	38
4.1.2 Caso 2	45
4.2 Inversor Trifásico a Quatro Braços	52
4.2.1 Caso 3	53
4.2.2 Caso 4	63
4.2.3 Caso 5	70
4.2.4 Caso 6	76
4.3 Análise de Sensibilidade para Parâmetros R e L ao inversor	82
4.3.1 Avaliação de Sensibilidade do Indutor L_{INV}	83
4.3.2 Avaliação de Sensibilidade do Resistor R_{INV}	89
4.4 Conclusões Parciais	95

5	Conclusões Finais	97
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	98
	Referências Bibliográficas	100
A	Códigos Utilizados no Controlador	104
A.1	Código de Controle para o Inversor Trifásico em Ponte Completa	104
A.2	Código de Controle para o Inversor Trifásico a Quatro Braços	107

Lista de Figuras

2.1	Modelo de inversor monofásico em ponte completa.	19
2.2	Modelo de inversor trifásico em ponte completa.	20
2.3	Modelo de inversor trifásico a quatro braços.	21
3.1	Modelo do inversor trifásico em ponte completa com filtro RL, em acréscimo à figura 2.2.	26
3.2	Modelo do inversor trifásico a quatro braços com filtro RL, em acréscimo à figura 2.3.	28
4.1	Sistema elétrico utilizado na simulação com inversor trifásico em ponte completa.	35
4.2	Tensões de fase no PAC.	37
4.3	Correntes na carga (i_L).	38
4.4	Correntes fornecidas pela fonte (i_S).	39
4.5	Correntes injetadas pelo inversor (i_{INV}).	39
4.6	Referências para as correntes na fonte (i_{SREF}).	40
4.7	Correntes na fase A para a carga (i_L), para a fonte (i_S), na saída do inversor (i_{INV}) e referência de corrente para a fonte (i_{SREF}) no ramo U.	40
4.8	Potências nas saídas do inversor (P_{INV}).	41
4.9	Potências na carga (P_L).	42
4.10	Potências na rede CA (P_S).	42
4.11	Potências nas saídas do inversor (P_{INV}), na carga (P_L) e na rede CA (P_S).	43
4.12	Fator de potência (FP).	43
4.13	FFT das tensões de fase – obtido a partir das tensões apresentadas na figura 4.2.	44
4.14	FFT das correntes – obtido a partir das correntes apresentadas na figura 4.4.	44
4.15	Correntes na carga (i_L).	45
4.16	Corrente fornecidas pela fonte (i_S).	46
4.17	Referências para as correntes na fonte (i_{SREF}).	46
4.18	Correntes injetadas pelo inversor (i_{INV}).	47
4.19	Correntes na fase A para a carga (i_L), para a fonte (i_S), na saída do inversor (i_{INV}) e referência de corrente para a fonte (i_{SREF}) no ramo U.	47
4.20	Erro obtido entre a corrente de referência (i_{SREF}) e a corrente na rede CA (i_S).	48
4.21	Potências na rede CA (P_S)	49
4.22	Potências na carga (P_L)	49
4.23	Potências nas saídas do inversor (P_{INV}).	50
4.24	Potências nas saídas do inversor (P_{INVL}), na carga (P_L) e na rede CA (P_S).	50

4.25	Fator de potência (FP).	51
4.26	FFT das tensões de fase na rede CA.	51
4.27	FFT das correntes na rede CA.	52
4.28	Sistema elétrico utilizado na simulação com inversor trifásico a quatro braços.	53
4.29	Tensões de fase no PAC.	54
4.30	Correntes na carga (i_L).	55
4.31	Correntes fornecidas pela rede CA (i_S).	56
4.32	Correntes injetadas pelo inversor (i_{INV}).	56
4.33	Referências para as correntes na fonte (i_{SREF}).	57
4.34	Correntes na fase A para a carga (i_L), para a fonte (i_S), na saída do inversor (i_{INV}) e referência de corrente para a fonte (i_{SREF}) no ramo U .	58
4.35	Erro obtido entre a corrente de referência (i_{SREF}) e a corrente na rede CA (i_S).	58
4.36	Potências nas saídas do inversor (P_{INV}).	59
4.37	Potências na carga (P_L).	59
4.38	Potências na rede CA (P_S).	60
4.39	Potências no inversor (P_{INV}), na carga (P_L) e na rede CA (P_S).	60
4.40	Fator de potência (FP).	61
4.41	FFT das tensões de fase.	61
4.42	FFT das correntes.	62
4.43	Posição de chaveamento, de acordo com a Tabela 2.3	62
4.44	Valores obtidos pela função custo para o caso 3.	63
4.45	Correntes na carga (i_L).	64
4.46	Correntes fornecidas pela fonte (i_S).	64
4.47	Correntes injetadas pelo inversor (i_{INV}).	65
4.48	Referências para as correntes na fonte (i_{SREF}).	65
4.49	Correntes na fase A para a carga (i_L), para a fonte (i_S), na saída do inversor (i_{INV}) e referência de corrente para a fonte (i_{SREF}) no ramo U .	66
4.50	Potências nas saídas do inversor (P_{INV}).	66
4.51	Potências na carga (P_L).	67
4.52	Potências na rede CA (P_S).	67
4.53	Potências no inversor (P_{INV}), na carga (P_L) e na rede CA (P_S).	68
4.54	Fator de potência (FP).	68
4.55	FFT das tensões de fase.	69
4.56	FFT das correntes.	69
4.57	Correntes na carga (i_L).	70
4.58	Correntes fornecidas pela fonte (i_S).	71
4.59	Correntes injetadas pelo inversor no PAC (i_{INV}).	72
4.60	Referências para as correntes na fonte (i_{SREF}).	72
4.61	Correntes na fase A para a carga (i_L), para a fonte (i_S), na saída do inversor (i_{INV}) e referência de corrente para a fonte (i_{SREF}) no ramo U .	73
4.62	Potências nas saídas do inversor (P_{INV}).	74
4.63	Potências na carga (P_L).	74
4.64	Potências na rede CA (P_S).	75
4.65	Potências nas saídas do inversor (P_{INV}), na carga (P_L) e na rede CA (P_S).	75
4.66	FFT das tensões.	76

4.67	Correntes na carga (i_L).	77
4.68	Correntes fornecidas pela fonte (i_S).	77
4.69	Correntes injetadas pelo inversor no PAC (i_{INV}).	78
4.70	Referências para as correntes na fonte (i_{SREF}).	78
4.71	Correntes na fase A para a carga (i_L), para a fonte (i_S), na saída do inversor (i_{INV}) e referência de corrente para a fonte (i_{SREF}) no ramo U .	79
4.72	Potências nas saídas do inversor (P_{INV}).	79
4.73	Potências na carga (P_L).	80
4.74	Potências na rede CA (P_S).	80
4.75	Potências nas saídas do inversor (P_{INV}), na carga (P_L), e na rede CA (P_S).	81
4.76	FFT das tensões.	82
4.77	Tensões na fase A para diferentes valores de L_{INV} .	84
4.78	Corrente na carga (i_L).	84
4.79	Correntes fornecidas pela fase A da fonte (i_S) para as indutâncias aplicadas.	84
4.80	Corrente injetada no PAC pelo inversor (i_{INV}).	85
4.81	Corrente de referência a ser obtida na fonte (i_{SREF}).	85
4.82	Diferença obtida entre a corrente na rede CA i_S e a referencia para a corrente na rede CA i_{SREF} (Função custo (g)).	86
4.83	Potências na saída do inversor (P_{INV}).	86
4.84	Potências na carga (P_L).	87
4.85	Potências na rede CA (P_S).	87
4.86	Fator de Potência (FP).	87
4.87	FFT das tensões.	88
4.88	FFT das correntes.	88
4.89	Tensões na fase A para diferentes valores de R_{INV} .	90
4.90	Corrente na carga (i_L).	90
4.91	Corrente fornecida pela rede CA (i_S).	91
4.92	Corrente injetada no PAC pelo inversor (i_{INV}).	91
4.93	Corrente de referência a ser obtida na fonte (i_{SREF}).	92
4.94	Diferença obtida entre a corrente na rede CA i_S e a referencia para a corrente na rede CA i_{SREF} .	92
4.95	Potências nas saídas do inversor (P_{INV}).	93
4.96	Potências na carga (P_L).	93
4.97	Potências na rede CA (P_S).	94
4.98	Fator de Potência (FP).	94
4.99	FFT das tensões.	95
4.100	FFT das correntes.	95

Lista de Tabelas

2.1	Estados do inversor monofásico em ponte completa.	20
2.2	Estados do inversor trifásico em ponte completa.	20
2.3	Possíveis estados de comutação do inversor trifásico a quatro braços.	22
4.1	Dados utilizados nas simulações.	36
4.2	Dados utilizados nas simulações.	54
4.3	Dados utilizados nas simulações referentes à avaliação de tolerância dos parâmetros.	83
4.4	Distorção harmônica total (DHT) das tensões perante a variação da indutância L_{INV} .	88
4.5	Distorção harmônica total (DHT) das correntes perante a variação da indutância L_{INV} .	89
4.6	Distorção harmônica total (DHT) das tensões perante a variação da resistência R_{INV} .	92
4.7	Distorção harmônica total (DHT) das correntes perante a variação da resistência R_{INV} .	94

Introdução

O crescente aumento da demanda de energia elétrica no mundo juntamente à necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e a procura iminente por fontes limpas e renováveis de energia elétrica tem levado à procura de novas fontes e métodos de geração de energia elétrica [1].

Conforme é apresentado em [2], a geração energética em centrais de grande porte tem apresentado custos mais elevados. Existem atualmente diversas restrições ambientais que influenciam diretamente na complexidade do crescimento do setor elétrico brasileiro, a redução da disponibilidade de grandes potenciais hídricos para grandes investimentos, o custo das geradoras de grande porte (unidades geradoras centralizadas) e o tempo necessário para a realização das obras, além dos impactos ambientais gerados, de modo que as empresas são obrigadas a utilizar métodos inovadores de geração de energia elétrica para equilibrar a relação de oferta e demanda no mercado atual.

Assim, em contrapartida à geração centralizada de energia elétrica surgiu, a partir do decreto presidencial de número 5.163 de 2004 [3], a opção de geração distribuída (GD) no Brasil, que é definida como a produção de energia elétrica a partir de empreendimentos permissionários, concessionários ou autorizados conectados diretamente ao sistema elétrico de distribuição do comprador, podendo ser estes empreendimentos usinas hidrelétricas com capacidade inferior a 30 kW, usinas eólicas, fotovoltaicas ou ainda termoelétricas que gerem energia através da cogeração.

No mês de Abril de 2012 foi publicada a resolução 412 pela ANEEL [4]. Tal documento foi a primeira legislação que incluiu o consumidor de baixa tensão (BT) como microgerador. Posteriormente, com a publicação da resolução 687 da ANEEL em 2015 [5] a resolução 482 foi revisada, passando por alterações e inclusões de novos artigos. A resolução 687 também alterou os módulos 1 e 3 do PRODIST.

Tratando em específico da geração fotovoltaica, a forma mais comum de GD [6], surge a necessidade do uso de um conversor CC/CA para que a energia gerada pelo conjunto de placas fotovoltaicas CC seja convertida e injetada na rede de distribuição CA, conforme dispõe a resolução 687 da ANEEL [5].

A ANEEL regulamenta também, através do módulo 3 do PRODIST [7] os

critérios mínimos a serem seguidos para acesso ao sistema de distribuição de energia elétrica. Paralelamente, o módulo 8 do PRODIST [8] apresenta os critérios mínimos estabelecidos para garantir a qualidade da energia elétrica (QEE) na rede e valores de referência, assim como as devidas metodologias para aferição destes.

De acordo com os módulos do PRODIST, com a necessidade de controle da distorção harmônica total (DHT) e do fator de potência (FP), é proposta a aplicação do método de controle preditivo baseado em modelo (MPC - *Model Predictive Control*) na operação de um conversor estático de potência CC/CA a quatro braços (4-leg) que compõe um sistema de GD fotovoltaica.

Devido ao crescente aumento das cargas, sejam elas lineares ou não-lineares, e das conexões nem sempre equilibradas em consumidores residenciais, comerciais e industriais, o inversor trifásico a quatro braços é utilizado no presente estudo por possuir conexão a quatro fios (3F+N) em baixa tensão (220/380 V), o que possibilita a correção do desequilíbrio das correntes nas fases, o fornecimento de potência ativa e a compensação de potência reativa à rede CA de forma a estabilizar o sistema de energia em termos de tensão e frequência conforme os parâmetros estabelecidos pela rede [6].

1.1 Objetivos

O trabalho tem por objetivo geral a aplicação do MPC na operação de um conversor estático de potência CC/CA trifásico a quatro braços alimentado por uma fonte de tensão contínua estabilizada.

Também é possível listar os seguintes objetivos específicos:

- Compreender a topologia do inversor trifásico a quatro braços;
- Compreender a função custo e o que ela representa no modelo de controle e nos conversores;
- Compreender a operação do inversor aplicado em um sistema de geração distribuída;
- Observar as principais diferenças entre inversores a três braços e a quatro braços;
- Contribuir com o controle e chaveamento destinados à injeção de potência que possam provocar melhorias na QEE;
- Reduzir o desequilíbrio das correntes na rede CA na tentativa de alcançar o equilíbrio mesmo quando houver cargas desbalanceadas conectadas;
- Reduzir as distorções harmônicas de tensões e correntes;
- Ajustar o fator de potência;

1.2 Organização do Trabalho

No capítulo 2 são apresentadas algumas topologias típicas utilizadas para conversão de grandezas CC em CA, os inversores monofásicos e trifásicos em ponte completa, e o inversor trifásico a quatro braços.

A seguir, no capítulo 3 é apresentada a modelagem em variáveis de estado do inversor trifásico a quatro braços e sua representação em forma matricial utilizada na proposta do sistema de geração distribuída em estudo. Neste capítulo também é tratado o método de controle preditivo baseado em modelo, em que são descritos seu princípio de operação, a função de minimização baseada na função custo e outros itens pertinentes.

Os resultados obtidos por simulações dos casos apresentados com o uso da proposta do MPC aplicados aos inversores em questão para simulação da conexão à rede CA em GD são apresentados e discutidos no capítulo 4.

E no capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais, bem como sugestões para continuidade deste trabalho.

1.3 Publicações Vinculadas

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram submetidos artigos a congressos e eventos, são eles:

- Artigo intitulado: “Uso do controlador preditivo na operação de um inversor monofásico de ponte completa”. Foi apresentado em forma de pôster e publicado nos anais do CONPEEX 2016, evento realizado pela UFG [9].
- Artigo intitulado: “Aplicação do método de controle preditivo baseado em modelo (MPC) para um filtro ativo trifásico a quatro braços” apresentado no CBQEE 2017.
- Artigo intitulado: “Proposal of model predictive control (MPC) method for a four-leg three-phase inverter applied in a distributed generation system” submetido ao COBEP 2017. Artigo aceito para apresentação no congresso a ser realizado no mês de Novembro de 2017.

Conversores e Reguladores Chaveados

Os conversores CC/CA ou inversores, como também são denominados, são circuitos estáticos que convertem uma grandeza elétrica contínua em outra grandeza elétrica alternada com frequência e tensão de saída, ou corrente de saída desejadas [10].

A função básica de um inversor é a partir de uma fonte contínua (de tensão ou corrente) aplicada à sua entrada, obter na saída um sinal alternado, de valor médio nulo, com amplitude simétrica e frequência constante [11].

Os inversores são considerados como um dos principais componentes de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) [2] pois é através destes circuitos elétricos estáticos que a potência é convertida (CC/CA) e injetada na rede elétrica com tensões de amplitude e frequência variáveis e desejadas, cabendo ao projetista determinar os critérios adequados às necessidades do sistema [12].

Os inversores podem ser classificados em três categorias de inversores autônomos [11], dependendo do tipo de grandeza alternada que se desejada na saída:

- Conversor CC/CA de tensão;
- Conversor CC/CA de corrente;
- Conversor CC/CA regulado em corrente;

O primeiro, conversor CC/CA de tensão, opera com uma entrada de tensão contínua e o sinal gerado na saída é uma fonte de tensão alternada. O conversor CC/CA de corrente tem como entrada uma fonte de corrente contínua, a saída é uma onda de corrente alternada. Por sua vez, o conversor CC/CA regulado em corrente apresenta na saída uma onda de corrente alternada, da mesma forma que o conversor CC/CA de corrente, entretanto, o conversor CC/CA regulado é alimentado por uma fonte de tensão contínua em vez de uma fonte de corrente contínua [11], também chamado de inversor fonte de tensão (VSI) controlado por corrente.

Conforme é sabido, a tensão na rede elétrica é estabelecida pelo sistema elétrico de potência de forma que a tensão em um ponto de acoplamento comum (PAC) é fixa, e por isso, faz-se necessário um conversor CC/CA regulado em corrente.

Neste capítulo são descritas as topologias dos inversores monofásico em ponte, trifásico em ponte completa (3F) e trifásico a quatro braços (3F+N), sendo este último o objeto principal de estudo para aplicação do modelo de controle utilizado. São apresentados também os estados de chaveamento das respectivas topologias. As formas de onda pertinentes às topologias trifásicas são apresentadas adiante no Capítulo 4.

As topologias em estudo operam com chaveamento em dois níveis. Assim, de acordo com o número braços de cada inversor e a operação em dois níveis, é calculada a quantidade de estados possíveis para cada topologia em questão. Este número de estados pode ser obtido a partir de (2-1)

$$N_{Estados} = 2^n \quad (2-1)$$

Em que: $N_{Estados}$ é o número de estados possíveis para a topologia, e n corresponde à quantidade de braços de chaveamento que o inversor possui.

2.1 Inversor Monofásico em Ponte Completa

O inversor monofásico em ponte completa (*full-bridge*) é constituído por dois braços, cada qual com dois comutadores que, quando coordenados de forma eficiente, provocam o surgimento de uma forma de onda que se assemelha a uma senoidal entre os terminais do inversor, que é ligado a uma única fase e neutro da rede CA, conforme pode ser visualizado na figura 2.1

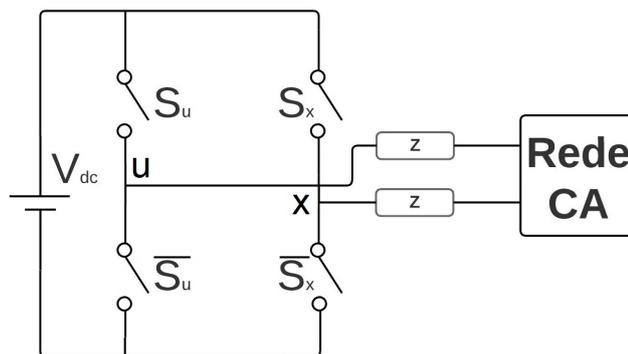


Figura 2.1: Modelo de inversor monofásico em ponte completa.

Para o inversor monofásico em ponte, $n = 2$, e conseqüentemente, $N_{Estados} = 4$ estados. Os referidos estados são apresentados na Tabela 2.1 juntamente com as tensões obtidas nos terminais, V_{ux} .

Estados das chaves		Tensões nos terminais
S_u	S_x	V_{ux}
0	0	0
0	1	$-V_{ux}$
1	0	V_{ux}
1	1	0

Tabela 2.1: Estados do inversor monofásico em ponte completa.

2.2 Inversor Trifásico em Ponte Completa

O inversor trifásico em ponte completa corresponde a uma extensão do inversor monofásico em ponte completa, apresentado na seção 2.1. Este por sua vez possui três ramos que representam as três fases, como pode ser visualizado na figura 2.2. Geralmente as três saídas apresentam deslocamento de $\frac{1}{3}$ de período entre si.

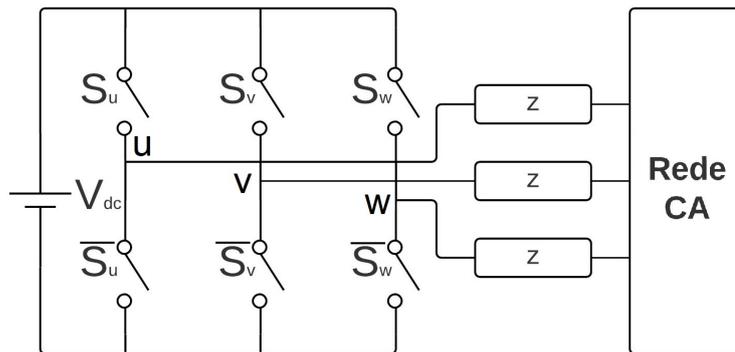


Figura 2.2: Modelo de inversor trifásico em ponte completa.

Para o inversor trifásico em ponte completa, $n = 3$, e desta forma, $N_{Estados} = 8$ estados. Tais estados são apresentados na Tabela 2.2.

Estados das chaves			Tensões nos terminais		
S_u	S_v	S_w	V_{uv}	V_{vw}	V_{wu}
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	$-V_{dc}$	V_{dc}
0	1	0	$-V_{dc}$	V_{dc}	0
0	1	1	$-V_{dc}$	0	V_{dc}
1	0	0	V_{dc}	0	$-V_{dc}$
1	0	1	V_{dc}	$-V_{dc}$	0
1	1	0	0	V_{dc}	$-V_{dc}$
1	1	1	0	0	0

Tabela 2.2: Estados do inversor trifásico em ponte completa.

2.3 Inversor Trifásico a Quatro Braços

O inversor trifásico a quatro braços possui algumas vantagens adicionais ao inversor trifásico enunciado na seção 2.2.

Dentre as diversas aplicações em que esta topologia se enquadra, estão: geração distribuída eólica e fotovoltaica [13], conexão à rede [14], melhorias na qualidade da energia elétrica [15], [16], compensação de harmônicos [17], [18], correção do fator de potência [19], correção de desequilíbrios das correntes no PAC entre as fases e outras aplicações que ainda podem ser exploradas [20]. De acordo com as características das cargas e relativas à rede CA o inversor trifásico em ponte completa, citado anteriormente pode realizar a maioria dessas aplicações, entretanto possui algumas restrições. Tal análise é apresentada posteriormente no Capítulo 4.

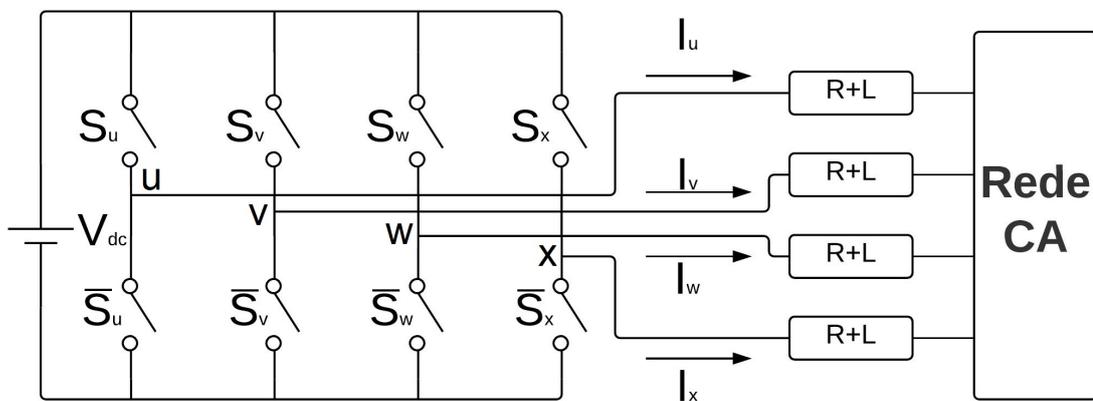


Figura 2.3: Modelo de inversor trifásico a quatro braços.

O inversor apresentado na figura 2.3 é alimentado por uma tensão CC contínua, e tem sua saída conectada à rede CA a quatro fios (3F+N) [21], na qual o condutor que se refere ao neutro também é chaveado de forma que cada braço correspondente apresenta dois comutadores, como pode ser observado. Totalizando assim, conforme em (2-1), 16 possibilidades de estados de comutação, ou seja, o dobro de estados possíveis para o inversor trifásico em ponte completa.

A Tabela 2.3 apresenta os estados obtidos para o inversor trifásico a quatro braços. Os termos S_u , S_v , S_w , e S_x representam as chaves apresentadas na parte superior de cada par, figura 2.3, as inferiores estão sempre em posição de chaveamento oposta às superiores, de modo que não ocorram curto-circuitos no inversor. V_{ux} , V_{vx} e V_{wx} são as tensões de fase obtidas no circuito.

Devido ao fato de ser ligado a quatro fios, este inversor pode atuar em conexões com o sistema elétrico que possuam cargas ou somatório de cargas desbalanceadas, tal fato é uma de suas maiores vantagens [22].

Estado das chaves				Tensões nos terminais		
S_u	S_v	S_w	S_x	V_{ux}	V_{vx}	V_{wx}
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
0	0	1	0	0	0	V_{dc}
0	0	1	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
0	1	0	0	0	V_{dc}	0
0	1	0	1	$-V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
0	1	1	0	0	V_{dc}	V_{dc}
0	1	1	1	$-V_{dc}$	0	0
1	0	0	0	V_{dc}	0	0
1	0	0	1	0	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
1	0	1	0	V_{dc}	0	V_{dc}
1	0	1	1	0	$-V_{dc}$	0
1	1	0	0	V_{dc}	V_{dc}	0
1	1	0	1	0	0	$-V_{dc}$
1	1	1	0	V_{dc}	V_{dc}	V_{dc}
1	1	1	1	0	0	0

Tabela 2.3: Possíveis estados de comutação do inversor trifásico a quatro braços.

O intuito do inversor trifásico a quatro braços é injetar corrente no sistema elétrico de potência (SEP) com objetivo de reduzir efeitos ocasionados à rede CA originados pelas cargas conectadas ao sistema [19]. É possível obter tal resultado controlando a corrente injetada nas fases de forma que minimize a corrente no condutor neutro e equilibre as correntes nas fases do SEP, objetivando assim, melhorar a qualidade da energia elétrica na rede, com possibilidades de ajuste do fator de potência e redução de harmônicos na corrente elétrica.

2.4 Conclusões Parciais

Neste capítulo foram abordadas as topologias dos inversores monofásico em ponte completa, trifásico em ponte completa e trifásico a quatro braços. Também foram apresentados os estados de chaveamento e as respectivas tensões nos terminais para cada estado de chaveamento dos conversores CC/CA utilizados no desenvolvimento deste trabalho e nos capítulos seguintes.

Modelagem e Controle

Neste capítulo são apresentadas a definição em espaço de estados utilizada no contexto do presente trabalho. Também é apresentado o método de controle preditivo baseado em modelo (MPC) conforme consta nas seções 3.1 e 3.2, respectivamente.

3.1 Modelagem em Variáveis de Estado

No que tange à modelagem matemática do sistema, faz-se necessário garantir que o controlador aplicado seja eficiente no chaveamento, injeção de potência na rede, na redução das distorções e maximização do fator de potência. Para análise destes sistemas é essencial reduzir a complexidade das expressões matemáticas de forma que sejam minimizados os cálculos e processamentos necessários, reduzindo conseqüentemente o tempo destinado a esta etapa. A teoria do controle convencional é fundamentada na relação entrada-saída através de uma função transferência (FT), já o controle moderno é baseado na descrição de sistemas de equações diferenciais de primeira ordem que podem ser combinadas como uma equação diferencial matricial de mesma ordem [23].

De acordo com [24] a noção de espaço de estados é um método para descrever equações diferenciais que, por sua vez, descrevem um sistema dinâmico. As equações são organizadas como um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem no vetor de estados do sistema, e a solução é obtida como uma trajetória desse vetor de estados no espaço. A definição para a modelagem apresentada nesta seção foi construída com base nas obras citadas [23], [24], [25] e [26].

As equações (3-1) e (3-2) representam um sistema linear de primeira ordem no espaço de estados. São lineares e, portanto, podem ser transformadas através da transformada de Laplace para obter uma solução.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (3-1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \quad (3-2)$$

Uma vez que a equação de estado é resolvida para o vetor de estado \mathbf{x} , a substituição deste na equação de saída (3-2) resulta no vetor de saída \mathbf{y} . Assim, deve-se examinar a transformada de Laplace das equações de estado apresentadas. Observa-se que são envolvidos o vetor de estado (\mathbf{x}) e sua derivada ($\dot{\mathbf{x}}$).

Como a transformação de Laplace é, basicamente, a multiplicação por um escalar seguido de integração, a transformada de Laplace dessa derivada é o vetor das transformações de Laplace de suas respectivas entradas.

Mais especificamente,

$$\mathcal{L}\{\dot{\mathbf{x}}(t)\} = [s\mathbf{X}(s) - \mathbf{x}(0)] \quad (3-3)$$

Usando um argumento semelhante, a transformada de Laplace do produto $\mathbf{A}\mathbf{x}$ é:

$$\mathcal{L}\{\mathbf{A}\dot{\mathbf{x}}(t)\} = \mathcal{L}\left[\sum_{j=1}^n a_{ij}x_{ij}\right] = \sum_{j=1}^n a_{ij}\mathcal{L}\{x_{ij}\} = \mathbf{A}\mathbf{X}(s) \quad (3-4)$$

Assim, a equação de estado (3-5) tem como transformada de Laplace (3-6).

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad \mathbf{x}(0) \quad (3-5)$$

$$s\mathbf{X}(s) - \mathbf{x}(0) = \mathbf{A}\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}\mathbf{U}(s) \quad (3-6)$$

Reorganizando os termos, (3-7)

$$[s\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]\mathbf{X}(s) = \mathbf{x}(0) + \mathbf{B}\mathbf{U}(s) \quad (3-7)$$

Multiplicando os dois membros pelo termo $[s\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1}$, obtem-se (3-8)

$$\mathbf{X}(s) = [s\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1} [\mathbf{x}(0) + \mathbf{B}\mathbf{U}(s)] \quad (3-8)$$

Faz-se então necessária a inversa de transformada de Laplace do termo $[s\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1}$ para obter a solução da equação de estado. Assim, examinamos primeiro o inverso conhecido como matriz resolução, (3-9).

$$[s\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1} = \frac{1}{s} \left[\mathbf{I}_n - \frac{1}{s}\mathbf{A} \right]^{-1} = \frac{1}{s} \left[\mathbf{I}_n + \frac{1}{s}\mathbf{A} + \frac{1}{s^2}\mathbf{A}^2 + \frac{1}{s^3}\mathbf{A}^3 + \dots + \frac{1}{s^i}\mathbf{A}^i + \dots \right] \quad (3-9)$$

E a transformada inversa de Laplace produz a série 3-10, que é apresentada da

mesma forma que a função exponencial (3-11) em uma versão matricial.

$$\mathcal{L}^{-1}\{[s\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1}\} = \mathbf{I}_n + \mathbf{A}t + \frac{(\mathbf{A}t)^2}{2!} + \frac{(\mathbf{A}t)^3}{3!} + \dots + \frac{(\mathbf{A}t)^i}{i!} + \dots \quad (3-10)$$

$$e^{at} = 1 + at + \frac{(at)^2}{2!} + \frac{(at)^3}{3!} + \dots + \frac{(at)^i}{i!} + \dots \quad (3-11)$$

Reescrevendo como matriz exponencial, é obtida (3-12)

$$e^{\mathbf{A}t} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(\mathbf{A}t)^i}{i!} = \mathcal{L}^{-1}\{[s\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1}\} \quad (3-12)$$

Assim, aplicando a transformada inversa de Laplace em (3-8) tem-se que a solução das equação de estado (3-1) é dada por (3-13)

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}t} \mathbf{x}(0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} \mathbf{B}\mathbf{u}(\tau) d\tau \quad (3-13)$$

A solução para um tempo inicial diferente de zero é dada por (3-14).

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)} \mathbf{x}(t_0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} \mathbf{B}\mathbf{u}(\tau) d\tau \quad (3-14)$$

Em que $(t - t_0)$ é o tempo entre uma amostra e outra, ou seja, o tempo de amostragem T_s dos dados.

A solução 3-14 inclui dois termos. O primeiro chamado de resposta natural devido às condições iniciais com entrada zero. O segundo termo é a resposta devido ao vetor de entradas \mathbf{u} , dita resposta forçada do sistema. Por superposição, a resposta total do sistema é a soma das respostas natural e forçada. A resposta forçada envolve a mudança do estado do sistema do vetor inicial $\mathbf{x}(0)$ para o vetor $\mathbf{x}(t)$ através da multiplicação pela matriz exponencial.

Deste modo, a matriz exponencial também é chamada de matriz de transição de estados, isso é devido à função desempenhada pela matriz utilizada em casos de sistemas variantes no tempo e que dependem dos valores inicial e final do tempo, e não apenas da diferença entre eles. A forma exponencial da matriz de transição de estados só é válida para sistemas lineares invariantes no tempo.

3.1.1 Equacionamento de Estados para o Inversor Trifásico em Ponte Completa

No inversor trifásico em ponte completa a modelagem matemática é apresentada por fase considerando que há três ramos e três variáveis de estado, conforme pode ser

observado na figura 2.2 e, de forma complementar, na figura 3.1. Assim, os braços são independentes entre si, o que já demonstra matematicamente a característica individual para cada fase obtida com o uso esta topologia (considerando a carga em Y).

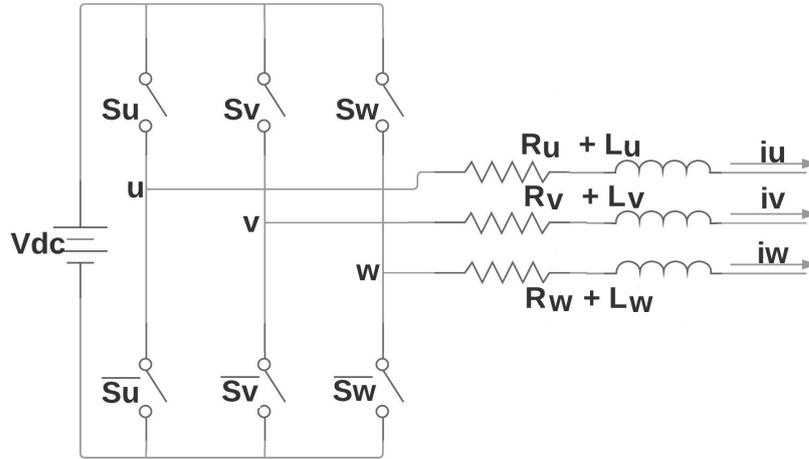


Figura 3.1: Modelo do inversor trifásico em ponte completa com filtro RL, em acréscimo à figura 2.2.

O equacionamento por espaço dos estados enunciado anteriormente é apresentado nesta seção, de forma que, a partir do modelo elétrico da figura 3.1 são deduzidas as equações diferenciais pertinentes ao inversor, conforme segue abaixo:

Considerando que as reatâncias representadas podem ser reescritas e apresentadas como em (3-15) e (3-16) devido às semelhanças e características entre os ramos do inversor, tem-se:

$$R_u = R_v = R_w = R \quad (3-15)$$

$$L_u = L_v = L_w = L \quad (3-16)$$

A partir do circuito do inversor apresentado na figura 3.1, é possível obter as equações individuais para cada ramo apresentado de forma individual por (3-17), (3-18) e (3-19) respectivamente.

$$V_{un} = R(i_u) + L \left(\frac{di_u}{dt} \right) + V_{an} \quad (3-17)$$

$$V_{vn} = R(i_v) + L \left(\frac{di_v}{dt} \right) + V_{bn} \quad (3-18)$$

$$V_{wn} = R(i_w) + L \left(\frac{di_w}{dt} \right) + V_{cn} \quad (3-19)$$

Isolando $\frac{di_u}{dt}$ em (3-17), $\frac{di_v}{dt}$ em (3-18) e $\frac{di_w}{dt}$ em (3-19) é possível obter as equações (3-20), (3-21) e (3-22).

$$\frac{di_u}{dt} = -\frac{R}{L}(i_u) - \frac{1}{L}(V_{an} - V_{un}) \quad (3-20)$$

$$\frac{di_v}{dt} = -\frac{R}{L}(i_v) - \frac{1}{L}(V_{bn} - V_{vn}) \quad (3-21)$$

$$\frac{di_w}{dt} = -\frac{R}{L}(i_w) - \frac{1}{L}(V_{cn} - V_{wn}) \quad (3-22)$$

Tais equações de estado podem ser reescritas na forma matricial (3-23) que representa o inversor trifásico em ponte completa.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_u}{dt} \\ \frac{di_v}{dt} \\ \frac{di_w}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (V_{an} - V_{un}) \\ (V_{bn} - V_{vn}) \\ (V_{cn} - V_{wn}) \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

3.1.2 Equacionamento de Estados para o Inversor Trifásico a Quatro Braços

Na topologia do inversor a quatro braços apresentada na figura 2.3 estão dispostos os quatro braços de chaveamento: u , v , w e x . Em acréscimo, a figura 3.2 apresenta características específicas de cada um dos braços e é a partir destes dados que é feita a modelagem do circuito elétrico do inversor, que se torna possível descrever o sistema no espaço de estados utilizando as equações diferenciais de primeira ordem.

Deste modo é possível modelar as variáveis pertinentes e controlar os sinais para chaveamento das saídas do inversor e, conseqüentemente, as formas de onda da corrente injetada no ponto de acoplamento comum (PAC), o desequilíbrio de fases do sistema elétrico e, provavelmente, obter a correção do fator de potência para a rede elétrica CA.

O inversor em estudo possui um filtro RL na conexão com a rede CA para limitar a corrente na saída (ou melhor, a derivada da corrente) nas condições em que ocorrer diferença de potencial elétrico entre os terminais do inversor e do PAC, o que ocorre a todo instante. Desta forma pode-se considerar o inversor do tipo fonte de tensão (VSI - *voltage source inverter*) controlado por corrente (condição necessária para injeção de corrente no PAC) e com filtro RL na saída [27].

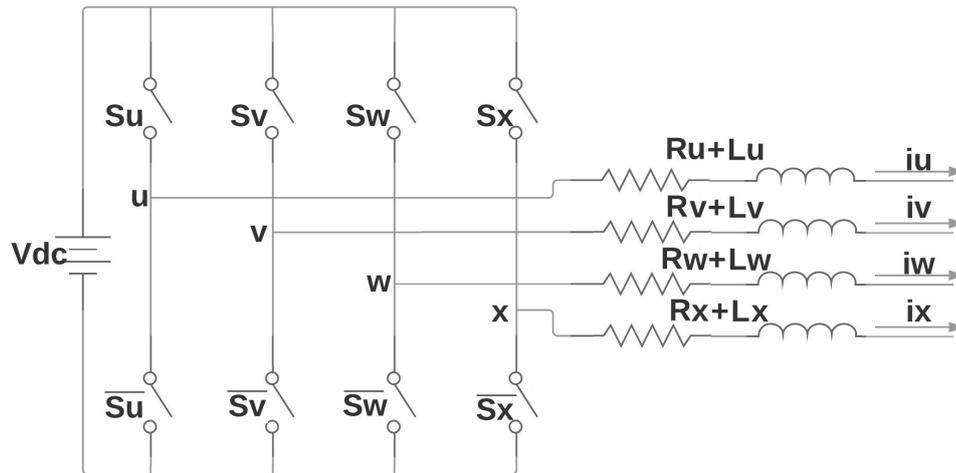


Figura 3.2: Modelo do inversor trifásico a quatro braços com filtro RL , em acréscimo à figura 2.3.

Considerando inicialmente que são necessárias três equações para que sejam controladas as três variáveis de estado (i_u , i_v e i_w), e que tem-se quatro braços a serem controlados (U , V , W e X), é necessário obter uma simplificação do modelo matemático para que este necessite apenas das variáveis de estado controladas, sendo realizada uma consideração para a outra (i_x). Assim, considera-se a corrente no braço X dada pela soma das correntes nos outros braços, conforme (3-24). Considera-se também que as resistências e indutâncias representadas podem ser consideradas idênticas entre as fases devido às semelhanças entre os ramos do inversor, como segue em (3-25) e (3-26), respectivamente.

$$i_x = i_u + i_v + i_w \quad (3-24)$$

$$R_u = R_v = R_w = R_x = R \quad (3-25)$$

$$L_u = L_v = L_w = L_x = L \quad (3-26)$$

Considerando que as tensões nos ramos fornecidas pela fonte CC são dadas por (3-27), (3-28) e (3-29) e também a partir do circuito do inversor, apresentado na figura 3.2, é possível obter as equações de estados para os ramos U , V e W do inversor trifásico a quatro braços. A apresentação do equacionamento é iniciada a partir das equações (3-30), (3-31) e (3-32). A presença da variável de estado em função de X , i_x , é substituída, com o uso de (3-24) em (3-33), (3-34) e (3-35).

$$V_{ux} = (S_u - S_x) V_{dc} \quad (3-27)$$

$$V_{vx} = (S_v - S_x) V_{dc} \quad (3-28)$$

$$V_{wx} = (S_w - S_x) V_{dc} \quad (3-29)$$

$$V_{ux} = R(i_u + i_x) + L \left(\frac{di_u}{dt} + \frac{di_x}{dt} \right) + V_{an} \quad (3-30)$$

$$V_{vx} = R(i_v + i_x) + L \left(\frac{di_v}{dt} + \frac{di_x}{dt} \right) + V_{bn} \quad (3-31)$$

$$V_{wx} = R(i_w + i_x) + L \left(\frac{di_w}{dt} + \frac{di_x}{dt} \right) + V_{cn} \quad (3-32)$$

Ao aplicar (3-24) em (3-30), (3-31) e (3-32) são obtidas (3-33), (3-34) e (3-35).

$$V_{ux} = R(2i_u + i_v + i_w) + L \left(2 \frac{di_u}{dt} + \frac{di_v}{dt} + \frac{di_w}{dt} \right) + V_{an} \quad (3-33)$$

$$V_{vx} = R(i_u + 2i_v + i_w) + L \left(\frac{di_u}{dt} + 2 \frac{di_v}{dt} + \frac{di_w}{dt} \right) + V_{bn} \quad (3-34)$$

$$V_{wx} = R(i_u + i_v + 2i_w) + L \left(\frac{di_u}{dt} + \frac{di_v}{dt} + 2 \frac{di_w}{dt} \right) + V_{cn} \quad (3-35)$$

Isolando $\frac{di_v}{dt}$ em (3-35) e $\frac{di_w}{dt}$ em (3-34) obtem-se, respectivamente, (3-36) e (3-37)

$$L \frac{di_v}{dt} = (V_{wx} - V_{cn}) - R(i_u + i_v + 2i_w) - L \frac{di_u}{dt} - 2L \frac{di_w}{dt} \quad (3-36)$$

$$L \frac{di_w}{dt} = (V_{vx} - V_{bn}) - R(i_u + 2i_v + i_w) - L \frac{di_u}{dt} - 2L \frac{di_v}{dt} \quad (3-37)$$

Somando (3-36) e (3-37) obtem-se (3-38).

$$3L \left(\frac{di_v}{dt} + \frac{di_w}{dt} \right) = -R(2i_u + 3i_v + 3i_w) + 2L \frac{di_u}{dt} + (V_{vx} - V_{bn}) + (V_{wx} - V_{cn}) \quad (3-38)$$

Substituindo (3-38) em (3-33), obtem-se (3-39).

$$\frac{di_u}{dt} = -\frac{R}{L} i_u + \frac{3}{4L} (V_{ux} - V_{an}) - \frac{1}{4L} (V_{vx} - V_{bn}) - \frac{1}{4L} (V_{wx} - V_{cn}) \quad (3-39)$$

Da mesma forma para i_v e i_w , tem-se (3-40) e (3-41).

$$\frac{di_v}{dt} = -\frac{R}{L}i_v - \frac{1}{4L}(V_{ux} - V_{an}) + \frac{3}{4L}(V_{vx} - V_{bn}) - \frac{1}{4L}(V_{wx} - V_{cn}) \quad (3-40)$$

$$\frac{di_w}{dt} = -\frac{R}{L}i_w - \frac{1}{4L}(V_{ux} - V_{an}) - \frac{1}{4L}(V_{vx} - V_{bn}) + \frac{3}{4L}(V_{wx} - V_{cn}) \quad (3-41)$$

Tais equações de estado (3-39) - (3-41) podem ser reescritas de forma geral para equações de estados (3-1) como disposto em (3-42), que representa o inversor em estudo por variáveis de estado (\mathbf{x}) juntamente às entradas do sistema (z)

$$\begin{bmatrix} \frac{di_u}{dt} \\ \frac{di_v}{dt} \\ \frac{di_w}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{3}{4L} & -\frac{1}{4L} & -\frac{1}{4L} \\ -\frac{1}{4L} & \frac{3}{4L} & -\frac{1}{4L} \\ -\frac{1}{4L} & -\frac{1}{4L} & \frac{3}{4L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (V_{an} - V_{ux}) \\ (V_{bn} - V_{vx}) \\ (V_{cn} - V_{wx}) \end{bmatrix} \quad (3-42)$$

$$\mathbf{x} = [i_u \ i_v \ i_w]^T \quad (3-43)$$

$$\mathbf{u} = [(V_{ux} - V_{an}) \ (V_{vx} - V_{bn}) \ (V_{wx} - V_{cn})]^T \quad (3-44)$$

O vetor de estados considerado pode ser observado em (3-43), é correspondente às correntes em três (u, v, w), dos quatro braços do inversor (u, v, w, x). Isso ocorre devido à dependência entre as variáveis, explicitada por (3-24). O vetor das entradas \mathbf{u} exibido em (3-44) corresponde à diferença de potencial presente no filtro RL para cada ramo do inversor na conexão à rede CA.

3.2 Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC)

A estratégia proposta pelo controle preditivo baseado em modelo (MPC) baseia-se em um número finito de comutações possíveis para o inversor de potência estático e em modelos do sistema através dos quais é possível prever o comportamento das variáveis para cada estado de comutação disponível. Para a seleção apropriada dos estados dos comutadores, é definida uma função custo que seleciona a combinação de chaveamento que apresenta o menor custo para o sistema a partir dos valores previstos e atuais, para

isso a previsão do valor futuro dessas variáveis é calculada para cada possível estado de comutação [28].

3.2.1 Vantagens e Desvantagens do MPC

O método de controle aplicado apresenta algumas vantagens e desvantagens quando comparado a outros métodos de controle. Com a evolução dos microprocessadores tornaram-se possíveis implementações como a do controle de corrente prevista em conversores que se conectam à rede CA para injeção de corrente.

Uma das vantagens apresentadas pelo método é o fato de não ser necessário projetar o controlador, por exemplo. Modelos da carga e do conversor são usados para prever a corrente futura e assim selecionar a ação seguinte mais apropriada [28].

Estudos comparativos entre o MPC e métodos de controle linear com PWM têm sido relatados para diversas topologias de conversores, como por exemplo, inversores de fonte de tensão (VSI) em dois níveis e inversores com neutro grampeado (NPC - *Neutral-Point Clamped*) que são bastante comuns em indústrias [29].

Para controle de corrente em dois níveis em um inversor fonte de tensão (VSI) são relatados estudos comparativos entre o controlador preditivo e controladores lineares, como o proporcional integral (PI). Resultados obtidos nestes trabalhos apresentam que o MPC supera controladores PI em operações transitórias, entretanto, em regime permanente os controladores PI com PWM apresentam melhores comportamentos que o MPC [28, 29, 30, 31].

Ao aplicar o controle de torque preditivo (PTC - *Predictive Torque Control*) em comparação com um controle vetorial, controle por orientação de campo (FOC - *Field-Oriented Control*) em máquinas de indução em [32], os autores observaram que, no regime estacionário, o controle linear apresenta melhor resposta enquanto que no período transitório o controlador preditivo apresentou respostas seis vezes mais rápidas tendo características físicas do inversor como fator limitante [29, 33].

Quanto à comparação das técnicas de controle aplicadas a um inversor multinível NPC, o MPC apresentaria resultados melhores que os citados anteriormente, com o VSI em dois níveis. Isso se deve em parte à maior quantidade de vetores de tensão e níveis disponíveis para a topologia.

3.2.2 Descrição do Modelo

O método de controle preditivo baseado em modelo, MPC, é um método de controle robusto que utiliza sinais instantâneos do sistema acoplado a ele como referência para o cálculo do chaveamento ótimo em suas saídas.

Considerando que o controlador preditivo interage por amostragem discreta de dados, tanto o controlador quanto o modelo do sistema devem ser discretizados [20], [34]. Assim, este modelo em tempo discreto consiste de um conjunto de equações com matrizes recursivas que permitem a estimativa do estado do sistema em um instante futuro, ou seja, sendo conhecido o estado do sistema no instante $(k+n)T_s$ atual, é possível prever os estados do sistema em um instante seguinte $(k+n+1)T_s$. Deste modo, o sistema representado na figura 3.2 pode ter o seu desempenho estimado a partir de (3-45), como apresentado em (3-14), e do conjunto de equações de estados.

$$\mathbf{i}^*[k+n+1] = \mathbf{F}\mathbf{i}[k+n] + \mathbf{G}u[k+n] \quad (3-45)$$

Em que $\mathbf{i}^*[k+n+1]$ corresponde à corrente estimada no instante $(k+n+1)T_s$ obtido a partir de dados amostrados do instante $(k+n)T_s$, onde k é o instante inicial em questão e n é um instante n -ésimo do tempo em que os parâmetros são conhecidos. O termo \mathbf{F} pode ser obtido por (3-46) e \mathbf{G} por (3-47). Ambos correspondem, respectivamente, às porções das respostas natural e forçada do sistema e dependem do modelo de estados do mesmo, apresentado na seção 2.3. $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ é matriz identidade.

$$\mathbf{F} = e^{\mathbf{A}T_s} \quad (3-46)$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{F} - \mathbf{I}_{3 \times 3})\mathbf{B} \quad (3-47)$$

Para a aplicação do inversor controlado pelo MPC e injeção de corrente na rede elétrica é necessário que a referência de corrente a ser injetada pelo inversor (i_{INV}^*) possa ser estabelecida a partir de (3-48) para cada fase com base na corrente da carga (i_L) e na corrente estimada na rede CA (i_S^*) para cada fase.

$$\begin{aligned} i_{INV_U}^* &= i_{L_A} - i_{S_A}^* \\ i_{INV_V}^* &= i_{L_B} - i_{S_B}^* \\ i_{INV_W}^* &= i_{L_C} - i_{S_C}^* \\ i_{INV_X}^* &= i_{L_N} - i_{S_N}^* \end{aligned} \quad (3-48)$$

Assim, para o inversor trifásico a quatro braços o cálculo das tensões V_{ux} , V_{vx} e V_{wx} em (3-30), (3-31) e (3-32) e das respectivas correntes elétricas nos instantes posteriores é realizado por um algoritmo que estima, a partir do método de controle baseado em modelo (MPC), os valores futuros de tensões e correntes possíveis nos

terminais para cada estado de chaveamento, conforme a Tabela 2.3 descrita anteriormente. O algoritmo é descrito no Apêndice A.2.

Da mesma maneira para o inversor trifásico em ponte completa, o cálculo das tensões V_{un} , V_{vn} e V_{wn} em (3-17), (3-18) e (3-19) e das respectivas correntes elétricas é realizado por um algoritmo que apresenta respostas conforme a Tabela 2.2 descrita anteriormente. O algoritmo está disposto no Apêndice A.1.

A partir dos valores das correntes estimadas para o período de amostragem futuro $\mathbf{i}[k+1]$ e da corrente de referência para o instante futuro $\mathbf{i}^*[k+1]$ é possível calcular também a função custo $g[k+1]$ para os estados de chaveamento antes que ocorram.

A função custo escolhida é apresentada em (3-49) é utilizada no algoritmo de controle para o sistema trifásico em ponte completa e no sistema trifásico a quatro braços. O algoritmo seleciona o estado que proporcionar o menor custo para o chaveamento no instante futuro $[k+1]$ predito.

$$\begin{aligned} g[k+1] &= \|\mathbf{i}_{INV}^*[k+1] - \mathbf{i}_{INV}[k+1]\|^2 & (3-49) \\ &= (i_{INV_U}^*[k+1] - i_{INV_U}[k+1])^2 \\ &\quad + (i_{INV_V}^*[k+1] - i_{INV_V}[k+1])^2 \\ &\quad + (i_{INV_W}^*[k+1] - i_{INV_W}[k+1])^2 \end{aligned}$$

Em que i_{INV}^* é a corrente estimada para o instante $[k+1]$ a partir das referências obtidas no sistema, enquanto que i_{INV} , é a corrente calculada para o instante $[k+1]$ na saída do inversor para as cada uma das respectivas posições de chaveamento da topologia questão à procura do menor custo para o chaveamento.

Um exemplo do comportamento da função custo ao longo de um período de observação e a consequente determinação da combinação de chaveamento mais adequada à topologia do inversor são apresentados posteriormente neste documento (mais especificamente, na subseção 4.2.1).

3.3 Conclusões Parciais

Neste capítulo foram apresentadas a modelagem matemática em espaço de estados e os equacionamentos para as topologias: inversor trifásico em ponte completa e inversor trifásico a quatro braços. Foram apresentados também o método de controle utilizado e a função custo.

Estudo de Caso

Neste capítulo são apresentados e discutidos resultados obtidos pela simulação de duas topologias de inversores apresentadas no Capítulo 2. Para a primeira delas, correspondente ao inversor trifásico em ponte completa, são apresentados dois casos analisados através de simulações. A segunda topologia cujos resultados são apresentados corresponde ao inversor trifásico a quatro braços, Para esta são apresentados quatro casos simulados. Em todos os casos apresentados o controle é realizado pelo MPC.

A apresentação das duas topologias permite observar e indentificar vantagens e desvantagens entre elas. Ainda neste capítulo são apresentados dois outros casos para proporcionar uma análise à sensibilidade do modelo proposto em relação a variação nos valores dos parâmetros R_{INV} e L_{INV} .

Para o presente estudo são considerados um sistema de geração que alimenta uma carga através de um PAC, ao qual também são conectados o inversor fonte de tensão controlada por corrente e a carga. O inversor é alimentado por um sistema independente, sendo a origem indeterminada neste trabalho, de modo que a tensão é contínua, estabilizada no parâmetro desejado, constante e com disponibilidade de potência suficiente para injeção na rede CA e para suprir a carga acoplada.

Por fim, é preciso ressaltar que as simulações foram realizadas através de modelos computacionais elaborados no ambiente MATLAB/Simulink e em consonância com os requisitos para amostragem de sinais.

4.1 Inversor Trifásico em Ponte Completa

Nesta seção são apresentados dados obtidos na simulação do inversor trifásico em ponte completa e formas de onda referentes às tensões no PAC, formas de onda da corrente fornecida pela rede CA, pelo inversor, da corrente na carga e referências para saída do inversor.

O inversor é acoplado ao PAC, ao qual estão conectadas a rede CA e duas representações de cargas, sendo estas, uma linear equilibrada e ligada em estrela e outra não-linear (retificador com carga RC) variável, conforme apresentado na figura 4.1. As

cargas são assim dispostas para simular um sistema semelhante ao que geralmente ocorre em sistemas de distribuição reais.

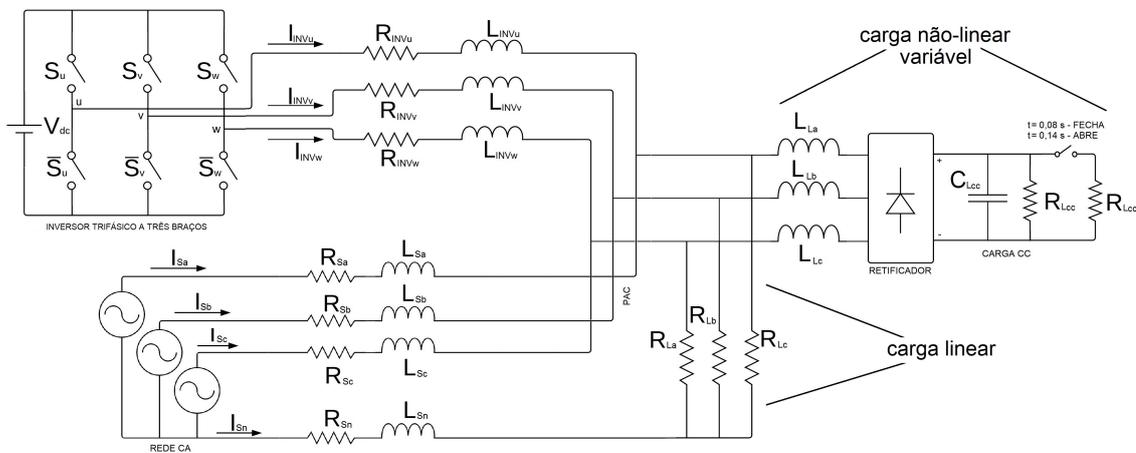


Figura 4.1: Sistema elétrico utilizado na simulação com inversor trifásico em ponte completa.

São apresentados resultados obtidos em duas simulações, sendo elas realizadas com variações de parâmetros de uma para outra, tais parâmetros são:

- Variações da carga não-linear, que é aumentada para análise de transitório no instante $0,08s$ da simulação e é reduzida no instante $0,14s$, para análise gráfica da resposta;
- Carga linear equilibrada no caso 1 e desequilibrada no caso 2;
- Injeção de potência ativa na rede CA em ambos os casos.

Os valores dos dados e componentes utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 4.1. Para efeito de melhor compreensão é sabido que à montante do transformador de distribuição, apresentado como gerador trifásico (rede CA) na figura 4.1, existem diversos componentes do sistema elétrico, tais como as unidades geradoras, linhas de transmissão (LTs), subestações elevadoras e abaixadoras e elementos que contribuem com a impedância equivalente do sistema à montante do PAC, representadas por $Z_{eq} = R_S + jX_S$, em que R_S é a resistência equivalente e X_S a reatância equivalente, sendo esta última dada por $\omega L_S = 2\pi f L_S$.

É então possível calcular a impedância equivalente por fase Z_{eq} dos componentes entre a unidade alimentadora da rede até o PAC considerando que:

- O transformador de distribuição adotado adequa a tensão secundária ao valor estabelecido, sendo $220/380V$ a quatro fios ($1,0p.u.$);
- A impedância de dispersão do transformador equivalente considerada é de $3,5\%$.
- A impedância calculada para os cabos que compõem R_S e L_S foram obtidas a partir da norma NTC-08 [35] que estabelece os valores máximos para projetos de sistemas de distribuição urbana, conforme o caso adotado.

Foi considerada uma distância média do PAC ao transformador de distribuição em torno de 300m, assim, juntamente com a impedância da linha de transmissão foram obtidos os valores apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Dados utilizados nas simulações.

Dados	Valores
$f_{chaveamento}$	30kHz
V_{dc}	$380 * \sqrt{2} * 1,3V$
V_{PAC}	220 / 380V
$R_{INV_{[U,V,W]}}$	0,05 Ω
$L_{INV_{[U,V,W]}}$	6mH
$R_{S_{[A,B,C,N]}}$	0,411 Ω
$L_{S_{[A,B,C,N]}}$	0,411mH
$R_{L_{Caso1_{[A,B,C]}}}$	100 Ω , 100 Ω , 100 Ω
$R_{L_{Caso2_{[A,B,C]}}}$	100 Ω , 50 Ω , 25 Ω
$L_{L_{[A,B,C]}}$	3mH
$P_{Injetada\ por\ fase_{Caso1}}$	5kW
$P_{Injetada\ por\ fase_{Caso2}}$	5kW
$C_{Carganao-linear\ constante}$	1 μF
$R_1\ Carganao-linear\ constante$	50 Ω
$R_2\ Carganao-linear\ variavel$	50 Ω

São obtidos e apresentados também dados relativos às distorções harmônicas de tensões e correntes (DHT_v e DHT_i), e também do fator de potência (FP) observados para a rede CA. Sendo calculadas, na simulação, conforme (4-1), (4-2) e (4-3).

$$DHT_v = \frac{V_H}{V_F} \quad (4-1)$$

Em que V_H é dado por $V_H = \sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}$, na qual V_n é o valor eficaz da tensão na frequência harmônica de ordem n. O termo V_F corresponde ao valor eficaz da tensão na frequência fundamental.

$$DHT_i = \frac{I_H}{I_F} \quad (4-2)$$

Da mesma maneira o termo I_H de (4-2) é dado pela expressão $I_H = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}$, na qual I_n é o valor eficaz da corrente na frequência harmônica de ordem n. O termo I_F é o valor eficaz da corrente na frequência fundamental.

O fator de potência (FP) é dado por $\frac{P}{S}$ como em (4-3). É importante observar que por diversos motivos as ondas das correntes não podem ser consideradas ondas senoidais, dentre eles, o simples fato de serem correntes chaveadas. A partir disso, a potência ativa (P) deve ser calculada pela integral da potência instantânea ($p(t)$) no intervalo de zero até

um período completo (T) e após, multiplicada pelo número de ocorrências da onda por período $\left(\frac{1}{T}\right)$, ou seja, a quantidade de ocorrências dividida pelo período.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_{t-T}^T [v(t) * i(t)] dt}{V_{RMS} * I_{RMS}} \quad (4-3)$$

Em que:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^T [v(t)]^2 dt} \quad e \quad I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^T [i(t)]^2 dt} \quad (4-4)$$

Para o cálculo de V_{RMS} e I_{RMS} foi utilizada a função *RMS* no ambiente Simulink, o qual apresenta resultados conforme apresentado em 4-4.

A figura 4.2 apresenta as tensões de fase nos terminais do ponto de acoplamento comum (PAC), no qual é possível observar o valor absoluto e frequência constantes das tensões estabelecidas pela rede CA. A tensão no PAC apresentada é mantida em torno dos parâmetros da rede, entretanto apresenta certo nível de ruído devido ao chaveamento realizado pelo inversor a partir do instante 0,02s, no qual começam a ser injetadas as correntes nas fases e, em consequência do chaveamento, harmônicas também. As formas de onda da tensão permanecem as mesmas para os dois casos devido ao fato de que o conversor em estudo ser um inversor fonte de tensão (VSI) controlado por corrente.

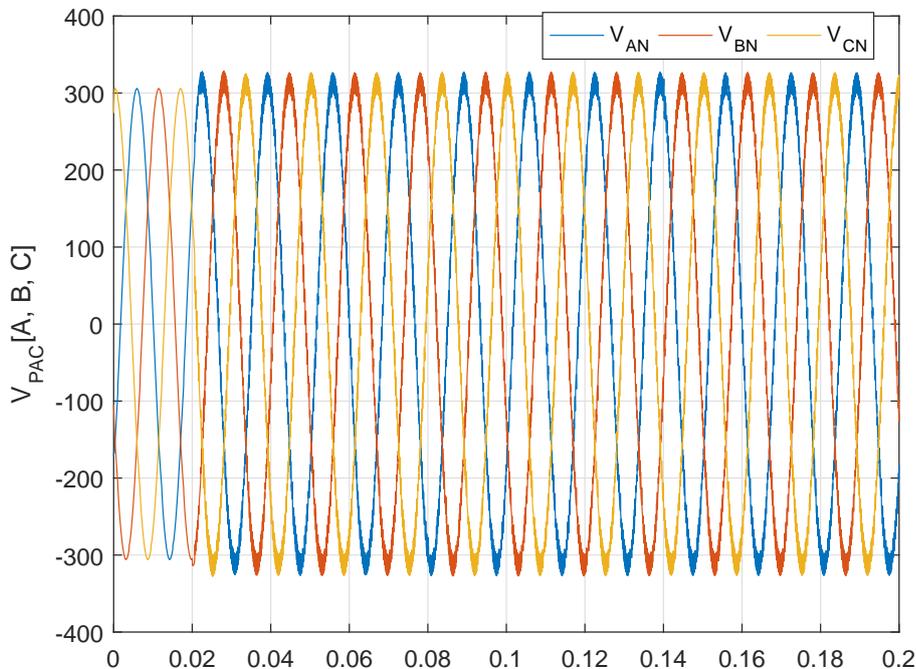


Figura 4.2: Tensões de fase no PAC.

Neste trabalho as referências de corrente no sistema de geração distribuída foram

consideradas equivalentes às desejadas correntes de sequência positiva. Dessa forma, é válido informar que este trabalho não se baseou na síntese de carga resistiva para elaboração das referências de corrente [36] [37].

4.1.1 Caso 1

No primeiro caso a rede CA a quatro fios (3F+N) alimenta, através do PAC, uma carga não-linear e outra linear equilibrada, como enunciado em 4.1. O inversor é acoplado ao PAC em $t = 0,02s$. No instante $t = 0,08s$ a corrente da carga não-linear é aumentada e em $t = 0,14s$ é reduzida ao valor inicial. Além da ocorrência destas cargas, o inversor injeta potência da ordem de $5kW$ por fase na rede CA. A partir da figura 4.3 até a figura 4.14 são exibidos gráficos observados no caso 1.

Ao considerar a carga equilibrada é esperado que as formas de onda das correntes na carga sejam semelhantes e defasadas de $\frac{1}{3}$ de período entre si nas três fases, como pode ser observado na figura 4.3.

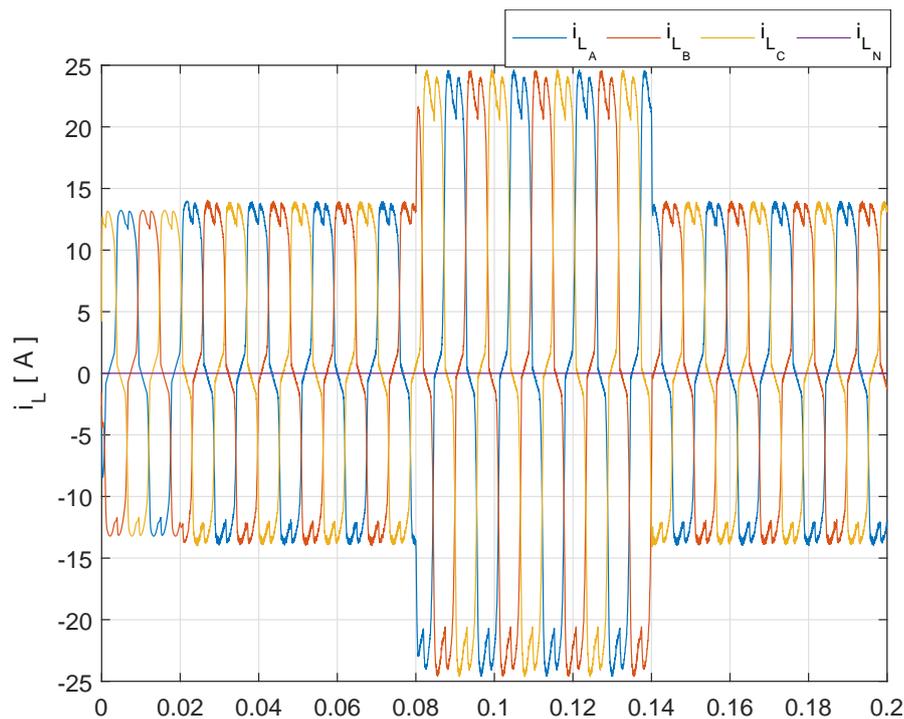


Figura 4.3: Correntes na carga (i_L).

Na figura 4.4 é possível observar a corrente na rede CA. Como a carga utilizada é equilibrada, a corrente no condutor neutro é nula, como esperado. Observa-se também que a partir do instante que o inversor é acoplado ao PAC a corrente na rede CA (i_S) passa a ter sentido oposto.

A figura 4.5 apresenta a corrente na saída do inversor, que é injetada no PAC.

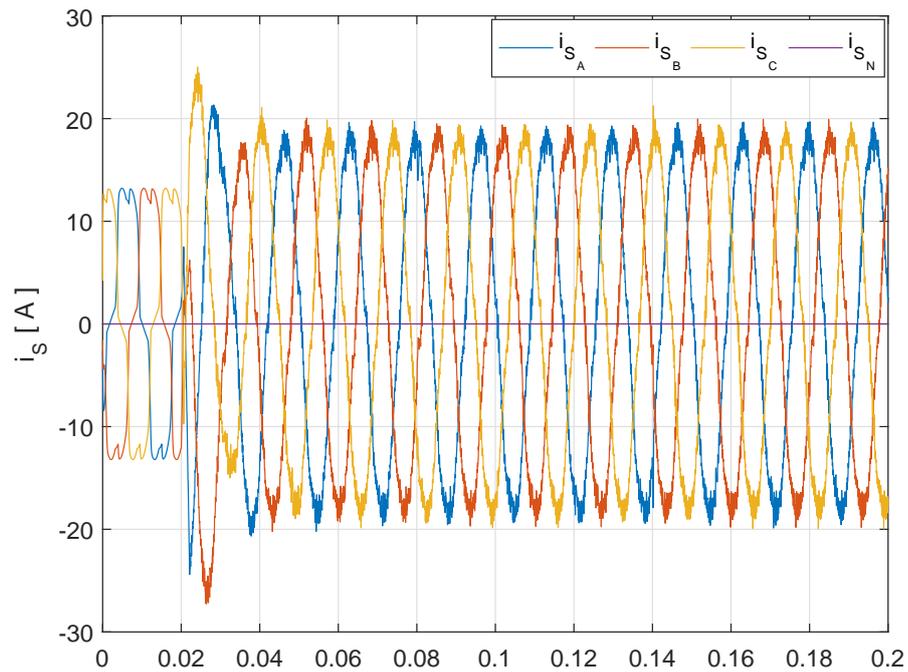


Figura 4.4: Correntes fornecidas pela fonte (i_s).

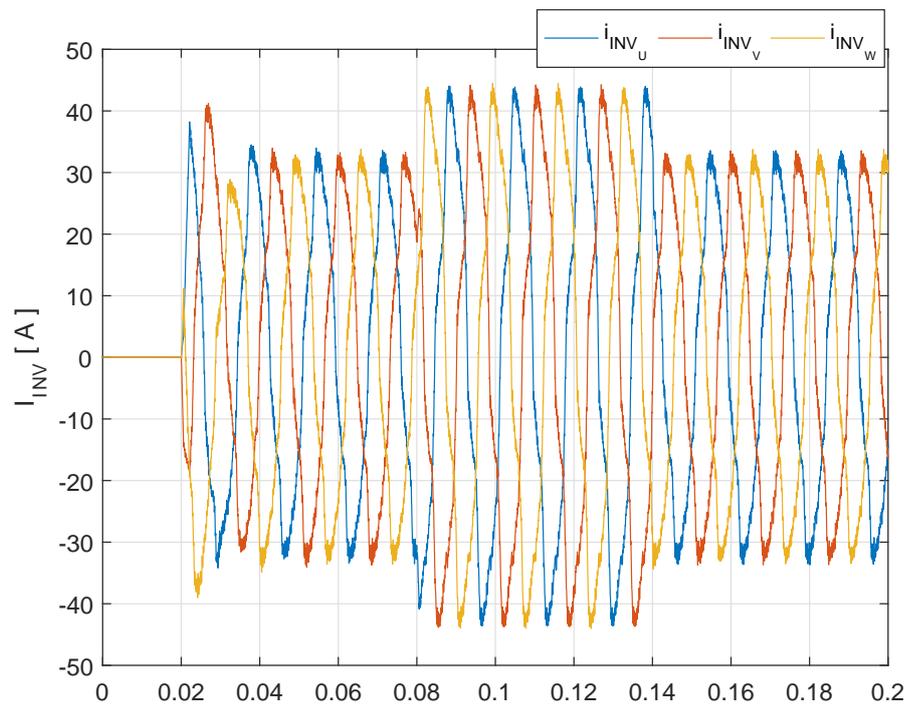


Figura 4.5: Correntes injetadas pelo inversor (i_{INV}).

Na figura 4.6, é apresentada a referência transmitida ao controlador MPC, sendo esta a referência de corrente a ser obtida na rede CA, ou seja, é o valor desejado a ser obtido como corrente na rede CA.

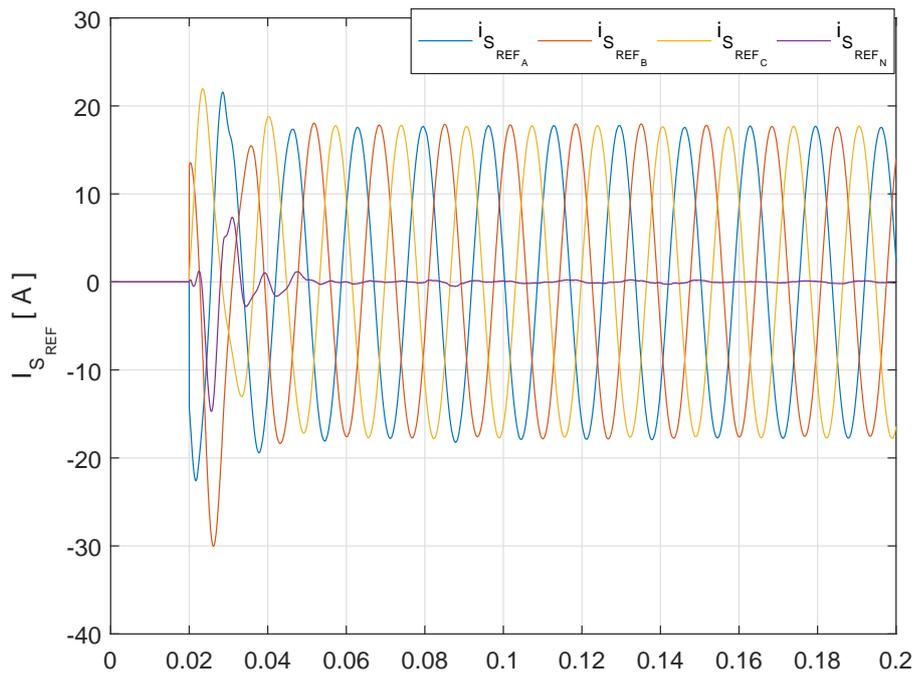


Figura 4.6: Referências para as correntes na fonte (i_{S_REF}).

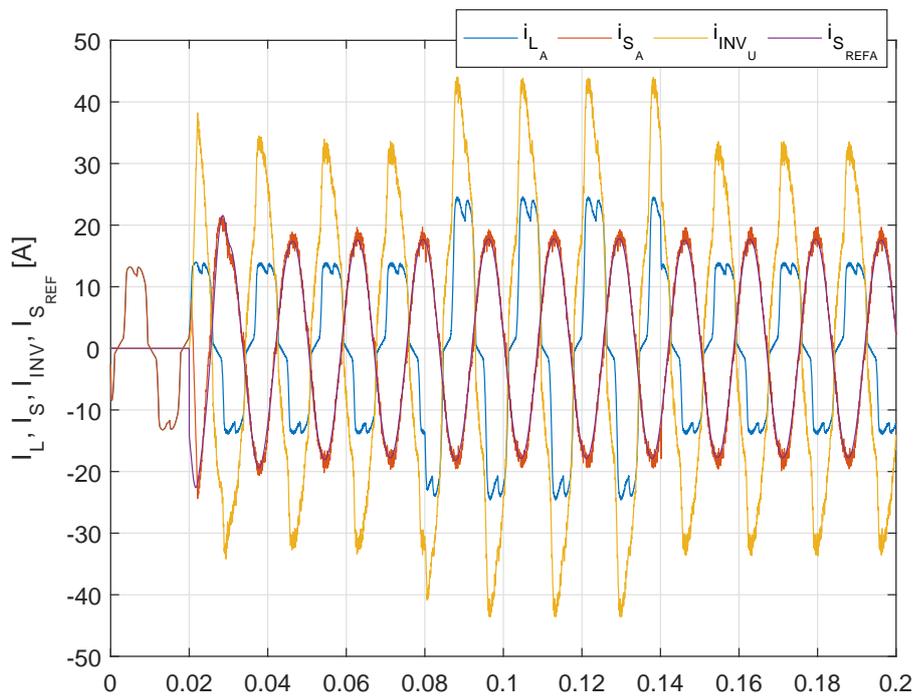


Figura 4.7: Correntes na fase A para a carga (i_L), para a fonte (i_S), na saída do inversor (i_{INV}) e referência de corrente para a fonte (i_{S_REF}) no ramo U.

Na figura 4.7 são apresentadas as correntes na carga, no inversor, na rede CA e a forma de onda da referência, a qual é desejada como corrente na rede CA. Todas referenciadas à fase A do sistema e ao ramo U do inversor.

A figura 4.8 apresenta as potências na saída do inversor (P_{INV}). Na figura 4.9 são representas as potências observadas nas cargas (P_L) e, na figura 4.10, as potências que fluem pela rede CA (P_S). As três potências estão representadas também, para melhor compreensão, na figura 4.11.

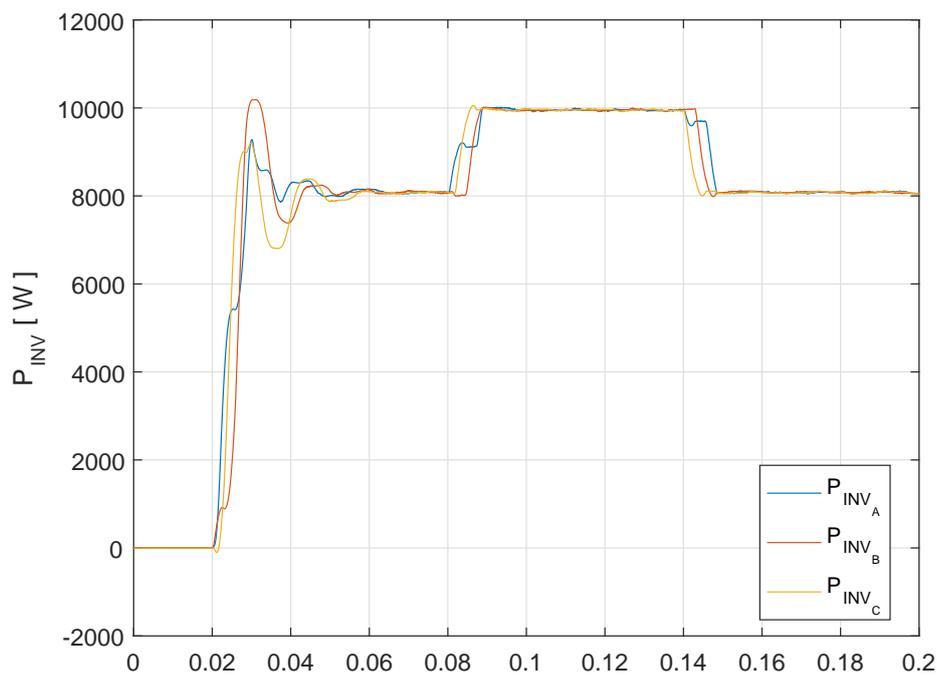


Figura 4.8: Potências nas saídas do inversor (P_{INV}).

É possível observar ainda através das figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 que a soma dos valores absolutos das potência na rede CA com a potência consumida pelo grupo de cargas tem o mesmo valor que a potência injetada no PAC pelo inversor trifásico em ponte completa após a conexão do inversor ao PAC.

O FP na figura 4.12 estabiliza em valor maior que 0,98 após decorrido o efeito do transitório de acoplamento do inversor. O valor obtido está de acordo com o disposto no módulo 8 do PRODIST [8] e também na norma técnica n^o71 da CELG-D [38]. São observadas pequenas variações nos instantes de variação da carga, entretanto estas não fazem com que o FP seja reduzido abaixo do valor preestabelecido pela NTC-71. É notado que o FP tem pequena oscilação em torno de 1,0 devido ao chaveamento.

A partir dos dados obtidos na figura 4.13 e de (4-1) e das tensões de fase apresentadas na figura 4.2 são calculadas as DHTs para as tensões de fase da rede CA, nas três fases, sendo obtidos os valores: $DHT_{V_A} = 2,28\%$, $DHT_{V_B} = 1,87\%$ e

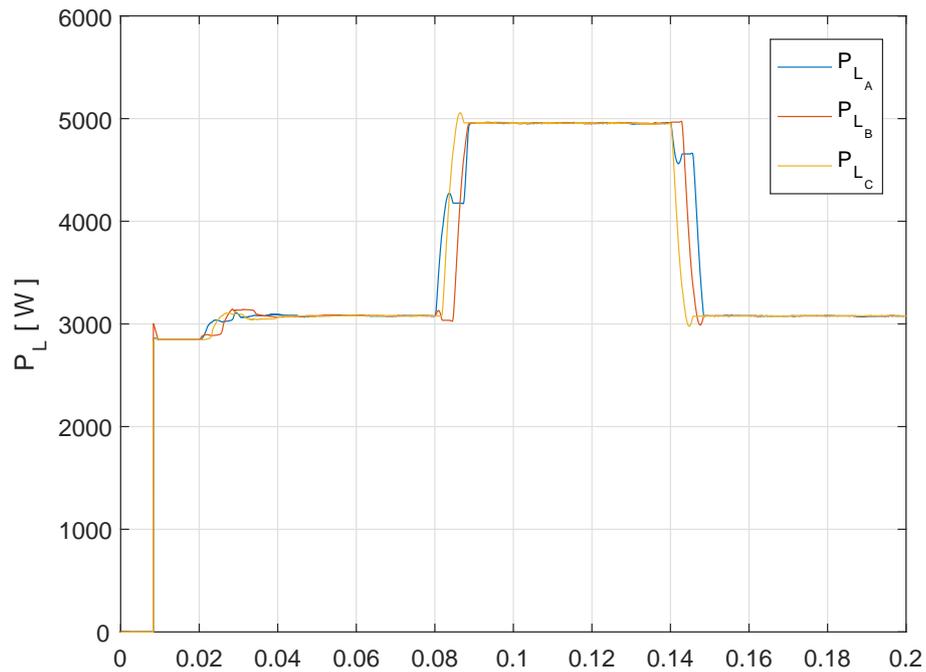


Figura 4.9: Potências na carga (P_L).

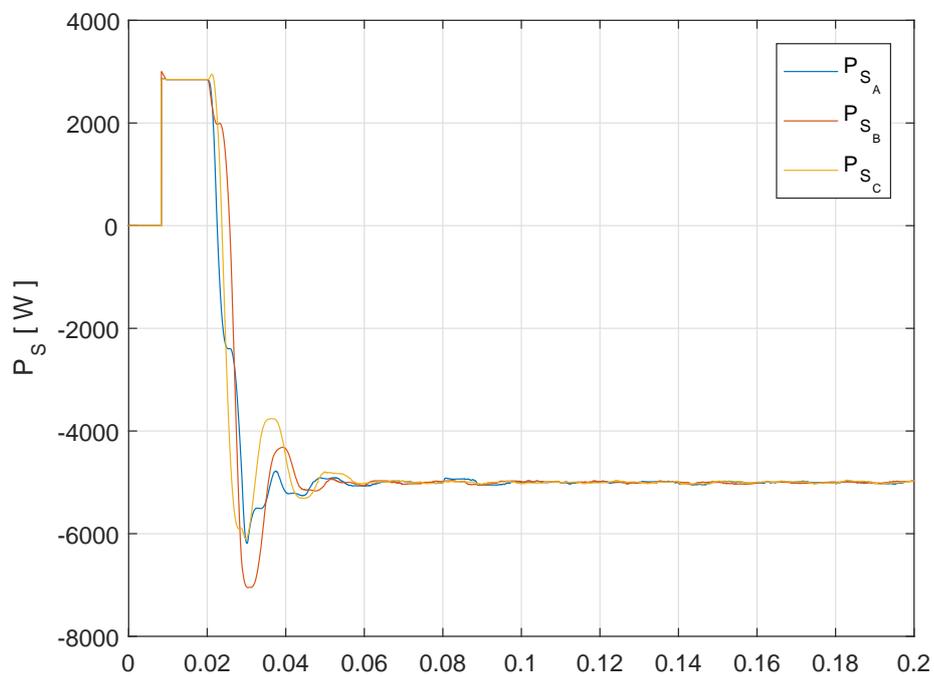


Figura 4.10: Potências na rede CA (P_S).

$DHT_{V_C} = 2,47\%$. Tal distorção se deve à diferença de tensões existente entre a saída do inversor e o PAC que acontece para que ocorra o fluxo de corrente no sentido inversor-PAC. Devido ao chaveamento ocorrido no inversor é apresentado o presente ruído nas

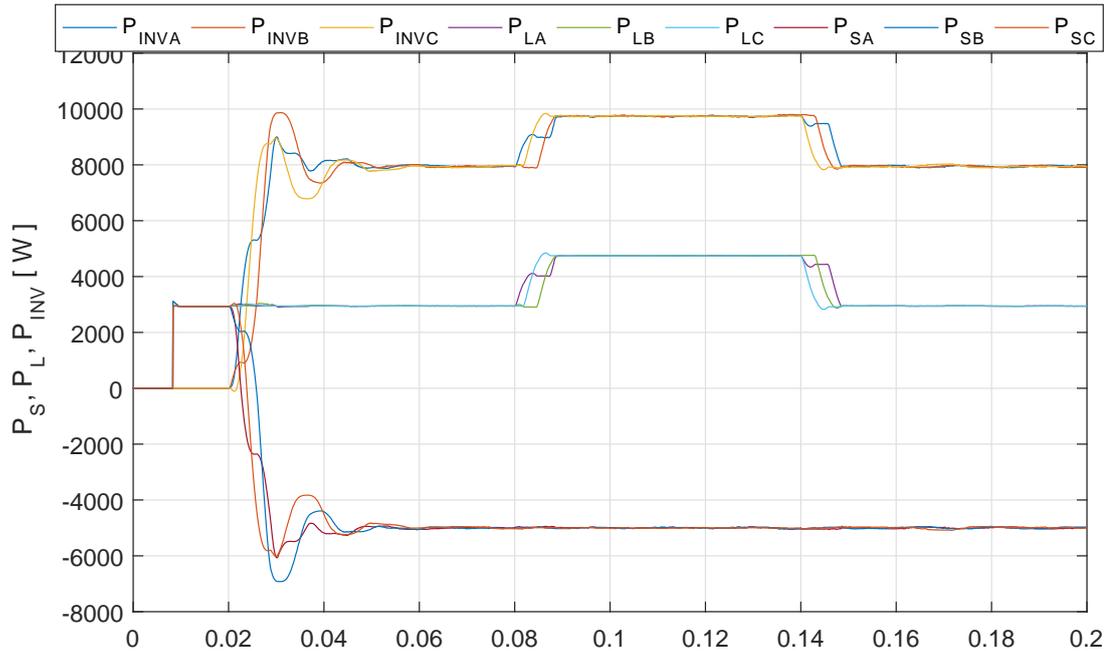


Figura 4.11: Potências nas saídas do inversor (P_{INV}), na carga (P_L) e na rede CA (P_S).

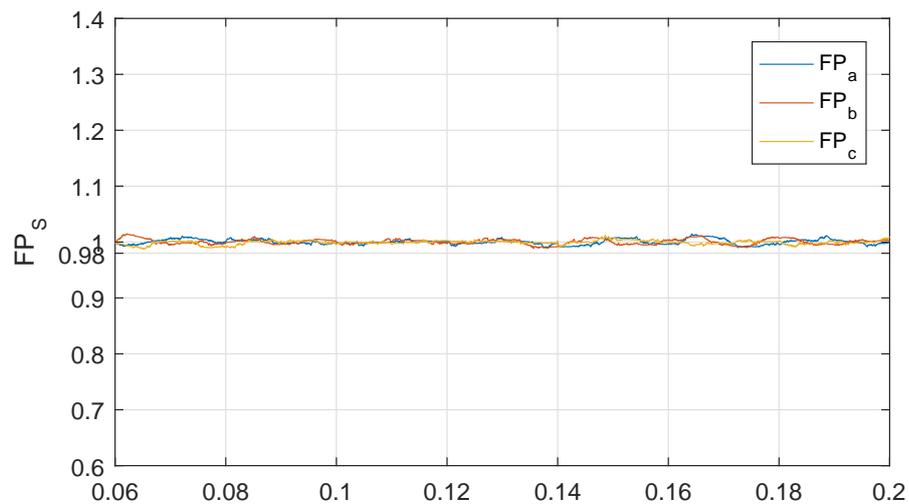


Figura 4.12: Fator de potência (FP).

formas de onda das tensões.

A figura 4.14 apresenta as componentes harmônicas presentes na corrente elétrica na rede CA. A partir destes dados e de (4-2) são calculadas as DHTs para as correntes, nas três fases, sendo obtidos os valores: $DHT_{I_A} = 4,83\%$, $DHT_{I_B} = 4,92\%$ e $DHT_{I_C} = 4,78\%$. Para efeito, a NTC-71 [38] estabelece como critério que a DHT de corrente deve ser inferior a 5%. Para o cálculo da DHT das tensões e correntes foram utilizados dados em regime permanente do sistema, ou seja, após conexão do inversor e após decorrido o período transitório no sistema. Foram consideradas para os cálculos as

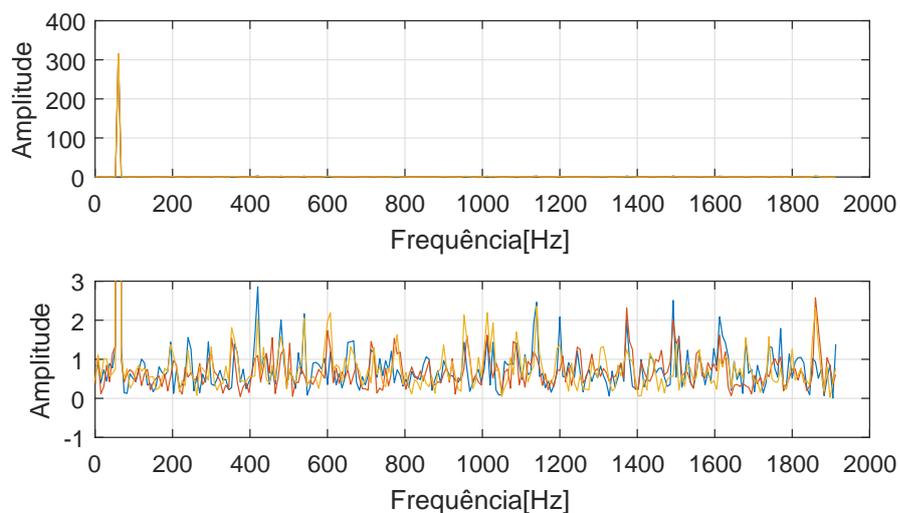


Figura 4.13: *FFT das tensões de fase – obtido a partir das tensões apresentadas na figura 4.2.*

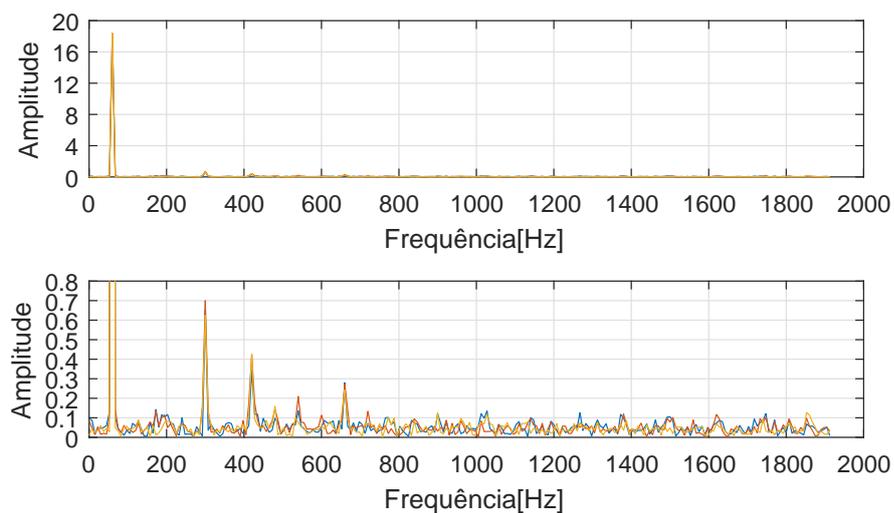


Figura 4.14: *FFT das correntes – obtido a partir das correntes apresentadas na figura 4.4.*

componentes harmônicas até a 31^a harmônica.

Ao observar a simulação do inversor trifásico em ponte completa com carga equilibrada e variação da carga não-linear como um todo, pode-se concluir que o conjunto controlador e inversor satisfazem os objetivos estabelecidos. O inversor injeta potência ativa no PAC, mantém características satisfatórias de corrente para a rede CA de forma equilibrada e alimenta a carga não-linear.

4.1.2 Caso 2

No segundo caso a fonte CA a quatro fios (3F+N) alimenta, através do PAC, duas cargas: Uma carga trifásica, linear e desequilibrada ligada em estrela a quatro fios, e outra, sendo uma carga não-linear CC, onde há um retificador, como enunciado na seção 4.1, Tabela 4.1.

O inversor trifásico em ponte completa é acoplado ao PAC em $t = 0,02s$. No instante $t = 0,08s$ a corrente da carga não linear é aumentada, e em $t = 0,14s$ é reduzida ao valor inicial. Além da ocorrência destas cargas, o inversor injeta potência ativa de $5kW$ por fase na rede elétrica. Entre as figuras 4.15 e 4.27 são exibidos gráficos referentes ao caso 2.

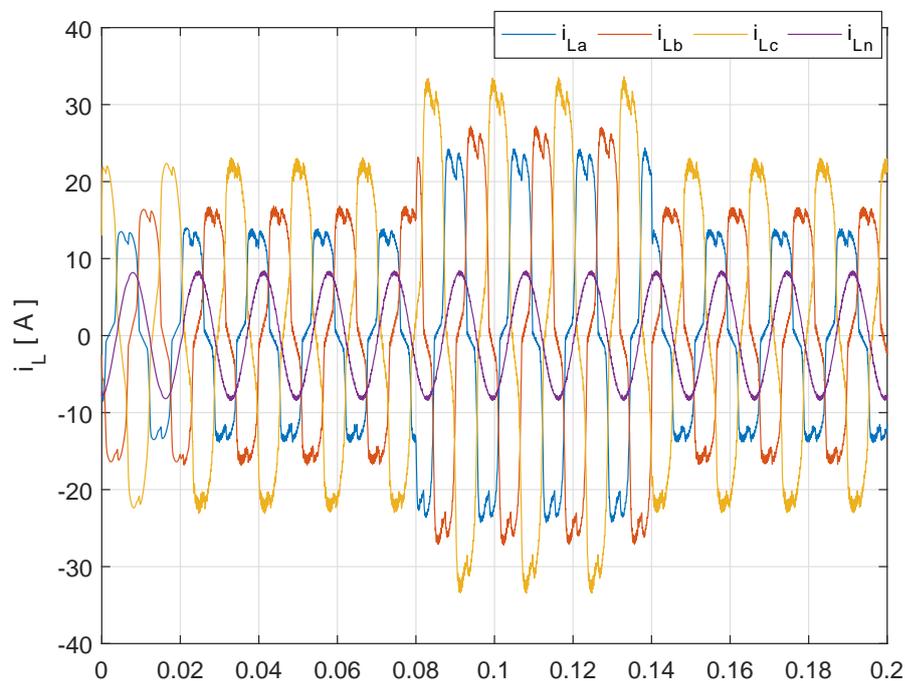


Figura 4.15: Correntes na carga (i_L).

A figura 4.15 apresenta as correntes observadas na carga. Devido ao desbalance de corrente entre as fases na carga, surge a corrente no condutor neutro, como observado.

Na figura 4.16 é possível observar que desde antes do acoplamento do inversor trifásico em ponte completa as correntes na rede CA eram as mesmas observadas na carga ($I_S = I_L$), ou seja, desequilibradas e não-senoidais. Após o acoplamento do inversor ao PAC a corrente elétrica fornecida é injetada no PAC e flui pelo sistema, seja para a carga acoplada ao PAC como também para a rede CA. O chaveamento realizado pelo inversor tende a corrigir a distorção da corrente na rede CA. A figura 4.17 indica as formas das correntes estimadas a serem obtidas pela fonte I_{SREF} .

As correntes elétricas fornecidas pelas fases do inversor trifásico em ponte completa, figura 4.18, são desequilibradas e não-senoidais, de forma que ao serem

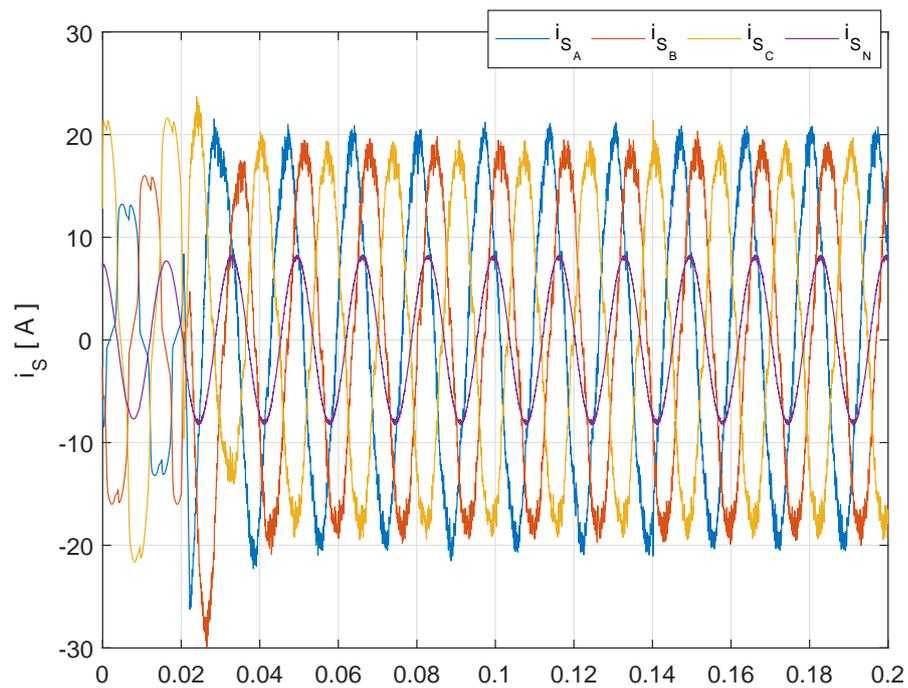


Figura 4.16: Corrente fornecidas pela fonte (i_s).

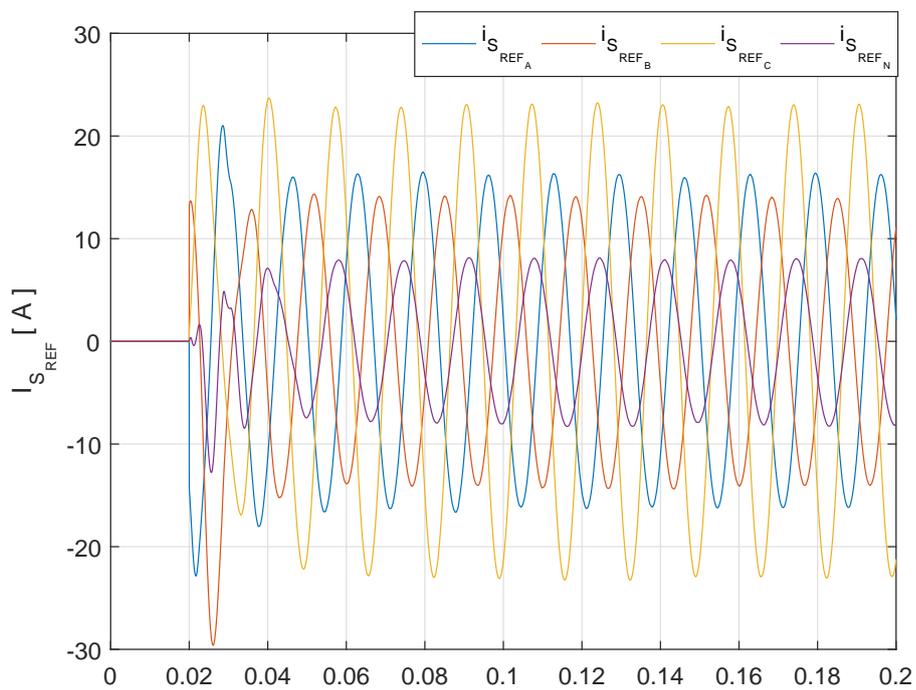


Figura 4.17: Referências para as correntes na fonte (i_{s_REF}).

injetadas no PAC as correntes da rede CA tornem-se equilibradas e sejam corrigidas. Como a corrente no neutro é não-nula o inversor é capaz de injetar potência tendendo a equilibrar o sistema, entretanto, o objetivo não é totalmente satisfeito.

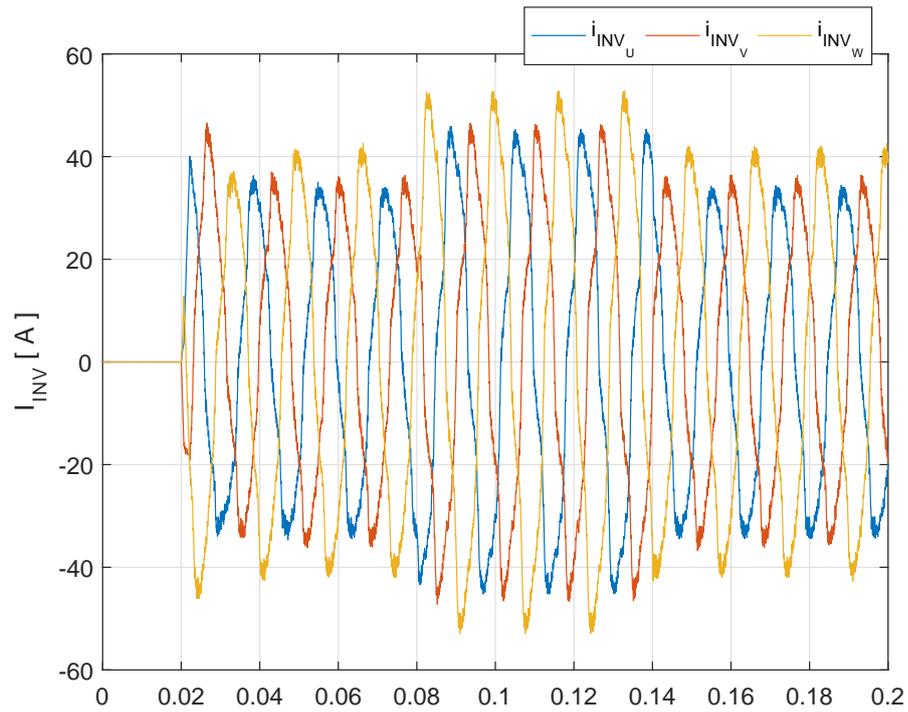


Figura 4.18: Correntes injetadas pelo inversor (i_{INV}).

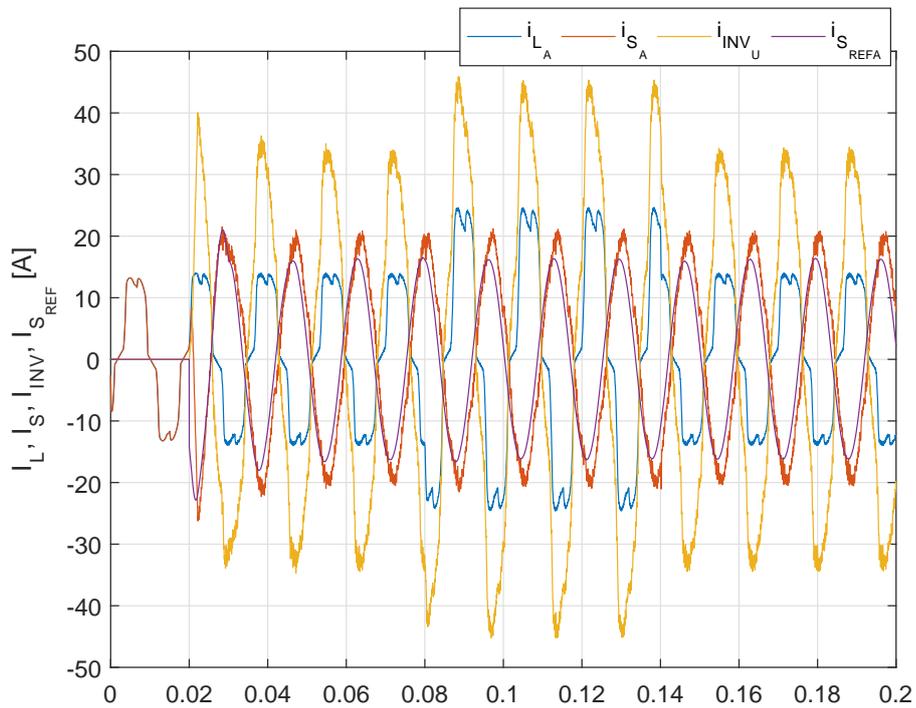


Figura 4.19: Correntes na fase A para a carga (i_L), para a fonte (i_S), na saída do inversor (i_{INV}) e referência de corrente para a fonte (i_{SREF}) no ramo U.

A partir das formas de ondas apresentadas nas figuras 4.15 e 4.18 foram comparadas as correntes referentes à fonte, à carga e à referência com a corrente na saída do inversor em uma única fase, de forma isolada. A comparação realizada é apresentada na figura (4.19), onde é observável que a corrente de carga (i_L) somente é alterada nos instantes previstos de incremento e decremento da carga. A corrente na fonte (i_S) segue a frequência da referência (i_{SREF}) mas possui o valor absoluto distinto do estimado devido ao fato de que a soma das correntes nas três fases e no condutor neutro deve ser nula, como pode ser melhor observado na figura 4.20, que apresenta graficamente os erros entre a referência para a rede CA (i_{SREF}) e a corrente mensurada na rede CA (i_S), neste caso, o inversor não possui conexão com o neutro no PAC e assim, surge a diferença observada.

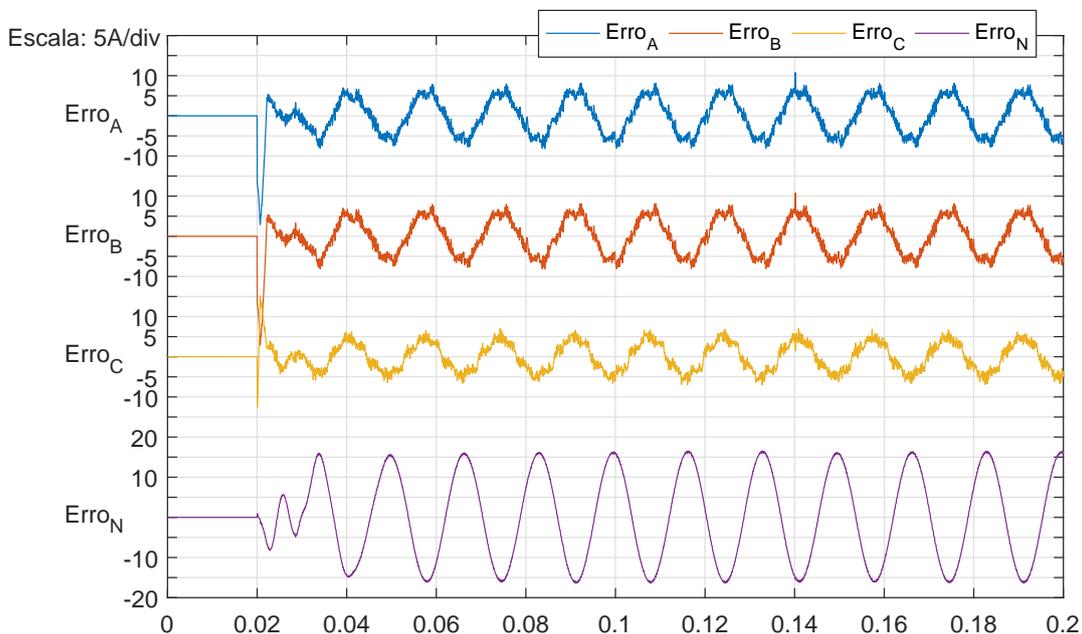


Figura 4.20: Erro obtido entre a corrente de referência (i_{SREF}) e a corrente na rede CA (i_S).

A corrente na saída do inversor (i_{INV}), após o acoplamento ao PAC, é dada pela soma da corrente injetada na rede CA (i_S) com a corrente consumida pela carga (i_L). o que se justifica pelo fato de que em vez da rede CA fornecer potência ativa para o PAC, está agora recebendo potência ativa do inversor trifásico em ponte completa.

A figura 4.21, apresenta a potência na rede CA (P_S), inicialmente em um sentido de fluxo e, após a conexão do inversor ao PAC, no sentido oposto, ou seja, injetando potência na rede elétrica na taxa de 5 kW por fase.

A figura 4.22 apresenta a potência na carga (P_L). É notável a variação de carga nos instantes $t = 0,08\text{ s}$ e $t = 0,14\text{ s}$.

A figura 4.23 apresenta a potência injetada pelo inversor no PAC (P_{INV}). É notável que a potência obtida na saída do inversor é dada pela soma da potência injetada

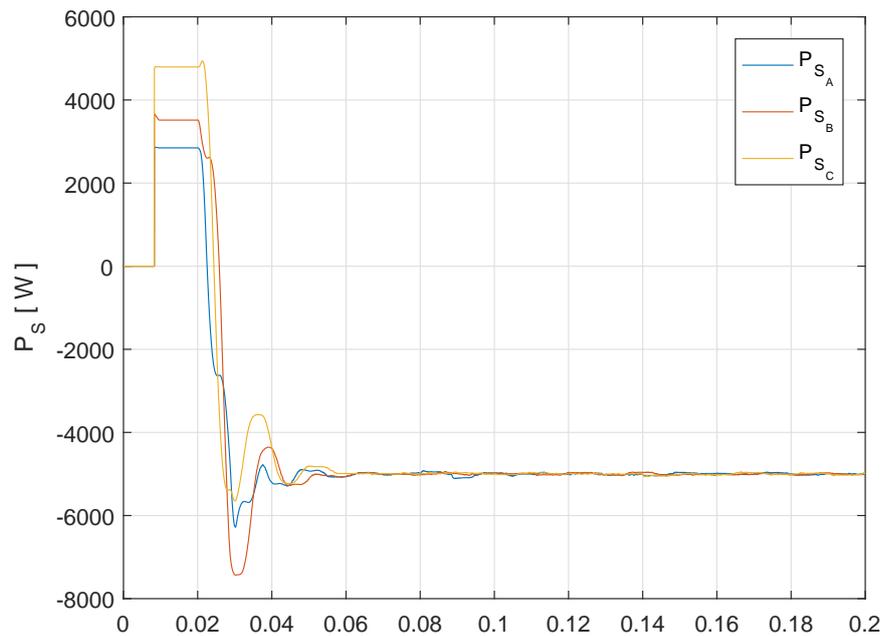


Figura 4.21: Potências na rede CA (P_S)

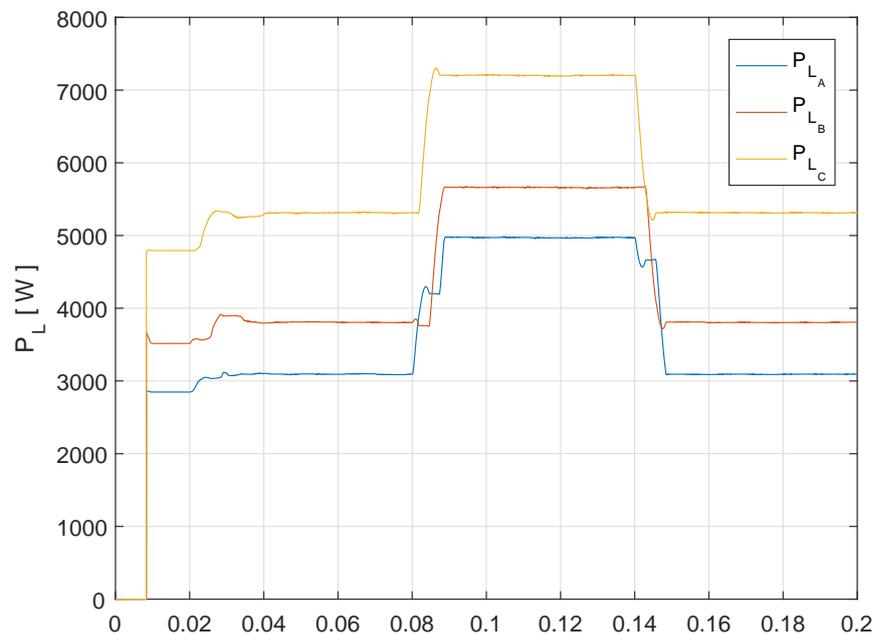


Figura 4.22: Potências na carga (P_L)

na rede CA com a potência consumida pela carga.

Na figura 4.24 estão dispostas todas as potências pertinentes a este caso em análise de forma a possibilitar uma melhor visualização.

Para que a QEE possa ser melhorada em relação ao tipo de carga conectada, são

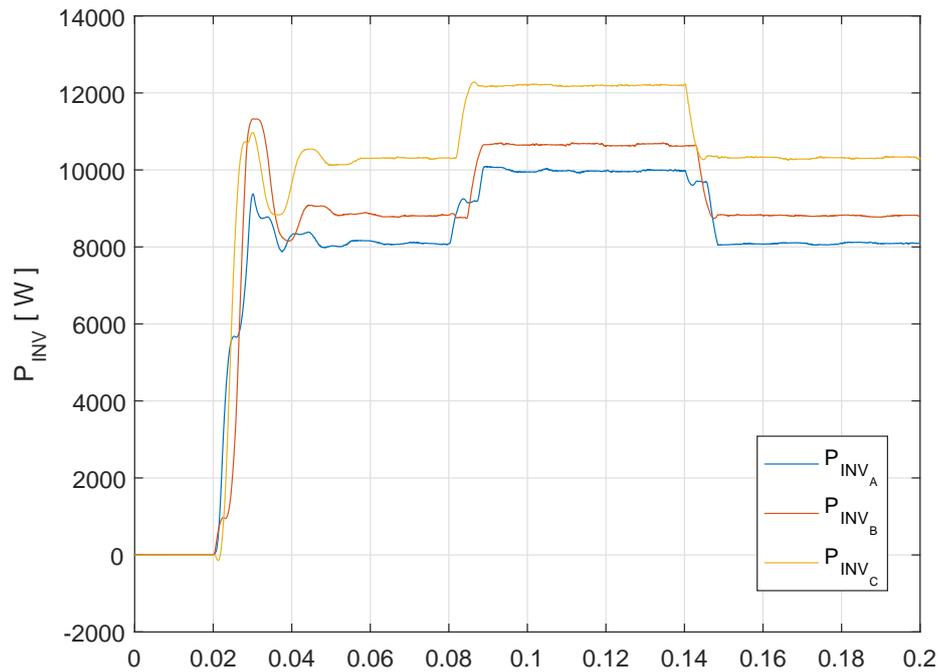


Figura 4.23: Potências nas saídas do inversor (P_{INV}).

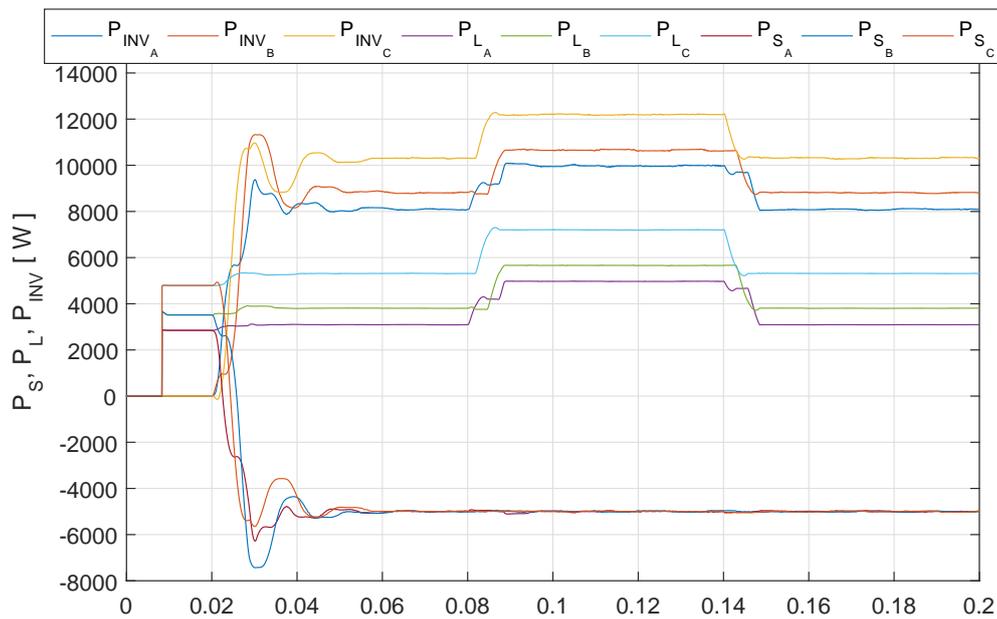


Figura 4.24: Potências nas saídas do inversor (P_{INVL}), na carga (P_L) e na rede CA (P_S).

necessárias reduções das DHT's das correntes elétricas e correção do FP originado pelo conjunto de cargas, neste caso, desbalanceado e não-linear. O FP é estabilizado em torno do valor unitário (acima de 0,98) conforme pode ser visualizado na figura 4.25.

A partir dos dados obtidos na figura 4.26 e de (4-1) são calculadas as DHTs para

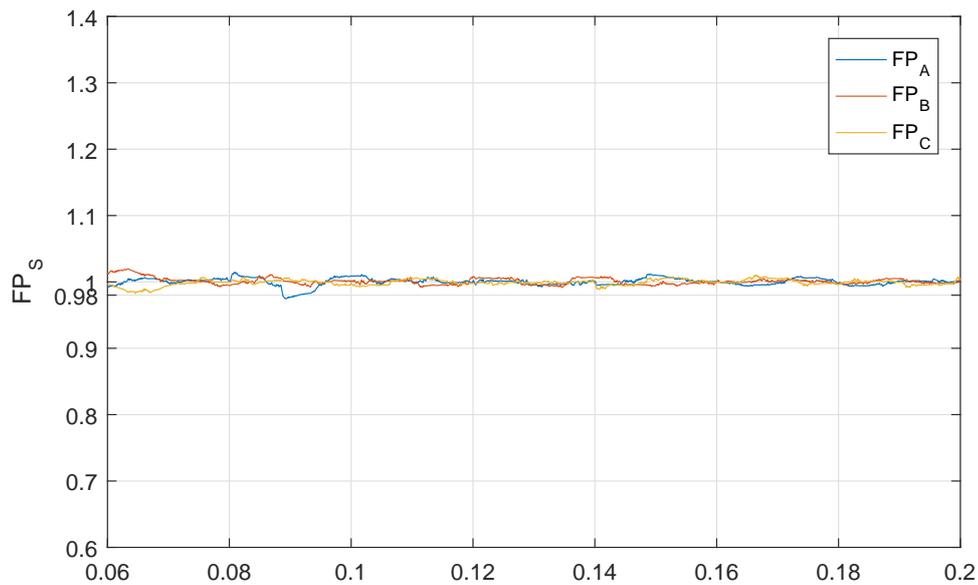


Figura 4.25: Fator de potência (FP).

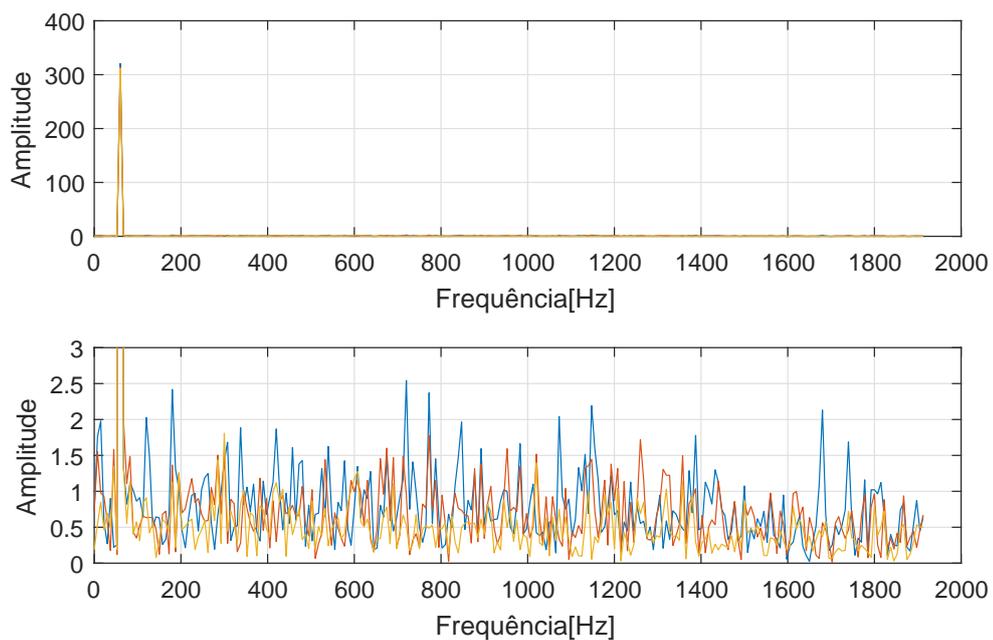


Figura 4.26: FFT das tensões de fase na rede CA.

as tensões, nas três fases, sendo obtidos os valores: $DHT_{V_A} = 2,15\%$, $DHT_{V_B} = 1,72\%$ e $DHT_{V_C} = 1,37\%$.

A figura 4.27 apresenta a componentes harmônicas presentes na corrente elétrica na rede CA. A partir destes dados e de (4-2) são calculadas as DHTs para as correntes, nas três fases, sendo obtidos os valores: $DHT_{I_A} = 4,42\%$, $DHT_{I_B} = 4,74\%$ e $DHT_{I_C} = 5,42\%$. A NTC-71 [38] estabelece como critério que a DHT de corrente deve ser inferior a 5%

para que seja mantida a qualidade do sistema. Para o cálculo da DHT das tensões e correntes foram utilizados dados em regime permanente do sistema, ou seja, após conexão do inversor e após decorrido o período transitório no sistema. Foram consideradas para os cálculos as componentes harmônicas até a 31^a harmônica.

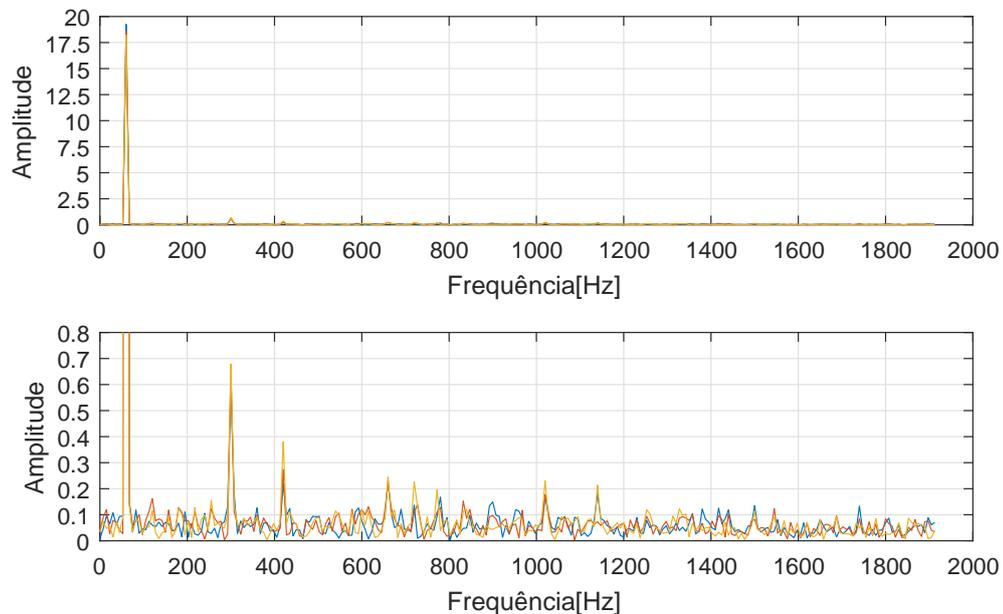


Figura 4.27: *FFT das correntes na rede CA.*

Ao observar a simulação do inversor trifásico em ponte completa com carga desequilibrada e variação da carga não-linear como um todo, pode-se observar que o conjunto controlador e inversor cumprem com alguns dos objetivos e parcialmente com outros, dentre os parciais podemos ressaltar o equilíbrio entre as correntes na rede CA e a maximização do fator de potência amostrado, ressaltando que as correntes injetadas não seguem a referência calculada pelo controlador e assim apresentam um erro que pode ser justificado pela ausência de conexão do inversor com o condutor neutro da rede CA.

4.2 Inversor Trifásico a Quatro Braços

Nesta seção são apresentados dados obtidos nas simulações do inversor trifásico a quatro braços, formas de onda quanto às tensões no PAC, formas de onda das correntes fornecidas pela rede CA e pelo inversor, formas de onda das correntes na carga e referências para saída do inversor além de dados como fator de potência e distorções harmônicas das tensões e correntes.

O inversor é acoplado ao PAC, ao qual estão conectadas a rede CA e dois modelos de cargas, sendo estes, um linear (resistivo) e outro não-linear variável (retificador

CA-CC com carga RC), conforme apresentado na figura 4.28. As cargas são assim dispostas para simular um sistema semelhante a um sistema real, com diversidade de cargas e assim explorar com maior amplitude os resultados obtidos com o uso do inversor trifásico a quatro braços e do método de controle baseado em modelo (MPC), ambos aplicados nesta seção.

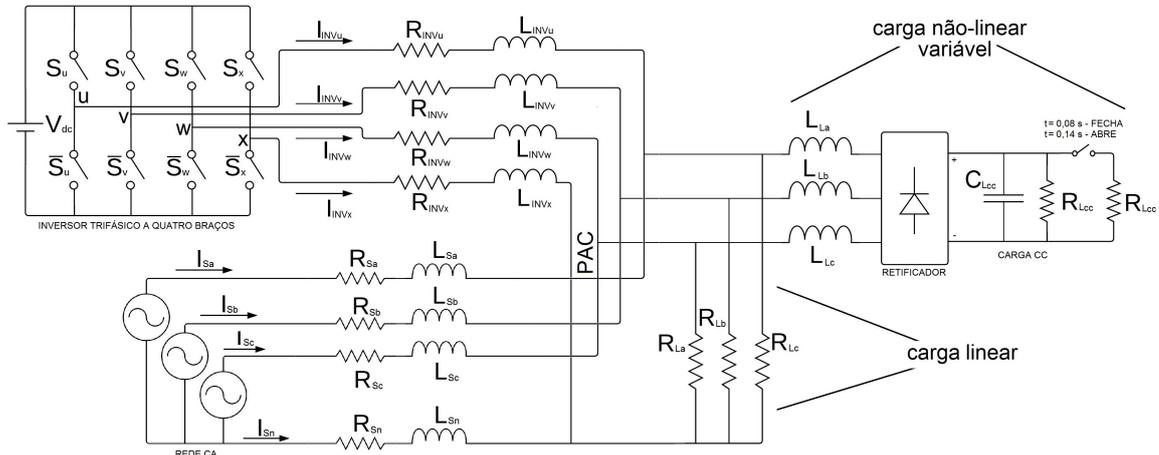


Figura 4.28: Sistema elétrico utilizado na simulação com inversor trifásico a quatro braços.

São apresentados resultados obtidos em quatro simulações, sendo elas realizadas com variações de parâmetros de uma para outra, tais parâmetros são:

- Variações da carga não-linear, que é aumentada para análise de transitório durante a simulação e após determinado período é reduzida para análise gráfica;
- Carga linear equilibrada nos casos 3 e 5, e desequilibrada nos casos 4 e 6;
- Injeção de potência na rede CA nos casos 3 e 4, e injeção de potência nula nos casos 5 e 6.

Os valores dos dados e componentes utilizados nos quatro casos de simulações são apresentados na Tabela 4.2. Os valores utilizados para R_S e L_S foram obtidos a partir da norma NTC-08 [35].

São obtidos também para esta simulação dados relativos às distorções harmônicas de tensões e correntes (DHT_v e DHT_i), e também do fator de potência (FP) observados para a rede CA. Conforme já apresentado em (4-1), (4-2) e (4-3).

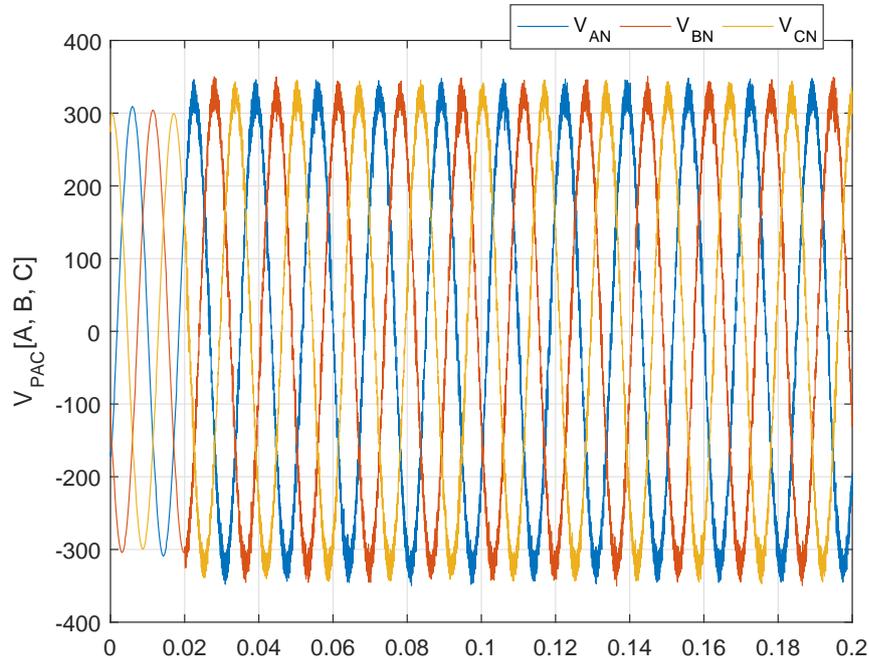
A figura 4.29 apresenta as tensões de fase nos terminais do PAC. É possível observar os valores instantâneos e frequência constante das tensões.

4.2.1 Caso 3

Neste caso, a fonte CA a quatro fios alimenta através do PAC duas cargas: A primeira, uma carga linear desequilibrada ligada em estrela a quatro fios. A segunda carga

Tabela 4.2: Dados utilizados nas simulações.

Dados	Valores
V_{dc}	$380 * \sqrt{2} * 1,3 V$
V_{PAC}	$220 / 380 V$
$R_{INV[U,V,W,X]}$	$0,05 \Omega$
$L_{INV[U,V,W,X]}$	$6 mH$
$R_{S[A,B,C,N]}$	$0,411 \Omega$
$L_{S[A,B,C,N]}$	$0.411 mH$
$R_{L_{Caso3}[A,B,C]}$	$100 \Omega, 50 \Omega, 25 \Omega$
$R_{L_{Caso4}[A,B,C]}$	$100 \Omega, 100 \Omega, 100 \Omega$
$R_{L_{Caso5}[A,B,C]}$	$100 \Omega, 50 \Omega, 25 \Omega$
$R_{L_{Caso6}[A,B,C]}$	$100 \Omega, 100 \Omega, 100 \Omega$
$L_{L[A,B,C]}$	$3 mH$
$P_{Injetada por fase_{Caso3}}$	$5 kW$
$P_{Injetada por fase_{Caso4}}$	$5 kW$
$P_{Injetada por fase_{Caso5}}$	$0 kW$
$P_{Injetada por fase_{Caso6}}$	$0 kW$
$C_{Carganao-linear constante}$	$1 \mu F$
$R_1 Carganao-linear constante$	50Ω
$R_2 Carganao-linear variavel$	50Ω

**Figura 4.29:** Tensões de fase no PAC.

é não-linear equilibrada.

O inversor é acoplado ao PAC em $t = 0,02s$. No instante $t = 0,08s$ a corrente da carga não linear é aumentada, e em $t = 0,14s$ é reduzida ao valor inicial. Além da

ocorrência destas cargas, o inversor injeta potência ativa na rede elétrica. Entre as figuras 4.30 e 4.42 são exibidos gráficos de dados referentes ao caso 1.

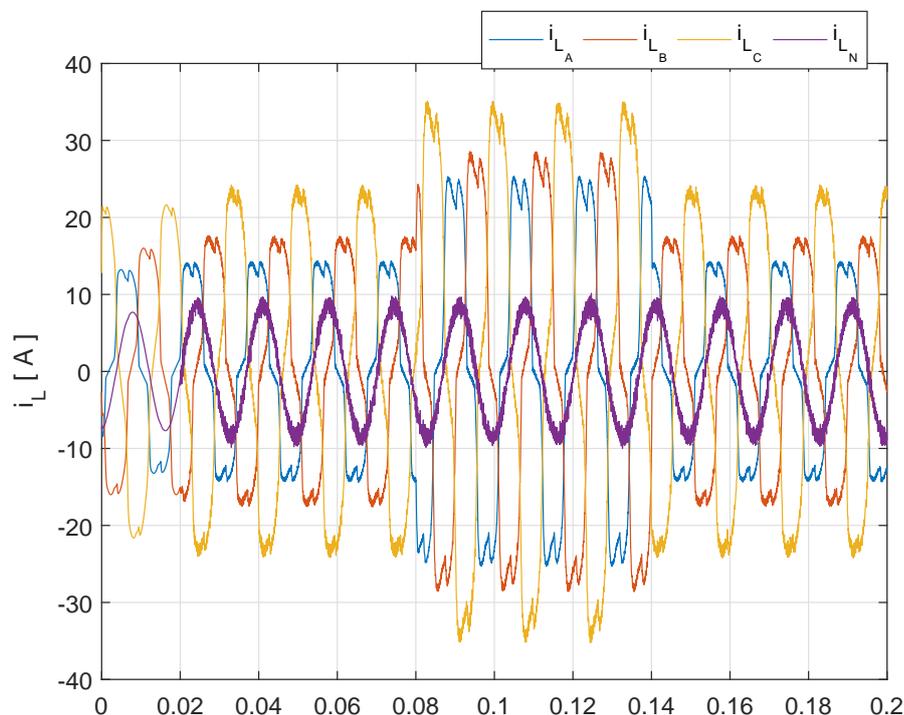


Figura 4.30: Correntes na carga (i_L).

A figura 4.30 apresenta as correntes observadas na carga, devido à carga não-linear conectada as formas de onda das correntes nas caras possuem distorções provocando também a distorção das correntes nas respectivas fases na rede CA.

Na figura 4.31 é notável que, antes do acoplamento do inversor trifásico a quatro braços, as correntes observadas a partir da fonte eram as mesmas observadas na carga, isto é, $I_S = I_L$, e desequilibradas. Após o instante $t = 0,02\text{ s}$ a corrente elétrica fornecida pelo inversor é injetada no PAC e flui pelo sistema, seja para a carga acoplada ao PAC ou para a rede CA. Ao compará-la com 4.16, observa-se a diferença na corrente do condutor neutro entre as topologias trifásica em ponte completa e trifásica a quatro braços com cargas desequilibradas. No primeiro a corrente de neutro é transmitida à rede CA, no segundo, o inversor é capaz de atenuá-la.

As correntes elétricas fornecidas pelo inversor a quatro braços, figura 4.32 demonstram que assim como para a carga, a corrente despachada pelo inversor também é desequilibrada e não é perfeitamente senoidal de modo que o inversor supre a demanda da carga e injeta potência no sistema elétrico. A corrente em x é não-nula para que seja possível equilibrar as fases devido à carga desbalanceada e a corrente no neutro que circula pela rede CA seja anulada, evitando assim, prováveis problemas a outros

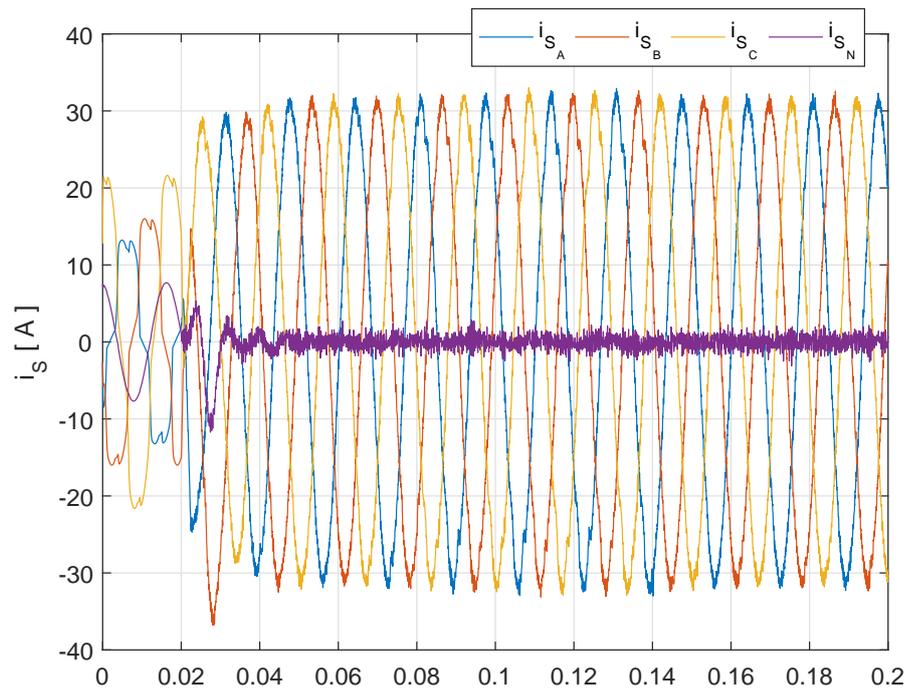


Figura 4.31: Correntes fornecidas pela rede CA (i_s).

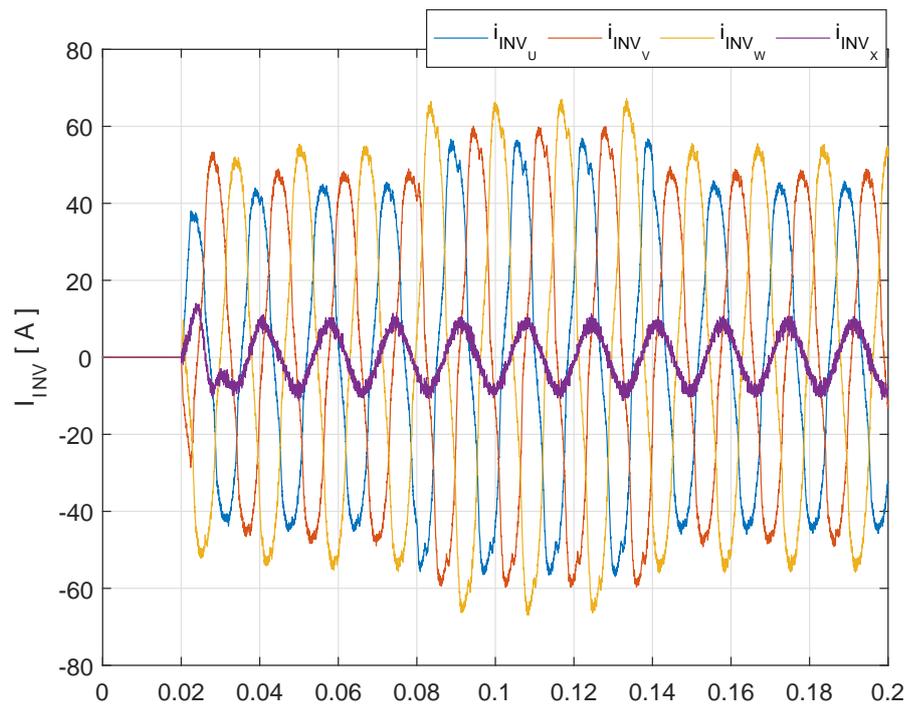


Figura 4.32: Correntes injetadas pelo inversor (i_{INV}).

consumidores devido à carga local acoplada. A figura 4.33 indica as formas das correntes estimadas a serem obtidas pela fonte $i_{S_{REF}}$

A partir das formas de ondas apresentadas nas figuras 4.30 a 4.33, foram

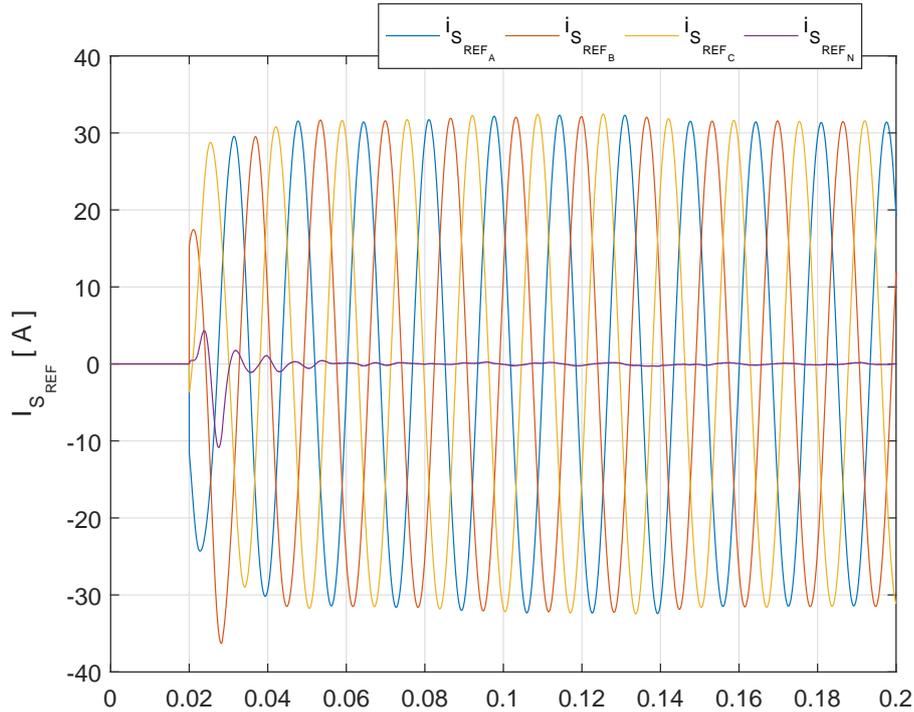


Figura 4.33: Referências para as correntes na fonte ($i_{S_{REF}}$).

comparadas as correntes na fase A referentes à fonte, à carga e à referência com a correspondente fase no inversor, U . Tal comparação é apresentada na figura 4.34, em que é possível observar que a corrente da carga (i_L) somente é alterada nos instantes previstos de incremento e decremento da carga, a corrente na fonte (i_S) segue a referência ($i_{S_{REF}}$) apresentando valores de erro nas fases A, B, C e no neutro (N) menores que os obtidos pelo inversor trifásico em ponte completa, conforme figura 4.35.

As potências obtidas na saída do inversor (P_{INV}), apresentadas na figura 4.36 correspondem à soma das potências consumidas pela carga (P_L), constantes na figura 4.37, com as potências injetadas na rede CA (P_S) através da corrente I_{INV} , figura 4.38. Tais potências ativas são obtidas considerando que o inversor tem à sua disposição potência ativa o suficiente para injetar no PAC e que supra a rede e carga, como pode ser observado na figura 4.39 onde as potências ativas da rede CA e da carga são equivalentes até o momento de conexão do inversor ao PAC. As potências injetadas possuem valores que variam de 8400 W a 10200 W por fase, parte destinada à carga e 5 kW por fase, destinados à injeção na rede CA.

Para não comprometer a qualidade da energia elétrica (QEE), são necessárias reduções das distorções harmônicas totais (DHT) e fator de potência (FP) causadas pela carga, neste caso, desbalanceada e não-linear. O FP é estabilizado em torno do valor 1,0 com pequenas variações, figura 4.40. Observa-se que em nenhum instante o FP ficou abaixo de 0,98, após transcorrido o transitório e acoplamento do inversor.

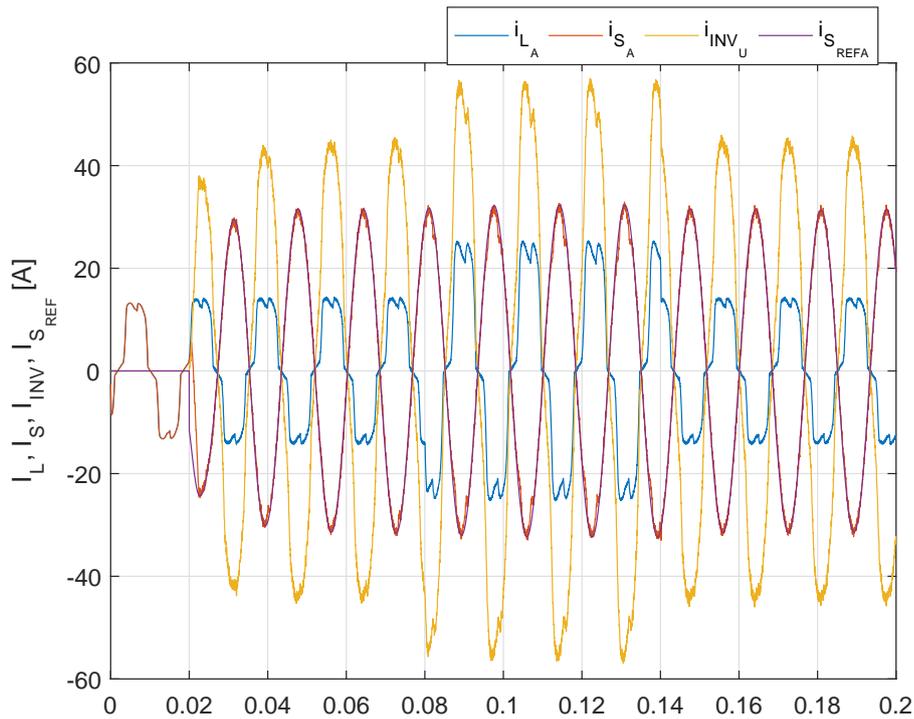


Figura 4.34: Correntes na fase A para a carga (i_L), para a fonte (i_S), na saída do inversor (i_{INV}) e referência de corrente para a fonte (i_{SREF}) no ramo U.

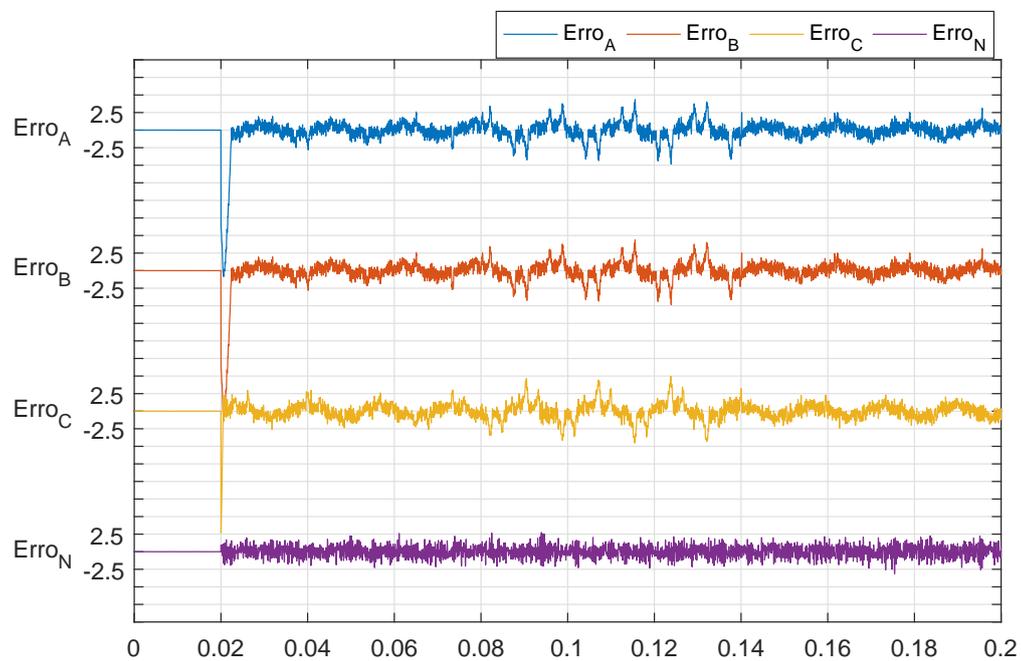


Figura 4.35: Erro obtido entre a corrente de referência (i_{SREF}) e a corrente na rede CA (i_S).

A partir dos dados obtidos na figura 4.41 e de (4-1) são calculadas as DHTs para as tensões, nas três fases, sendo obtidos os valores: $DHT_{V_A} = 2,27\%$, $DHT_{V_B} = 2,30\%$ e

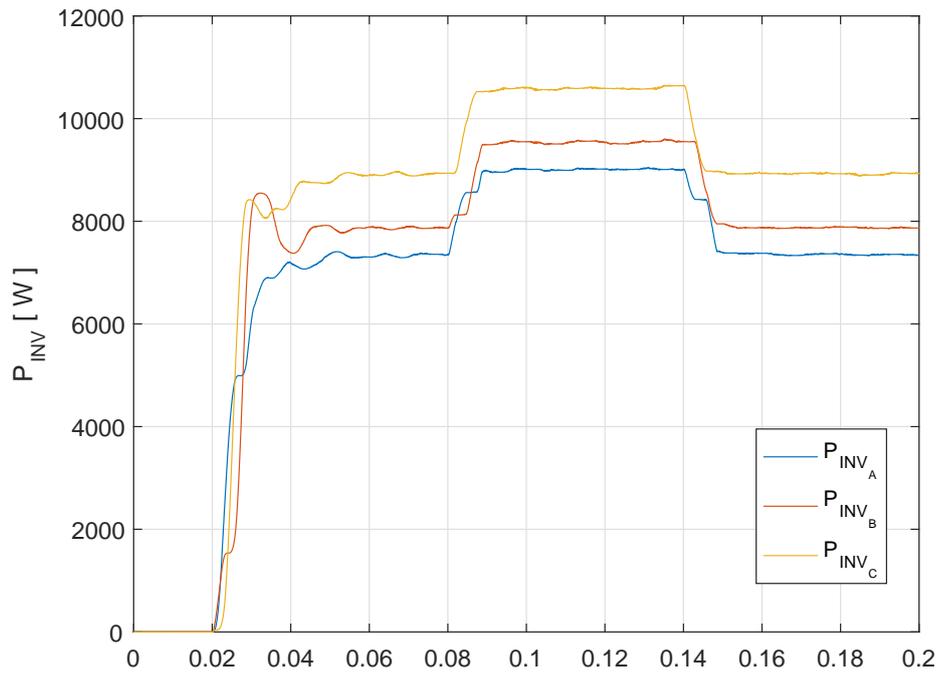


Figura 4.36: Potências nas saídas do inversor (P_{INV}).

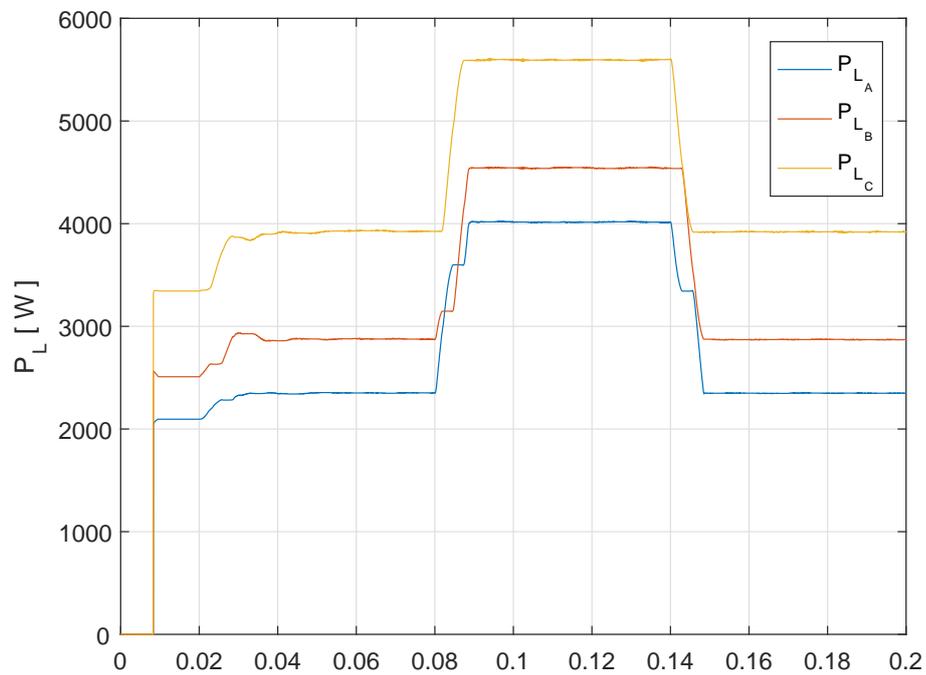


Figura 4.37: Potências na carga (P_L).

$$DHT_{V_C} = 1,61\%.$$

Na figura 4.42 são apresentadas as componentes harmônicas presentes na corrente elétrica na rede CA. A partir dos quais, juntamente à equação (4-2), podem ser obti-

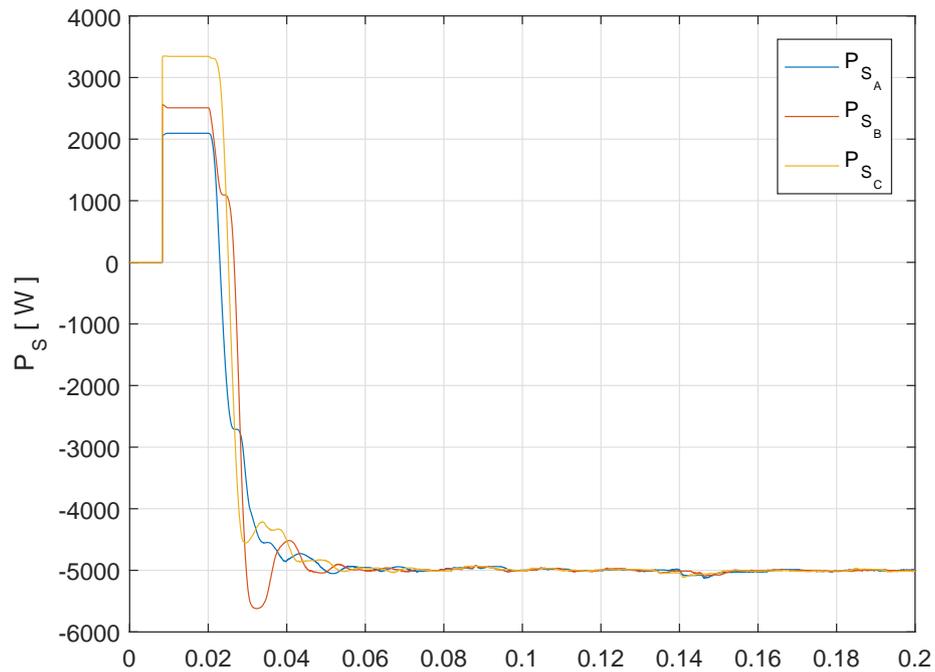


Figura 4.38: Potências na rede CA (P_S).

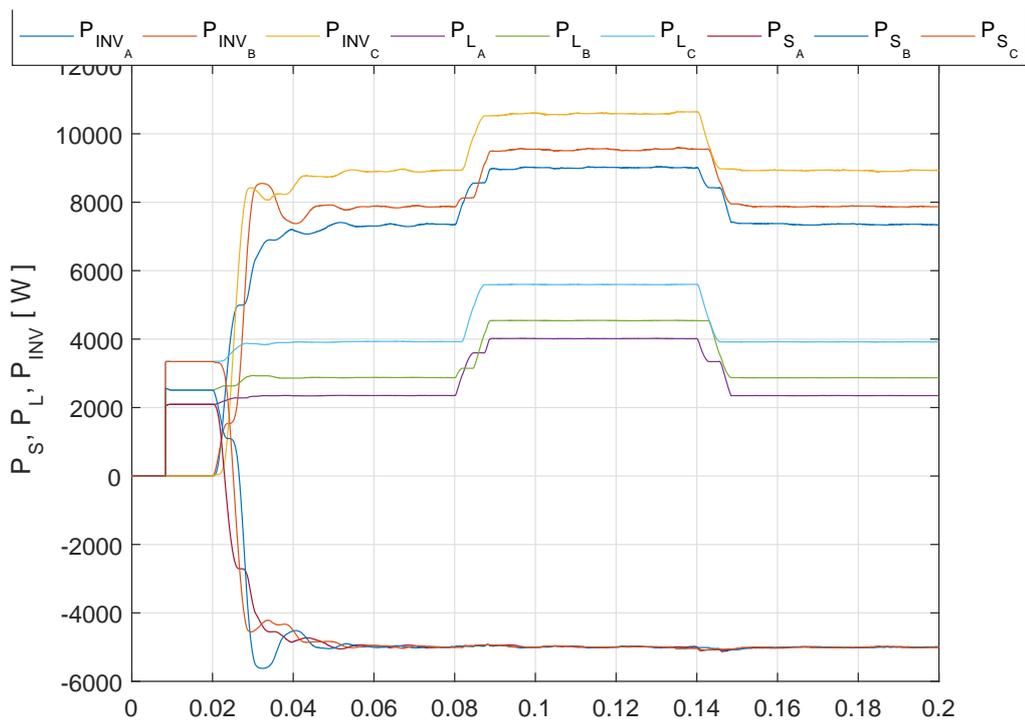


Figura 4.39: Potências no inversor (P_{INV}), na carga (P_L) e na rede CA (P_S).

das as DHTs para as correntes, nas três fases, sendo obtidos os valores: $DHT_{I_A} = 2,42\%$, $DHT_{I_B} = 1,79\%$ e $DHT_{I_C} = 2,07\%$. Conforme mencionado anteriormente, a NTC-71 [38]

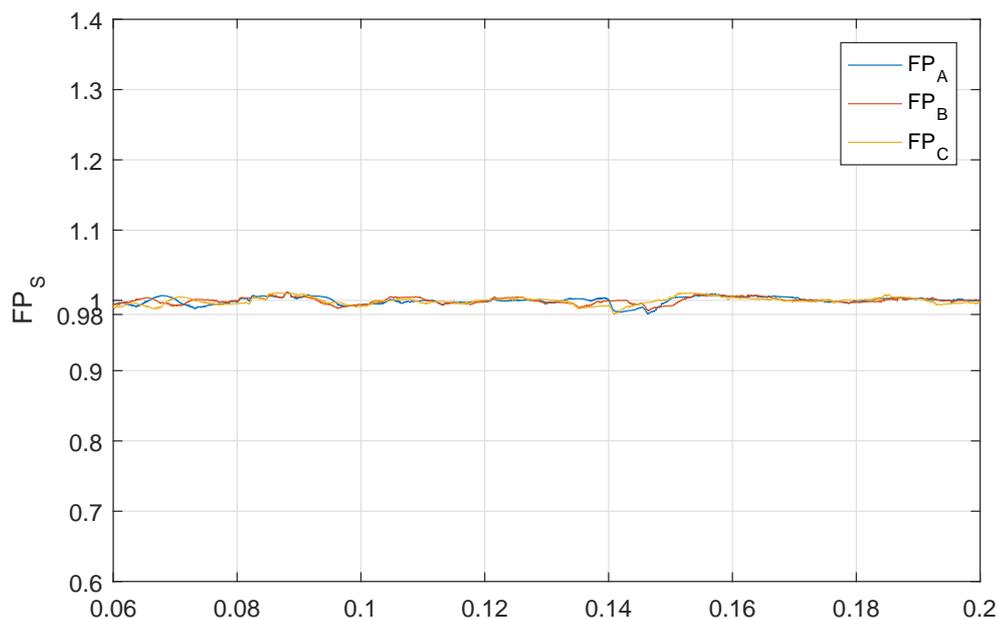


Figura 4.40: Fator de potência (FP).

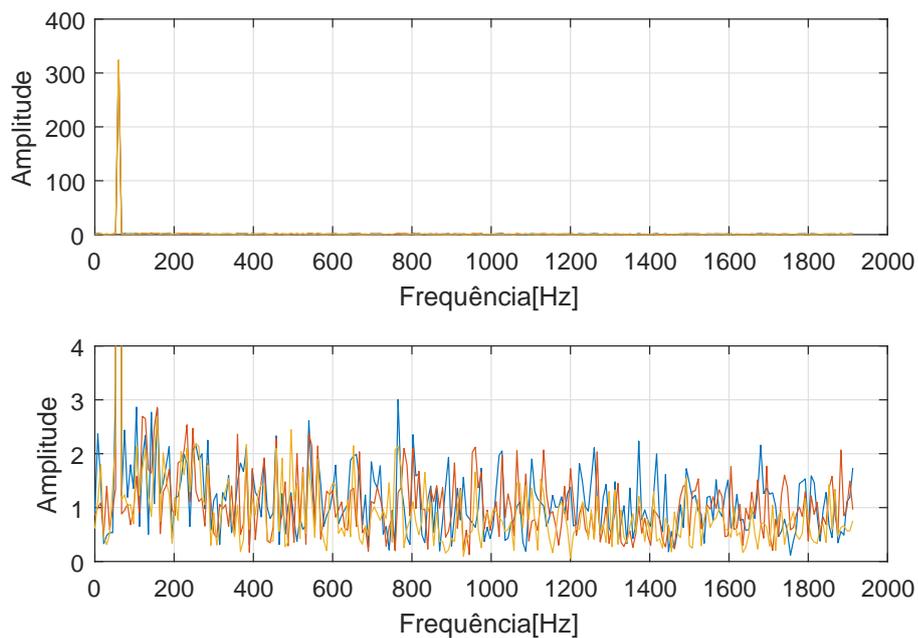


Figura 4.41: FFT das tensões de fase.

estabelece como critério que a DHT de corrente deve ser inferior a 5%.

Para o cálculo da DHT das tensões e correntes foram utilizados dados em regime permanente do sistema, ou seja, após conexão do inversor e após decorrido o período transitório do mesmo. Foram consideradas para os cálculos as componentes harmônicas até a 31^a ordem.

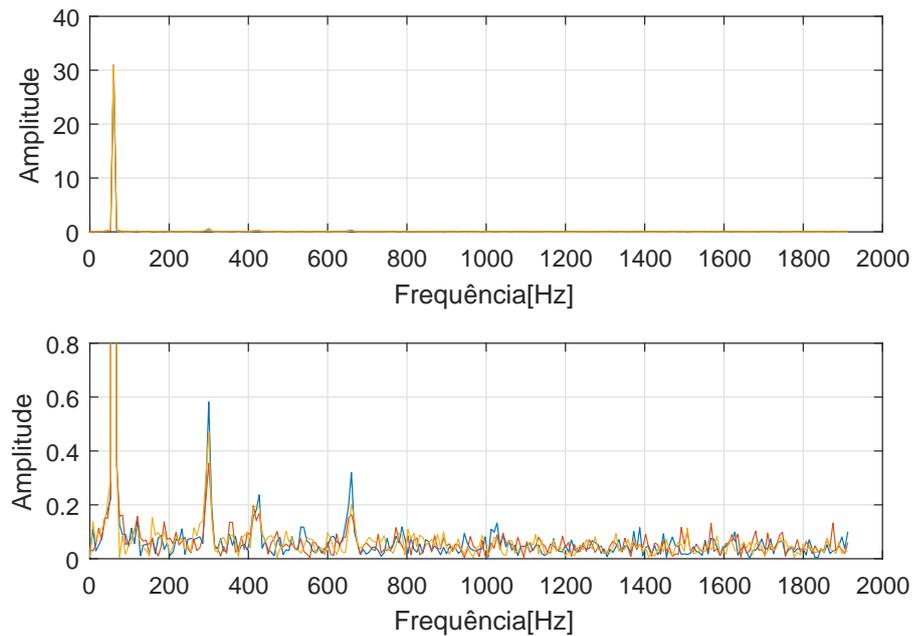


Figura 4.42: *FFT das correntes.*

A figura 4.43 mostra as posições do chaveamento a cada passo ocorrido no sistema. As posições do chaveamento são determinadas pelo controlador MPC e pela função custo que tende a indicar a posição de chaveamento que apresentará o menor custo, figura 4.44.

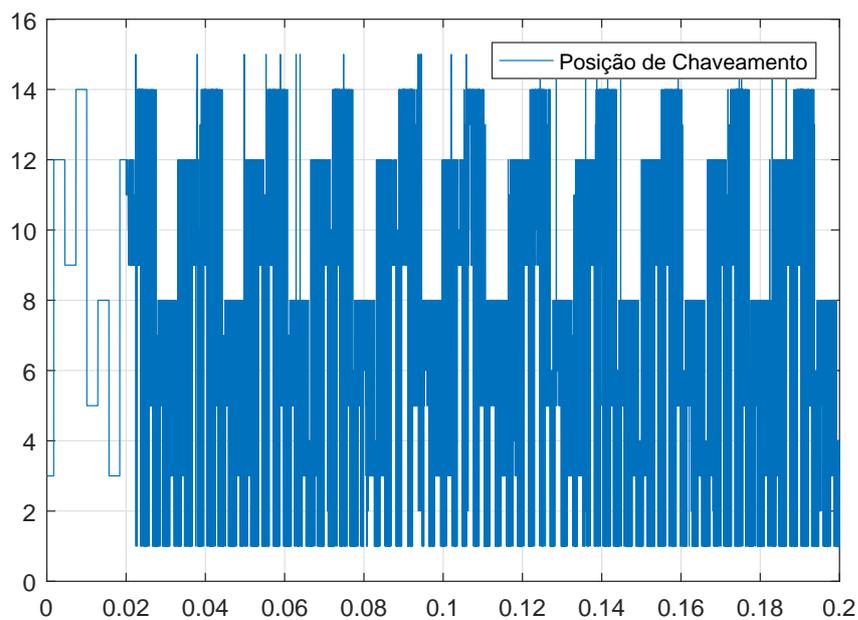


Figura 4.43: *Posição de chaveamento, de acordo com a Tabela 2.3*

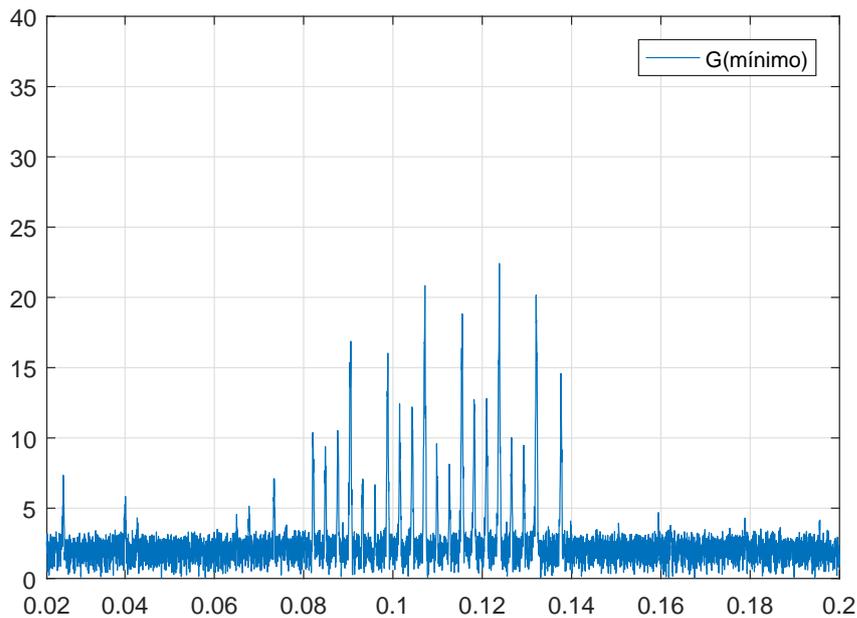


Figura 4.44: Valores obtidos pela função custo para o caso 3.

Ao observar os resultados da presente simulação do inversor trifásico a quatro braços com carga desequilibrada e variação da carga não-linear como um todo, pode-se concluir que o conjunto controlador e inversor satisfazem os objetivos estabelecidos com maior eficácia que o apresentado anteriormente, o inversor trifásico em ponte completa. O inversor trifásico a quatro braços mantém características satisfatórias de corrente para a rede CA, mantendo também o equilíbrio entre as fases, alimenta as cargas acopladas e injeta potência ativa no PAC.

4.2.2 Caso 4

Neste caso, a fonte CA a quatro fios alimenta, através do PAC, uma carga não-linear e uma carga linear equilibrada, como enunciado em 4.2. O inversor é acoplado ao PAC em $t = 0,02s$. No instante $t = 0,08s$ a corrente da carga não-linear é aumentada e em $t = 0,14s$ é reduzida ao valor inicial. Além da ocorrência destas cargas, o inversor injeta determinada potência na rede elétrica, sendo $5kW$ por fase. Entre as figuras 4.45 e 4.56 são exibidos gráficos observados no caso 4. Assim, sabendo que a carga é equilibrada, são observadas formas de onda de correntes idênticas nas três fases e defasadas entre si em 120° , como é apresentado na figura 4.45.

Na figura 4.46 é mostrada a corrente que flui na rede CA (i_s).

A corrente injetada pelo inversor no PAC pode ser observada na figura 4.47.

Na figura 4.48 é apresentada a referência desejada a ser observada na rede CA.

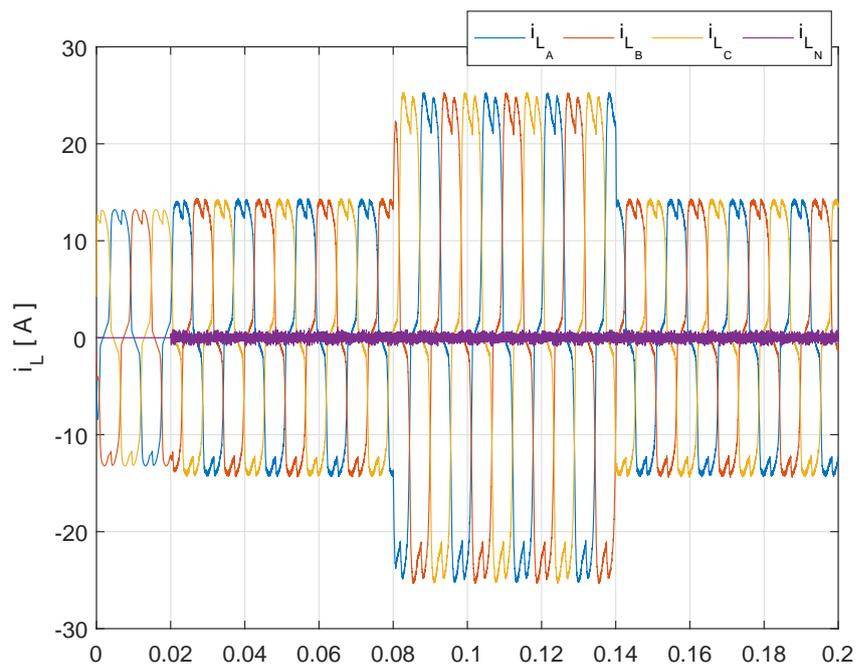


Figura 4.45: Correntes na carga (i_L).

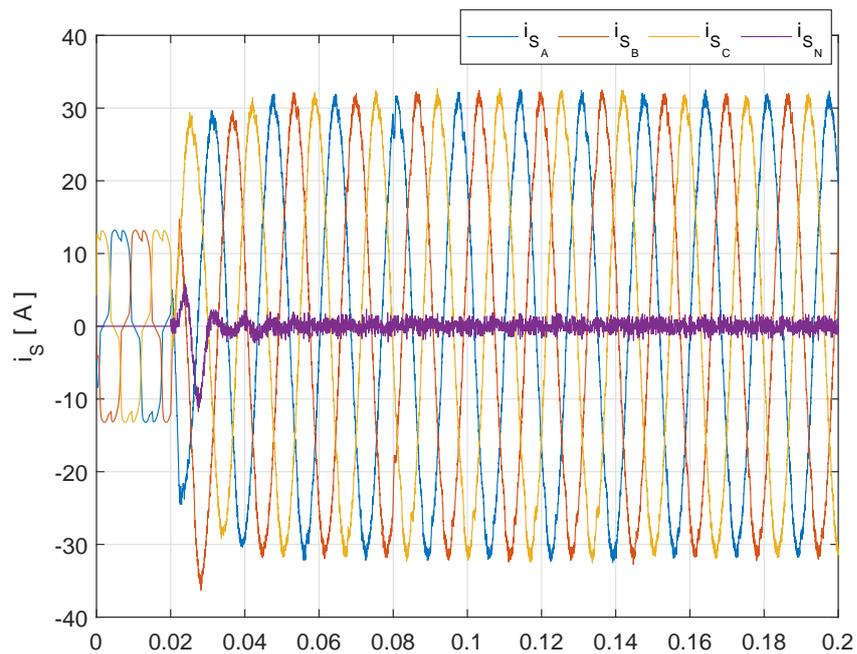


Figura 4.46: Correntes fornecidas pela fonte (i_s).

Na figura 4.49 podem ser observadas as correntes na carga e na rede CA, juntamente à corrente injetada pelo braço U do inversor e a referência desejada. É possível observar que a diferença entre a corrente na rede CA e a referência para tal é mínima.

As potências obtidas na saída do inversor (P_{INV}), apresentadas na figura 4.50

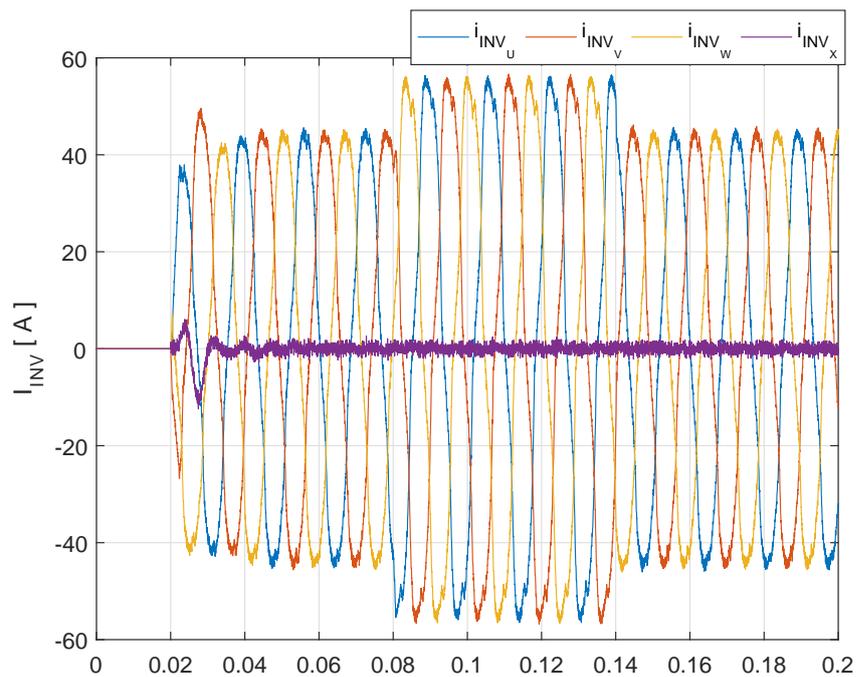


Figura 4.47: Correntes injetadas pelo inversor (i_{INV}).

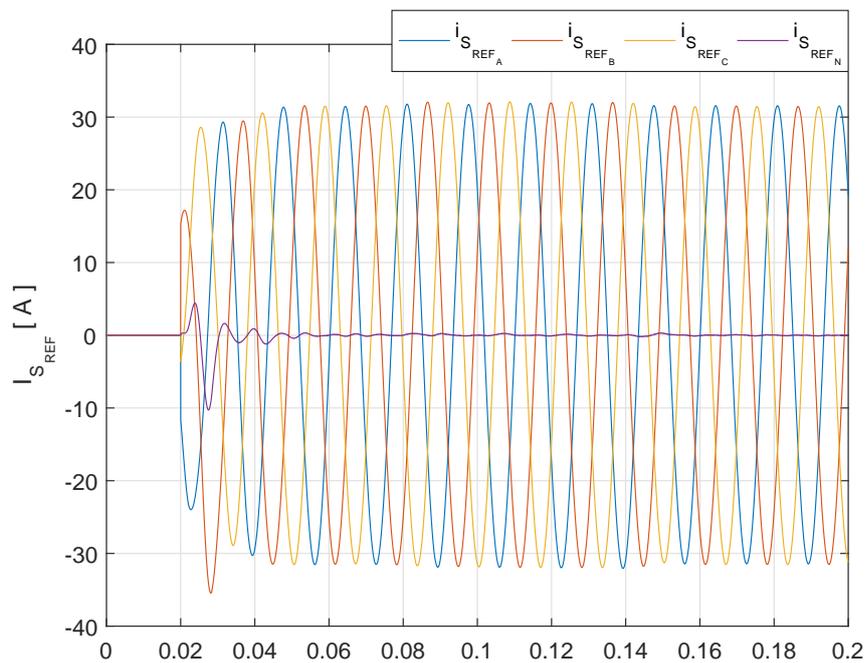


Figura 4.48: Referências para as correntes na fonte ($i_{S_{REF}}$).

correspondem à soma das correntes consumidas pela carga (P_L), constantes na figura 4.51, com as correntes injetadas na rede CA (P_S), figura 4.52.

Considerando que o inversor tem à sua disposição potência o suficiente para injetar no PAC e que supra a rede e carga, como pode ser observado em um único plano

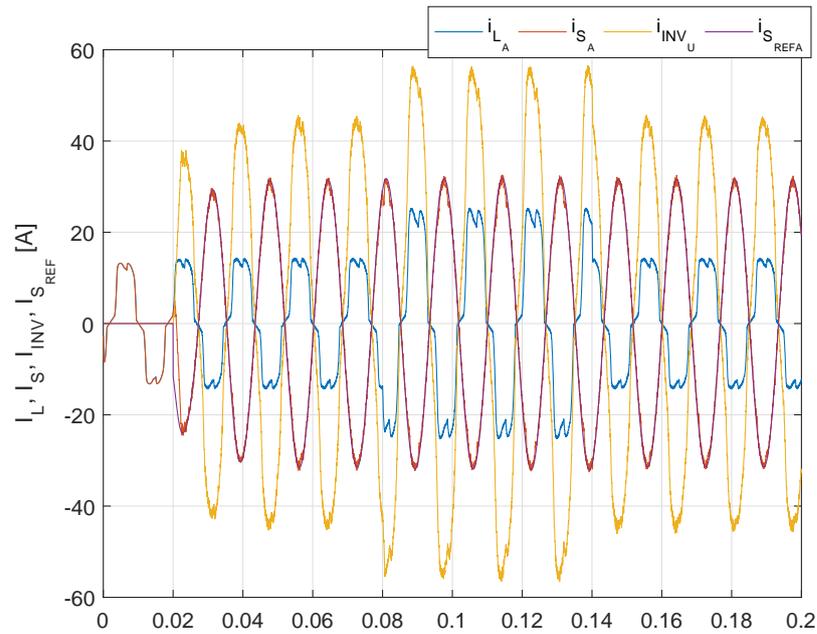


Figura 4.49: Correntes na fase A para a carga (i_L), para a fonte (i_S), na saída do inversor (i_{INV}) e referência de corrente para a fonte (i_{SREF}) no ramo U.

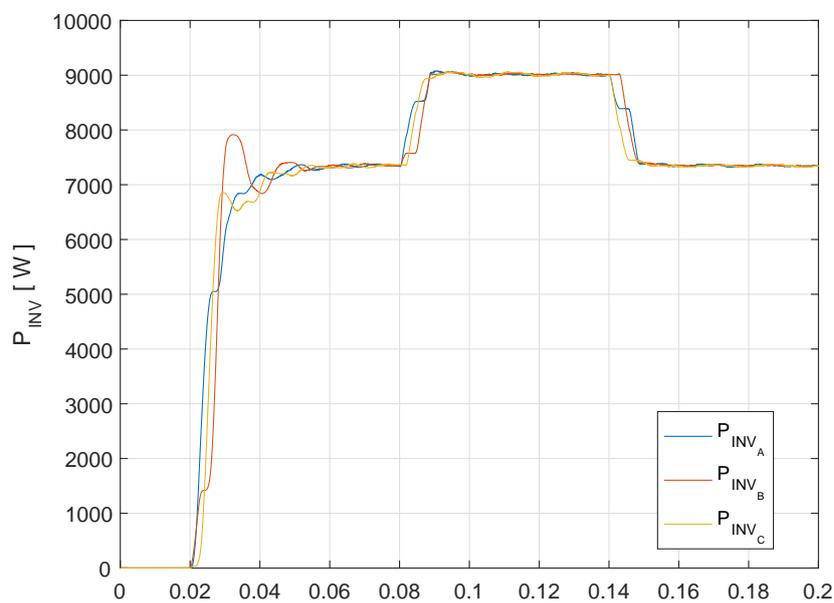


Figura 4.50: Potências nas saídas do inversor (P_{INV}).

cartesiano na figura 4.53 em que as potências ativas da rede CA e da carga são equivalentes até a conexão do inversor que, neste caso, fornece potência ativa de forma equilibrada à rede CA. As potências injetadas são da ordem de 8,75 kW por fase, parte destinada à carga e 5 kW por fase, destinados à injeção na rede CA.

O FP na figura 4.54 tem pequenas variações após o inversor ser acoplado,

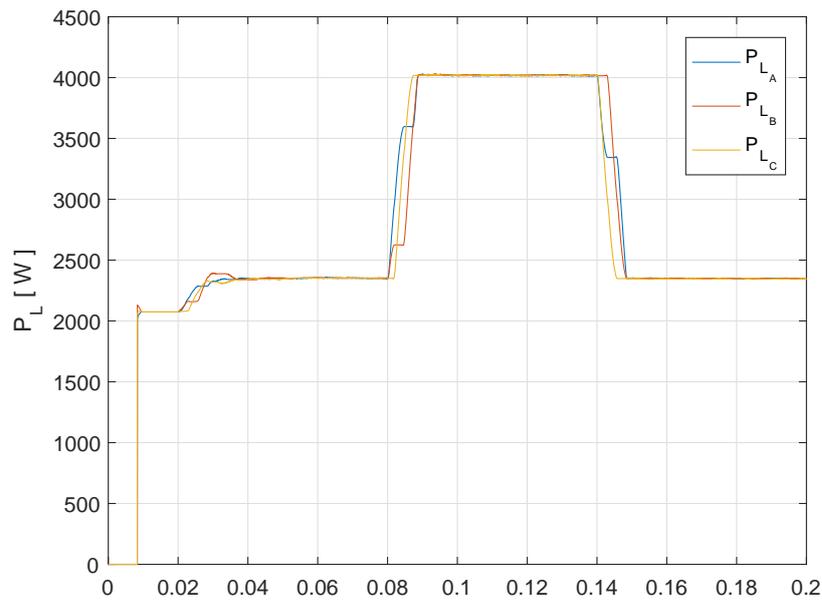


Figura 4.51: Potências na carga (P_L).

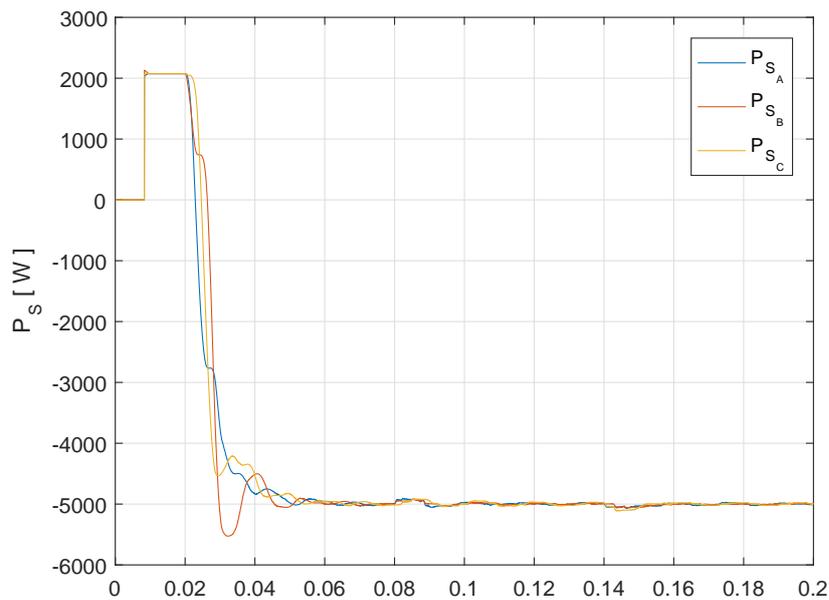


Figura 4.52: Potências na rede CA (P_S).

semelhante ao observado no caso anterior (4.2.1), é mantido acima de 0,98% após a estabilização do transitório de acoplamento do inversor ao PAC.

Os intervalos que apresentam $FP > 1,0$ devem-se a pequenas variações ocorridas no chaveamento em que a potência injetada é maior que a referência a ser injetada.

A partir da FFT apresentada na figura 4.55 e de (4-1), podem ser calculadas as DHTs das tensões para as três fases. São elas: $DHT_{V_A} = 2,78\%$, $DHT_{V_B} = 2,75\%$ e

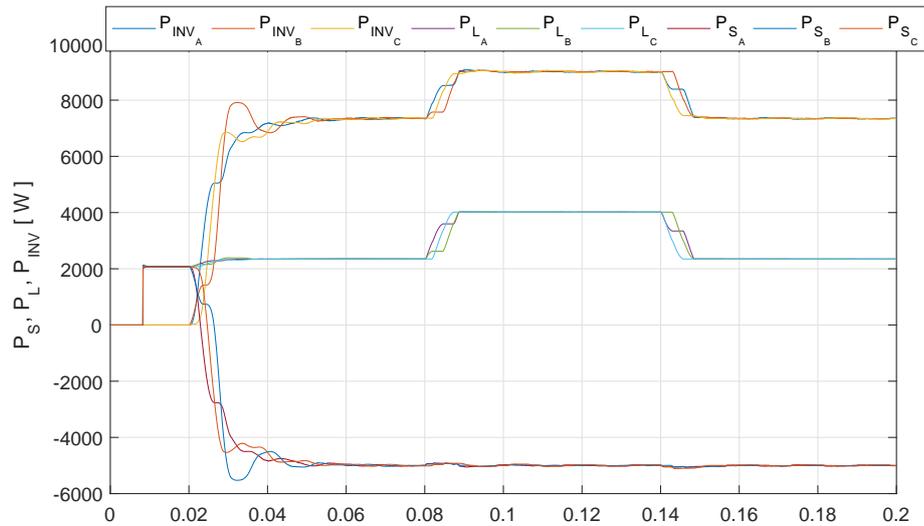


Figura 4.53: Potências no inversor (P_{INV}), na carga (P_L) e na rede CA (P_S).

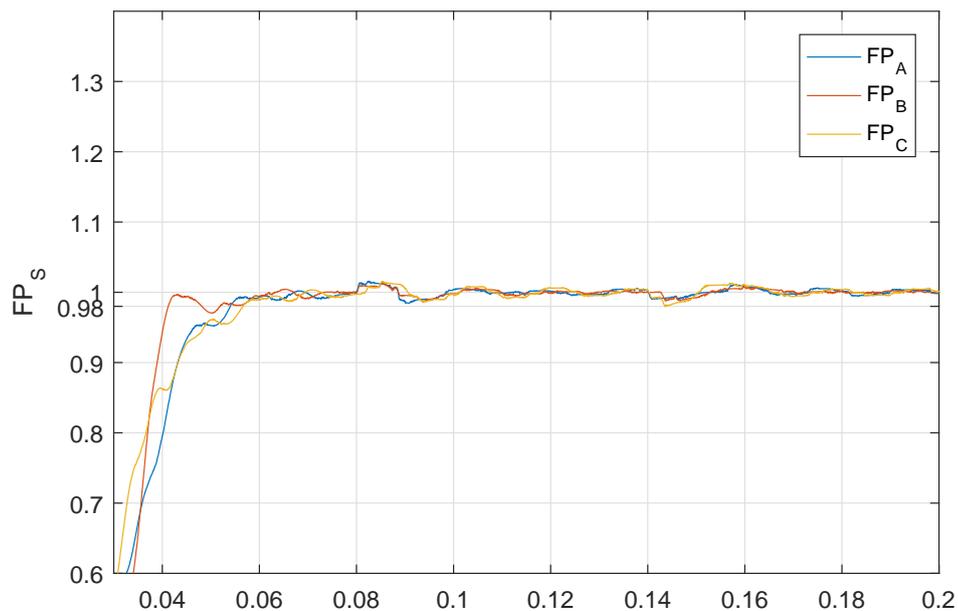


Figura 4.54: Fator de potência (FP).

$DHT_{V_C} = 3,04\%$.

A partir das componentes harmônicas constantes nas correntes elétricas que são apresentadas na figura 4.56, juntamente à equação (4-2), podem ser obtidas as DHTs para as correntes: $DHT_{I_A} = 1,84\%$, $DHT_{I_B} = 1,95\%$ e $DHT_{I_C} = 1,92\%$. Conforme mencionado anteriormente, a NTC-71 [38] estabelece como critério que a DHT de corrente deve ser inferior a 5%.

Para o cálculo da DHT das tensões e correntes foram utilizados dados em regime

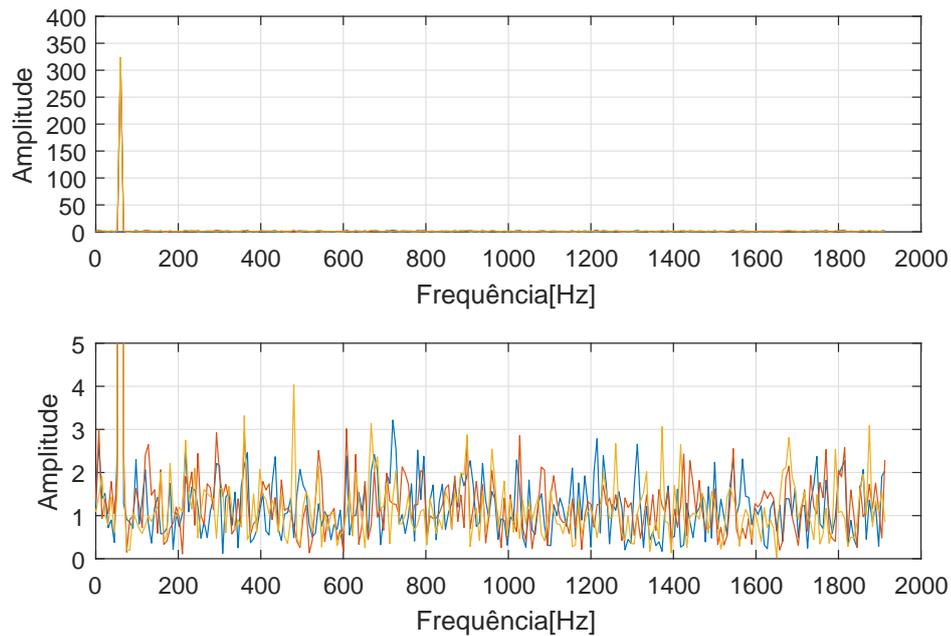


Figura 4.55: *FFT das tensões de fase.*

permanente do sistema, ou seja, após conexão do inversor e após decorrido o período transitório do mesmo. Foram consideradas para os cálculos as componentes harmônicas até a 31^a ordem.

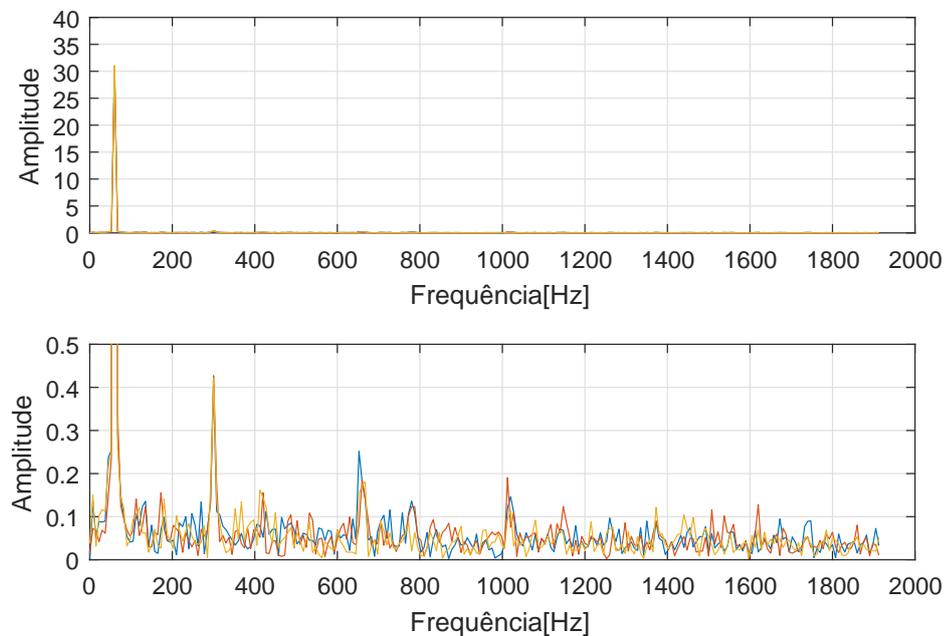


Figura 4.56: *FFT das correntes.*

Ao observar os resultados da presente simulação do inversor trifásico a quatro braços para a carga equilibrada e variação da carga não-linear pode-se destacar que o

conjunto controlador e inversor satisfazem os objetivos estabelecidos com maior eficácia que o inversor trifásico em ponte completa. E também, de modo mais eficaz que quando a carga é desequilibrada, tendo em vista que no presente caso a corrente a ser injetada pelo braço X para equilibrar as correntes nas fases devem ser, e são, o mais próximas do valor nulo. O inversor trifásico a quatro braços mantém características satisfatórias de corrente para a rede CA e também o equilíbrio entre as fases, alimenta as cargas acopladas e injeta potência no PAC. Ao comparar com o caso 3, observa-se uma redução nas DHTs para tensões e correntes no caso 4.

4.2.3 Caso 5

No caso 5 a carga linear é desequilibrada e a carga não-linear sofre variações. O inversor é acoplado ao PAC em $t = 0,02\text{ s}$, a carga linear desequilibrada é ligada em estrela a quatro fios em paralelo com a carga não-linear, que é aumentada no instante $t = 0,08\text{ s}$ e em $t = 0,14\text{ s}$ é reduzida ao valor inicial. Neste caso, a potência ativa injetada na rede CA é nula. O inversor atua como fonte para a carga acoplada e não deve injetar potência ativa na rede CA. As figuras 4.57 a 4.65 exibem os gráficos observados no caso 5.

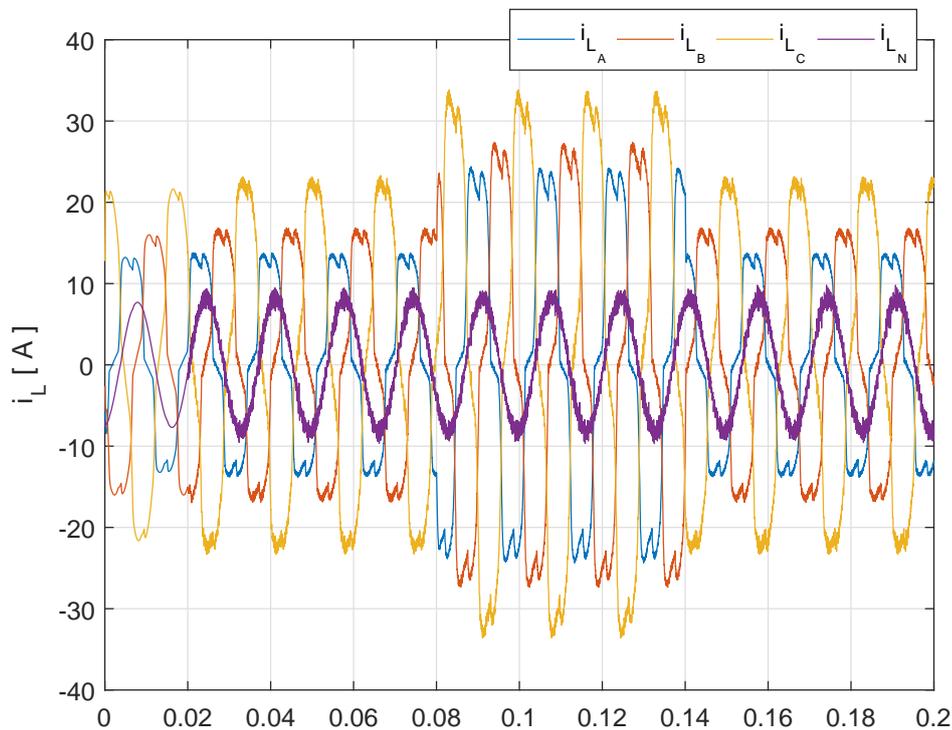


Figura 4.57: Correntes na carga (i_L).

Na figura 4.57 são apresentadas as formas de onda das correntes desbalanceadas na carga (i_L). Na figura 4.58 é possível observar a corrente que flui pela rede CA, neste caso a corrente tem valores próximos a zero, fato ocorrido devido ao cálculo realizado para

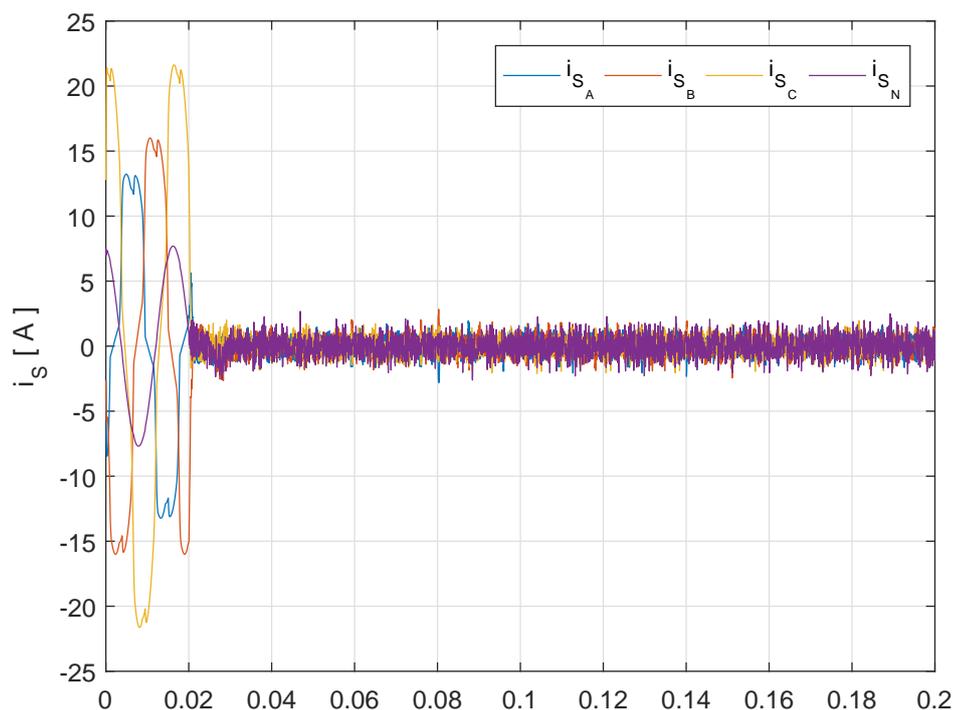


Figura 4.58: Correntes fornecidas pela fonte (i_s).

a ocorrência de menor erro possível. A corrente da fonte constante na rede CA apresenta os valores mais próximos do desejado que puderam ser alcançados conforme pode ser observado.

A figura 4.59 apresenta a corrente injetada pelo inversor no PAC. A corrente visualizada no condutor neutro é devida ao desequilíbrio das cargas entre as fases.

Na figura 4.60 são apresentados os valores das referências a serem obtidas como correntes na rede CA. É importante observar a pequena amplitude do sinal. Os maiores valores ocorrem no intervalo em que a carga não-linear é duplicada.

Na figura 4.61 podem ser observadas, de forma sobreposta, as correntes na carga, no inversor, na rede CA e a referência a ser seguida pela rede CA. É notável um ruído devido ao controlador e ao chaveamento.

As formas de ondas das potências no inversor, na carga e na rede podem ser observadas, respectivamente, nas figuras 4.62 a 4.65, que apresentam todas as potências em um único gráfico possibilitando uma melhor comparação. Como pode ser observado, as potências do inversor e da carga se sobrepõem fase a fase, enquanto a potência média na fonte é nula.

O fator de potência na rede CA não é apresentado devido à potência injetada na rede CA ser próxima do valor nulo, desta forma e de acordo com a equação (4-3), o fator de potência referente à corrente na rede é desconsiderado. Ao considerar outras cargas

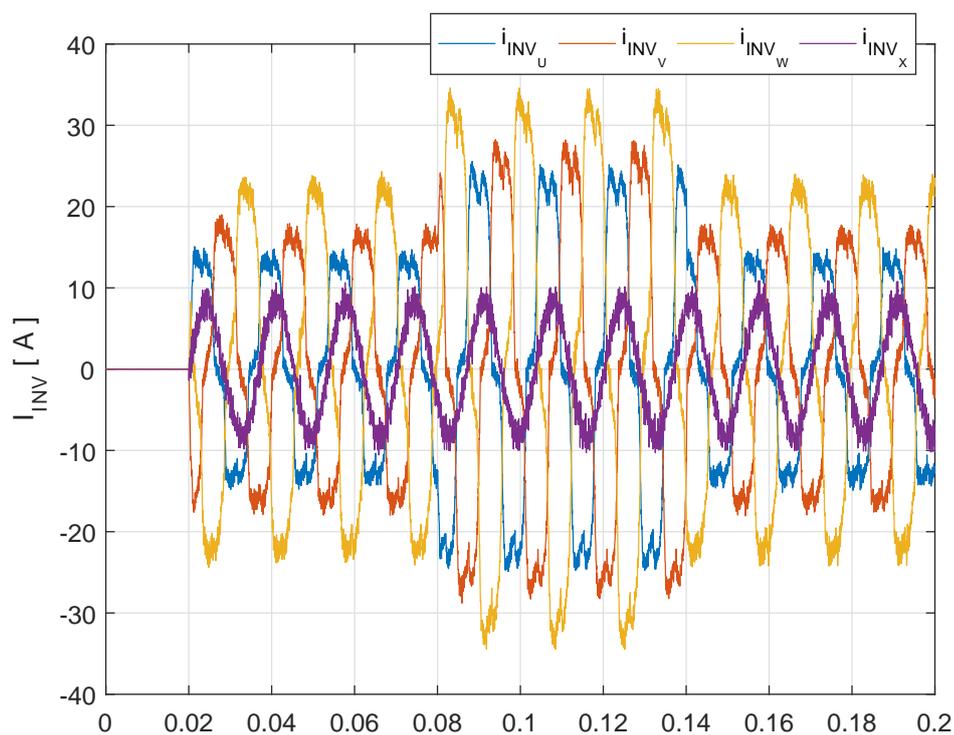


Figura 4.59: Correntes injetadas pelo inversor no PAC (i_{INV}).

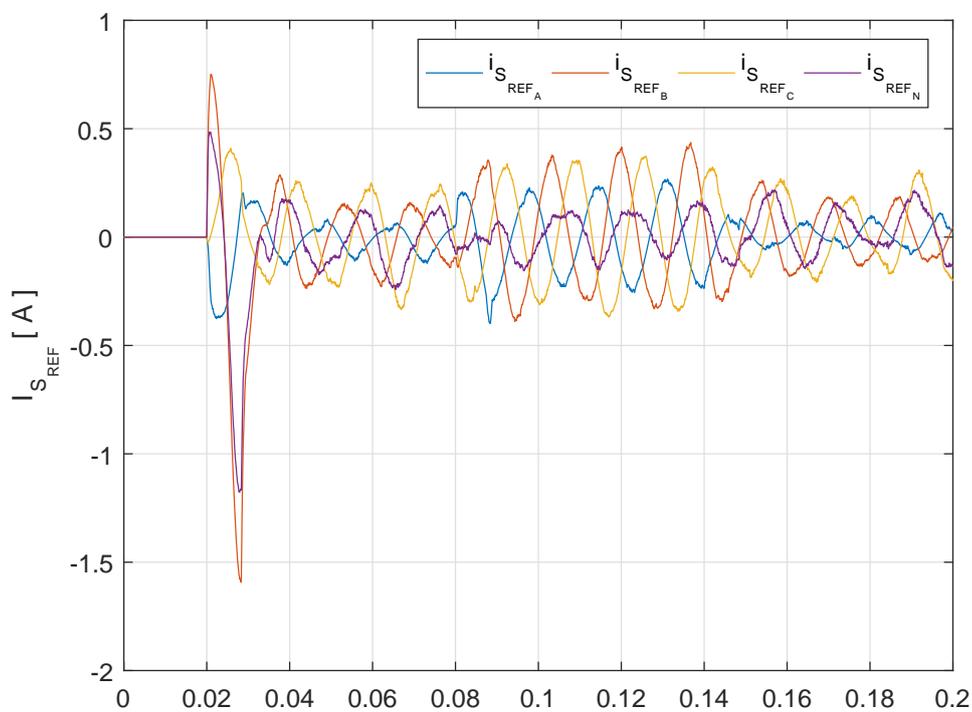


Figura 4.60: Referências para as correntes na fonte (i_{SREF}).

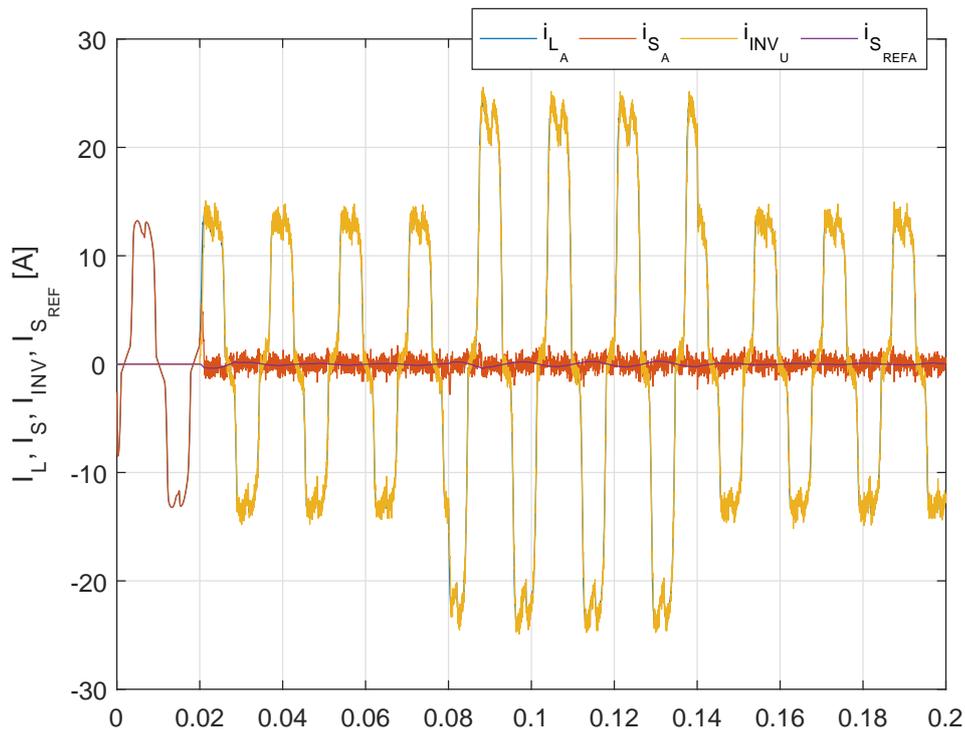


Figura 4.61: Correntes na fase A para a carga (i_L), para a fonte (i_S), na saída do inversor (i_{INV}) e referência de corrente para a fonte (i_{SREF}) no ramo U.

na rede elétrica e as devidas potências injetadas pela rede e consumidas pelas cargas, a variação ocorrida devido à injeção de potência no PAC em questão é desprezível.

A partir da FFT apresentada na figura 4.66 e de (4-1), podem ser calculadas as DHTs das tensões para as três fases. São elas: $DHT_{V_A} = 3,15\%$, $DHT_{V_B} = 2,96\%$ e $DHT_{V_C} = 2,49\%$.

Para o cálculo da DHT das tensões foram utilizados dados em regime permanente do sistema, ou seja, após conexão do inversor e após decorrido o período transitório do mesmo. Foram consideradas para os cálculos as componentes harmônicas até a 31ª ordem.

Ao observar os resultados da presente simulação do inversor trifásico a quatro braços para a carga desequilibrada e com variação da carga não-linear pode-se destacar que o conjunto controlador e inversor satisfazem os objetivos estabelecidos com eficácia. Considerando a carga desequilibrada e tendo em vista que no presente caso a corrente a ser obtida na saída do inversor no braço X deve equilibrar as correntes nas fases da rede CA para que não ocorra fluxo de potência, mantendo o equilíbrio entre as fases na rede CA e alimentando as cargas acopladas a partir da conexão do inversor ao PAC.

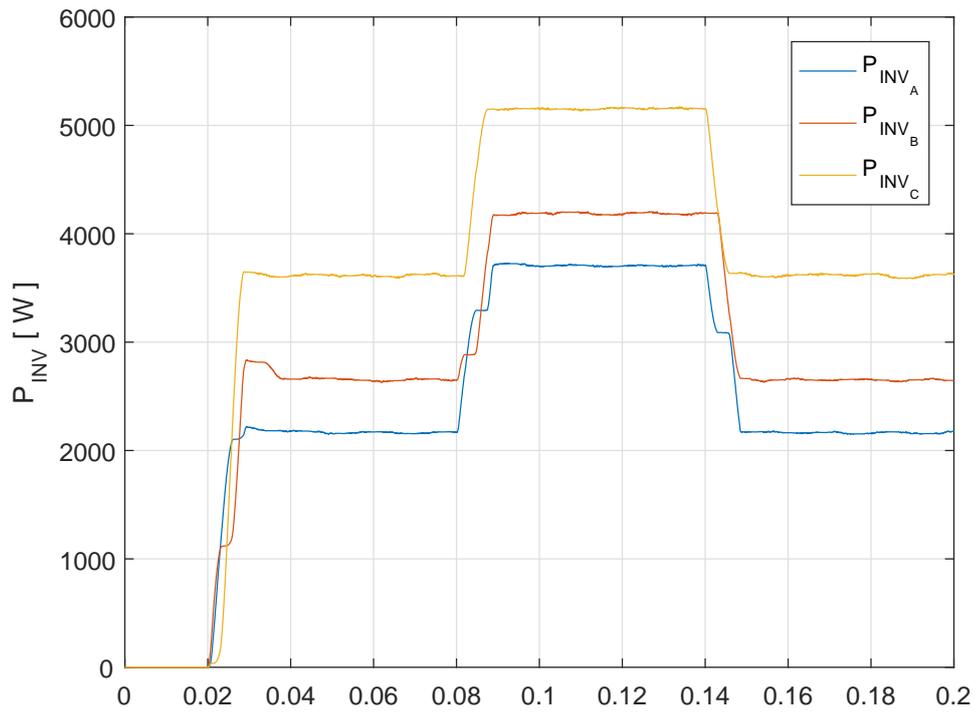


Figura 4.62: Potências nas saídas do inversor (P_{INV}).

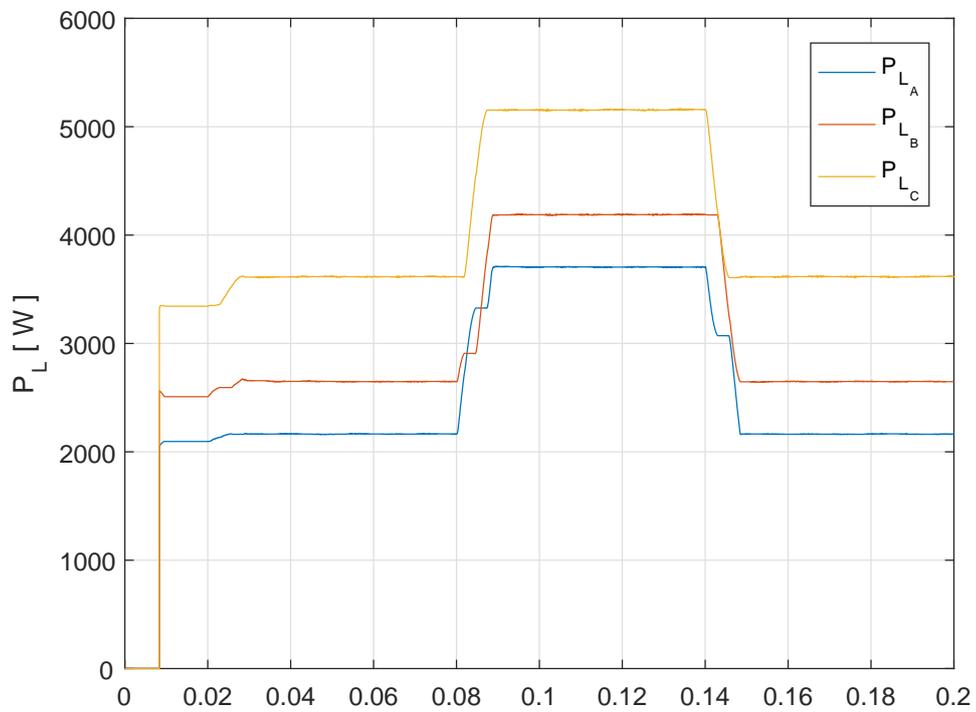


Figura 4.63: Potências na carga (P_L).

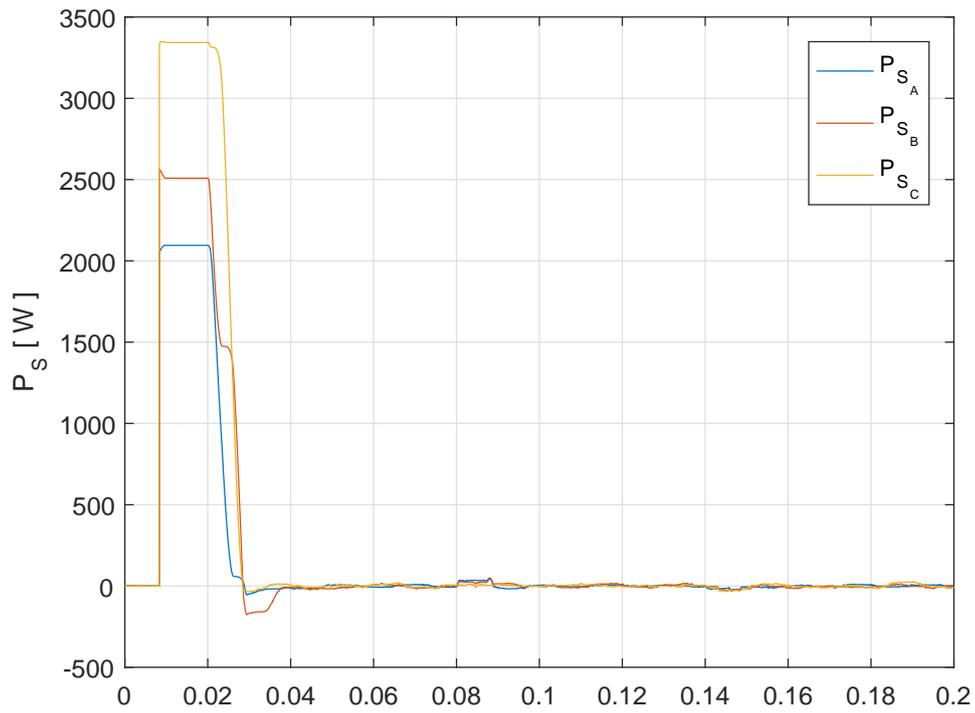


Figura 4.64: Potências na rede CA (P_S).

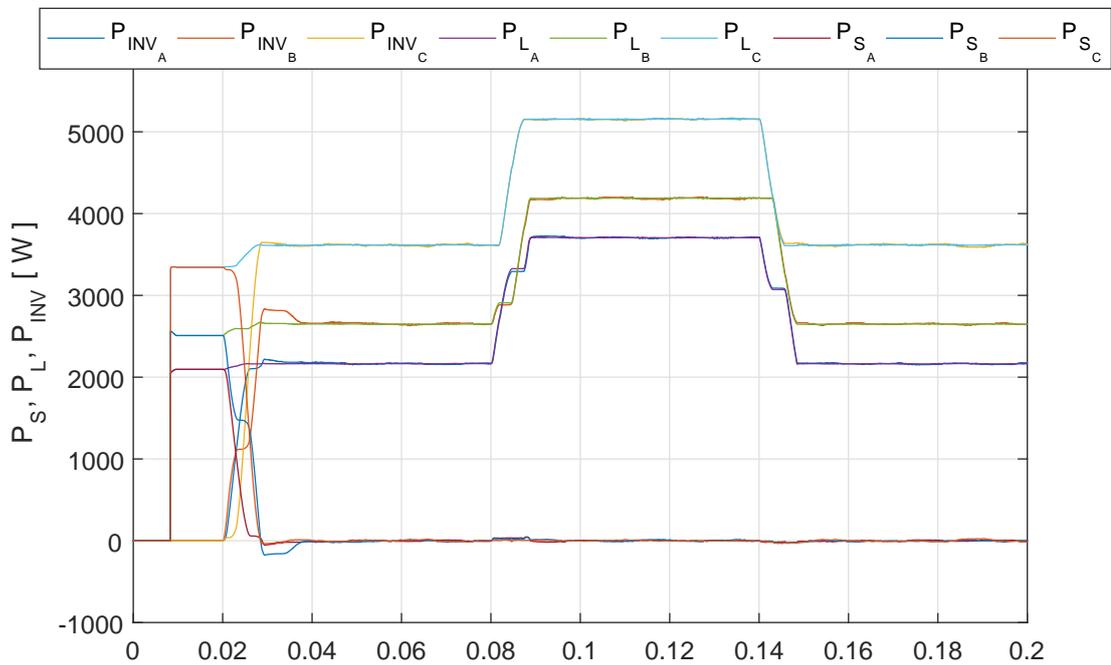


Figura 4.65: Potências nas saídas do inversor (P_{INV}), na carga (P_L) e na rede CA (P_S).

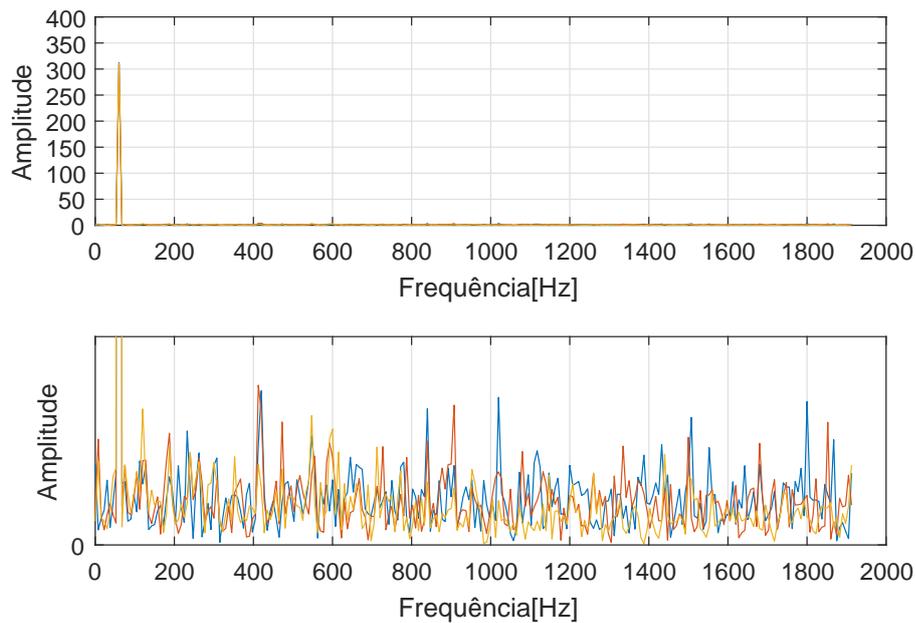


Figura 4.66: *FFT das tensões.*

4.2.4 Caso 6

No caso 6 a carga linear é equilibrada e a carga não-linear sofre variações. Não há injeção de potência ativa na rede CA, ou seja, o inversor é acoplado ao PAC e injeta apenas potência para suprir as cargas conectadas a partir de $t = 0,02s$. A carga linear equilibrada ligada em estrela a quatro fios em paralelo com a carga não linear, que é acrescida no instante $t = 0,08s$ e em $t = 0,14s$ é reduzida ao valor inicial. Entre as figuras 4.67 e 4.75 são exibidos os gráficos relacionados ao caso 6.

Sabendo que a carga é equilibrada, observa-se na figura 4.67 as formas de onda de correntes com amplitudes pertinentes ao tipo de carga acoplada às fases. Na figura 4.68 é possível observar a corrente que flui pela rede CA, neste caso a corrente tem valor próximo a zero, apresentando valores pequenos conforme pode ser observado.

A figura 4.69 apresenta a corrente injetada pelo inversor no PAC, em virtude de estar alimentando a carga as correntes injetadas pelo inversor e as correntes na carga apresentam valores próximos entre si.

Na figura 4.70 é apresentada a referência de corrente a ser observada na rede CA. É importante observar a amplitude do sinal apresentado nesta figura, tais valores se devem à injeção nula de potência na rede CA.

Na figura 4.71 podem ser observadas as correntes na carga e no inversor sobrepostas, juntamente com a corrente na rede CA e a referência para a corrente na rede CA. As duas últimas foram minimizadas devido ao inversor estar fornecendo potência de forma integral às cargas acopladas. É notável um ruído devido ao controlador e ao

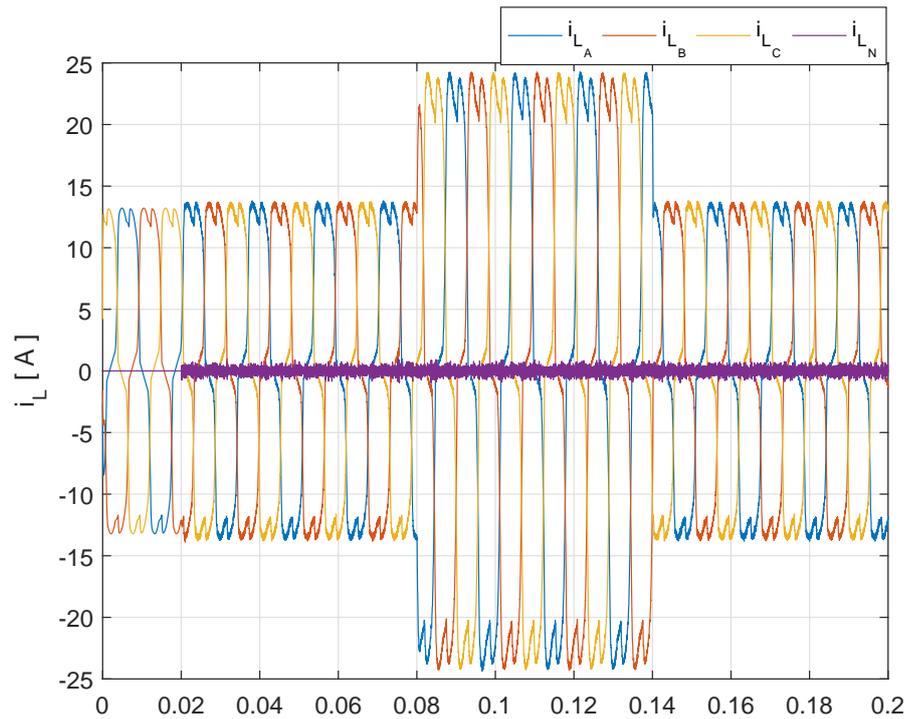


Figura 4.67: Correntes na carga (i_L).

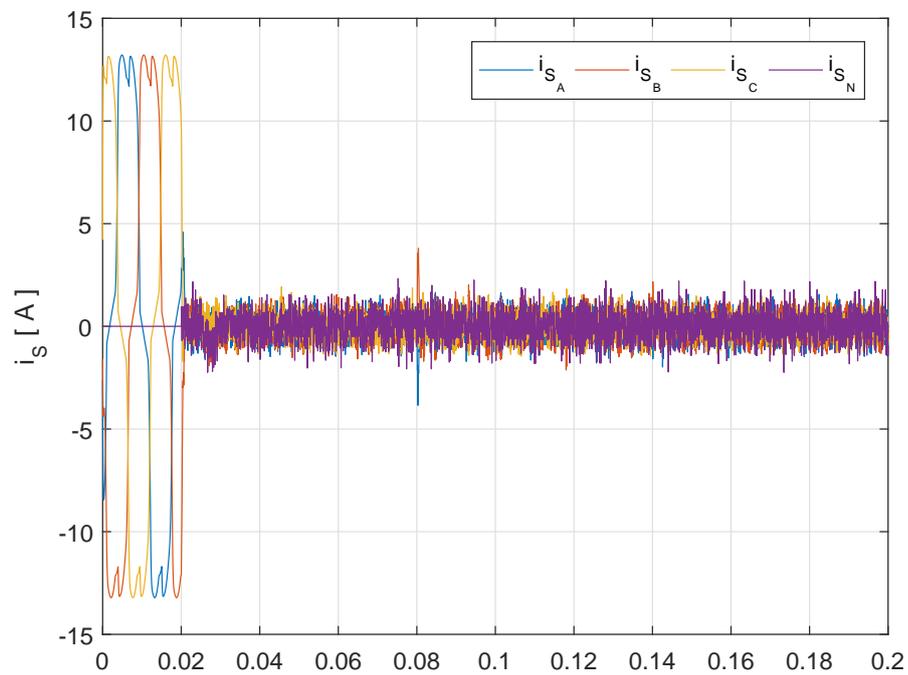


Figura 4.68: Correntes fornecidas pela fonte (i_s).

chaveamento.

As formas de ondas das potências no inversor, figura 4.72, na carga, figura 4.73, e na rede CA, figura 4.74, podem ser observadas também na figura 4.75, que apresenta todas

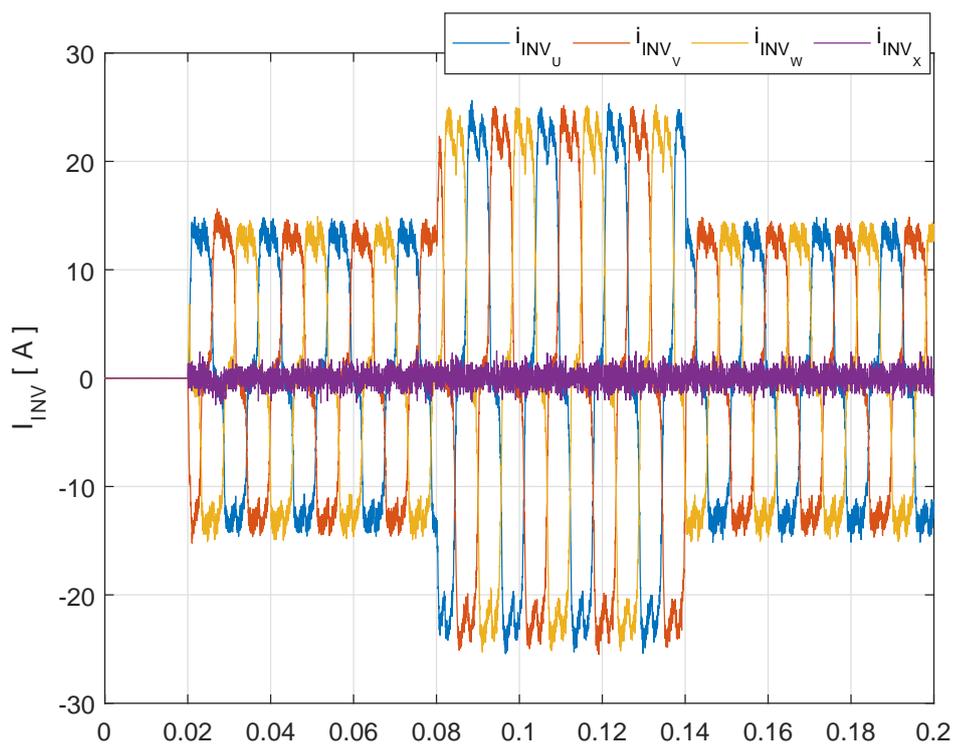


Figura 4.69: Correntes injetadas pelo inversor no PAC (i_{INV}).

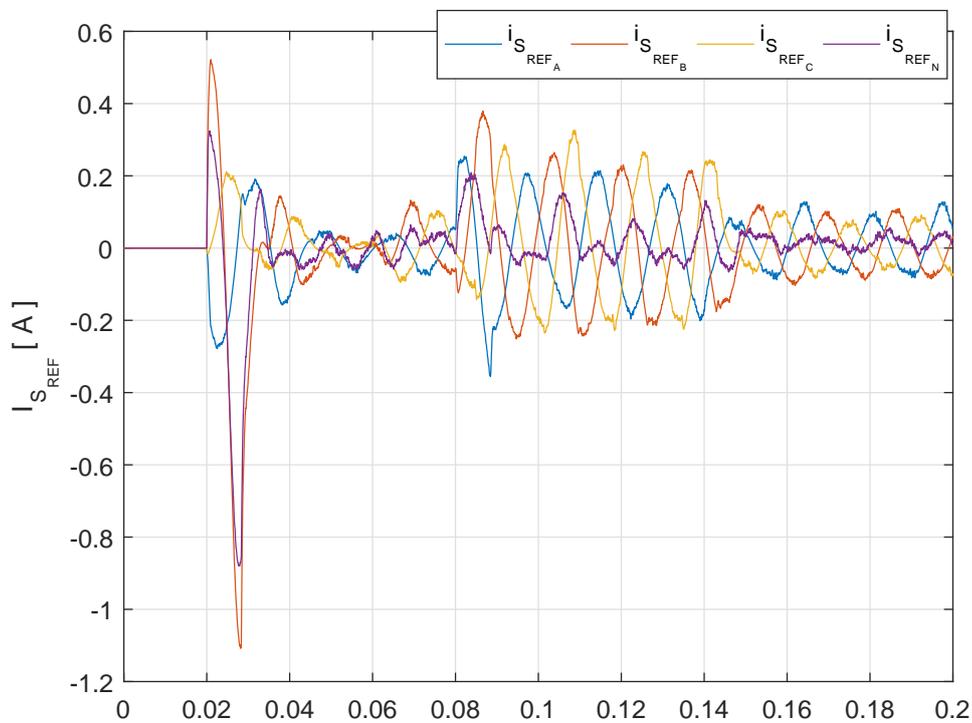


Figura 4.70: Referências para as correntes na fonte (i_{SREF}).

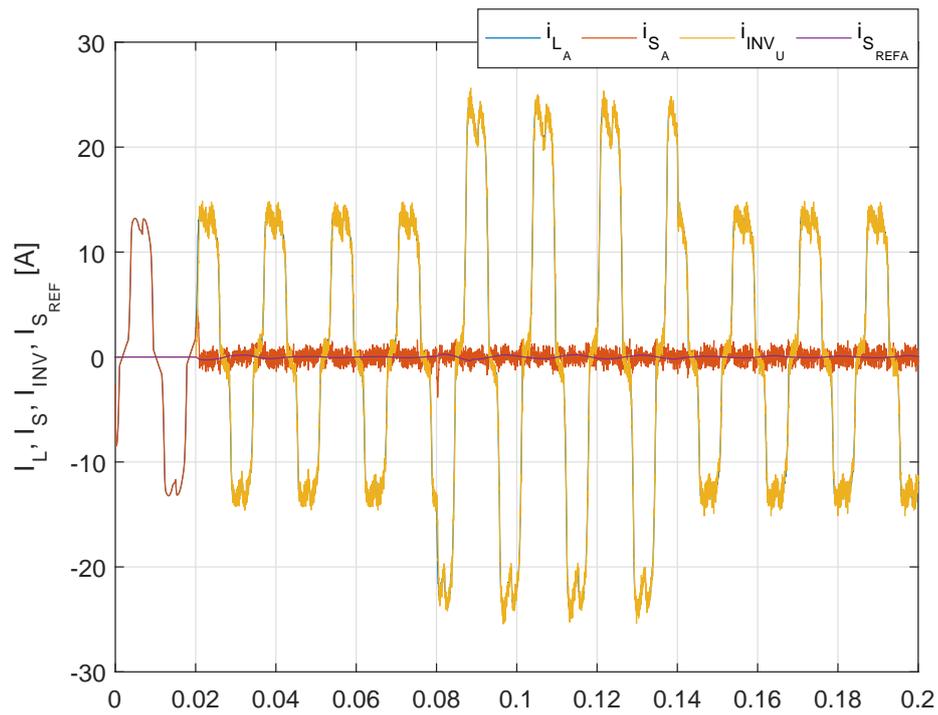


Figura 4.71: Correntes na fase A para a carga (i_L), para a fonte (i_S), na saída do inversor (i_{INV}) e referência de corrente para a fonte (i_{SREF}) no ramo U.

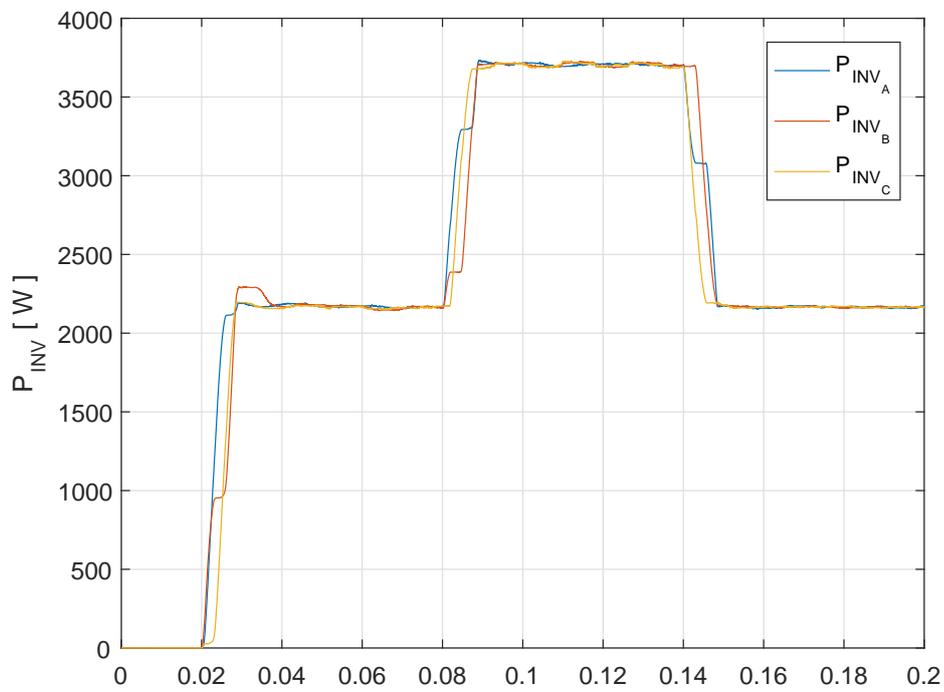


Figura 4.72: Potências nas saídas do inversor (P_{INV}).

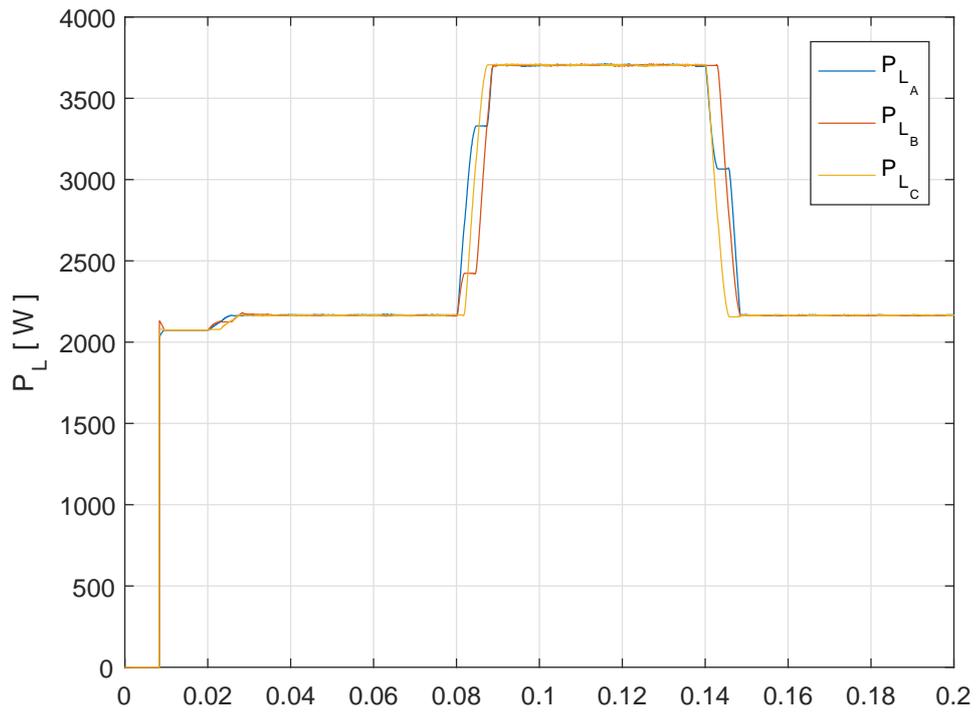


Figura 4.73: Potências na carga (P_L).

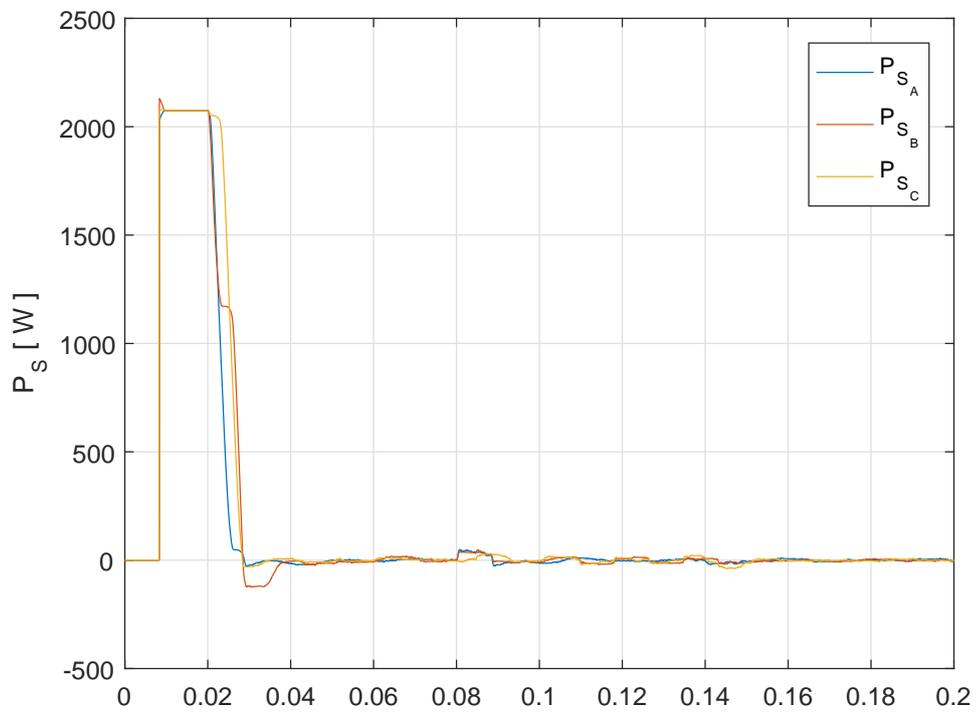


Figura 4.74: Potências na rede CA (P_S).

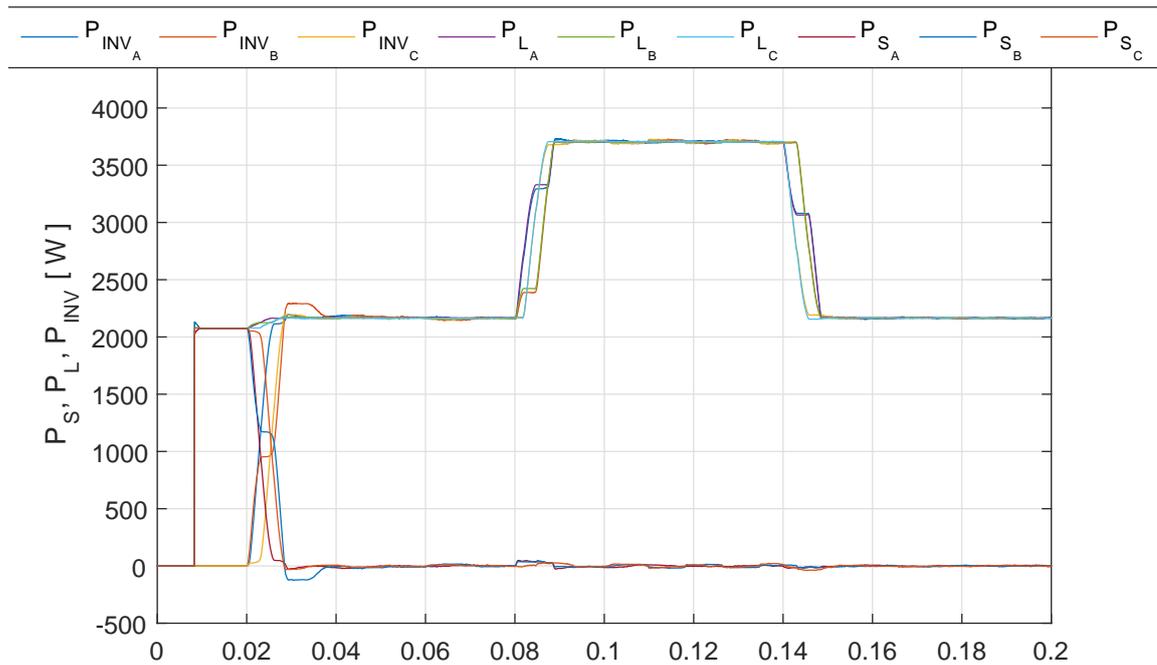


Figura 4.75: Potências nas saídas do inversor (P_{INV}), na carga (P_L), e na rede CA (P_S).

as potências em um mesmo plano cartesiano para melhor visualização das grandezas em questão. A potência do inversor e da carga se sobrepõem fase a fase, enquanto a potência média na rede CA é nula a partir do acoplamento do inversor ao PAC.

O fator de potência na rede CA não é apresentado devido à potência injetada na rede CA ser próximo do valor nulo, desta forma e de acordo com a equação (4-3), o fator de potência referente à corrente na rede CA é desconsiderado.

A partir da FFT apresentada na figura 4.76 e de (4-1), podem ser calculadas as DHTs das tensões para as três fases. São elas: $DHT_{V_A} = 3,57\%$, $DHT_{V_B} = 3,49\%$ e $DHT_{V_C} = 3,50\%$.

Para o cálculo da DHT das tensões foram utilizados dados em regime permanente do sistema, ou seja, após conexão do inversor e após decorrido o período transitório do mesmo. Foram consideradas para os cálculos as componentes harmônicas até a 31ª ordem.

Ao observar os resultados da simulação do inversor trifásico a quatro braços para a carga equilibrada e com variação da carga não-linear pode-se destacar que o conjunto controlador e inversor satisfazem os objetivos estabelecidos com eficácia. Assim, o inversor trifásico a quatro braços mantém o equilíbrio entre as fases na rede CA e alimenta as cargas acopladas.

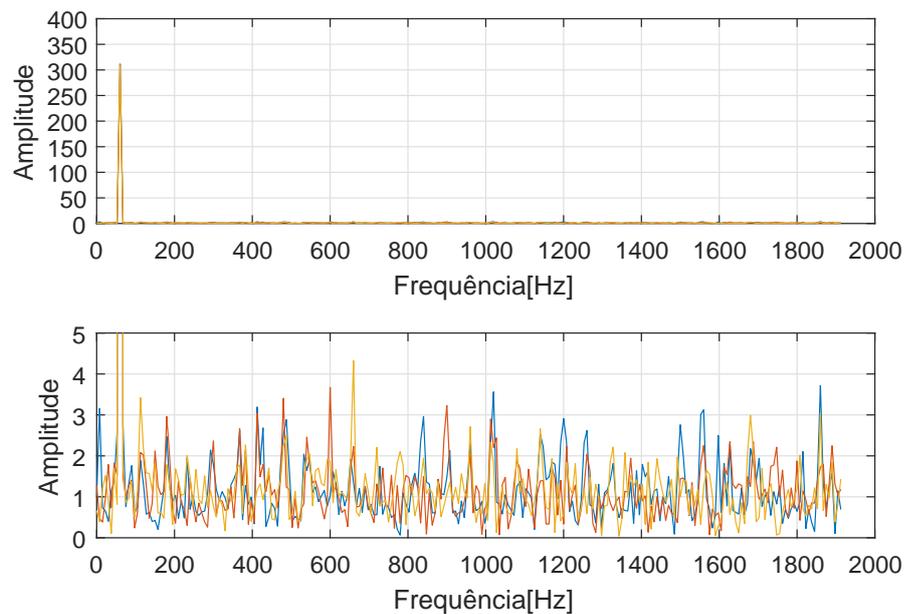


Figura 4.76: *FFT das tensões.*

4.3 Análise de Sensibilidade para Parâmetros R e L ao inversor

Nesta seção são apresentadas duas análises de sensibilidade obtidas para o modelo do inversor trifásico a quatro braços sendo que nas simulações foram utilizadas variações dos parâmetros R_{INV} e L_{INV} de modo que seja possível considerar certa faixa de tolerância construtiva para os componentes em questão a partir dos valores padrões calculados para os componentes. É importante salientar que a variação dos parâmetros foi realizada apenas no modelo do circuito elétrico, ou seja, o modelo matemático já obtido pelo controlador não foi alterado. Assim é possível verificar a margem de variação aceitável. Quanto aos demais parâmetros, foram mantidos os mesmos.

Para estabelecer um padrão para os casos que são apresentados nesta seção, em ambos os casos as cargas lineares são equilibradas e as não-lineares tem variação no decorrer da simulação, assim como nas simulações apresentadas nas seções 4.1 e 4.2, ou seja, no instante $t = 0,08s$ a carga não-linear é acrescida e no instante $t = 0,14s$ a carga não-linear é reduzida ao valor inicial. Os valores utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 4.3

Desta forma, os casos são apresentados de acordo com os itens a seguir:

- Caso L: Variação de L_{INV} .
- Caso R: Variação de R_{INV} .

Tabela 4.3: *Dados utilizados nas simulações referentes à avaliação de tolerância dos parâmetros.*

Dados	Valores
V_{dc}	$380 * \sqrt{2} * 1,3 V$
V_{PAC}	$220 / 380 V$
$R_{INV\ Caso L_{[U,V,W,X]}}$	$0,05 \Omega$
$L_{INV\ Caso L_{[U,V,W,X]}}$	$3 mH, 6 mH, 9 mH, 11,5 mH, 11,75 mH$ e $12 mH$
$R_{INV\ Caso R_{[U,V,W,X]}}$	$0,05 \Omega, 0,1 \Omega, 0,5 \Omega, 1 \Omega, 1,5 \Omega$ e 2Ω
$L_{INV\ Caso R_{[U,V,W,X]}}$	$6 mH$
$R_{S_{[A,B,C,N]}}$	$0,411 \Omega$
$L_{S_{[A,B,C,N]}}$	$0,411 mH$
$R_{L_{[A,B,C]}}$	100Ω
$L_{L_{[A,B,C]}}$	$3 mH$
$P_{Injetada\ por\ fase}$	$5 kW$
$C_{Carganao-linear\ constante}$	$1 \mu F$
$R_1\ Carganao-linear\ constante$	50Ω
$R_2\ Carganao-linear\ variavel$	50Ω

4.3.1 Avaliação de Sensibilidade do Indutor L_{INV}

No presente caso é apresentada a variação de L_{INV} no intervalo de 16,6% a 200% do valor padrão utilizado nas simulações anteriormente apresentadas, ou seja, L_{INV} é variado de $1 mH$ a $12 mH$. Os gráficos pertinentes são apresentados a partir da figura 4.77 até a figura 4.88.

Na figura 4.77 são apresentadas as tensões no PAC para a fase A em três simulações, sendo estas as tensões correspondentes às indutâncias $L_{INV} = 3 mH$, $L_{INV} = 6 mH$ e $L_{INV} = 12 mH$, respectivamente. Como é observado, a de menor indutância apresenta maiores variações enquanto a de maior indutância apresenta menores níveis de ruídos no sinal das tensões, tal fato se deve ao efeito de filtragem do sinal realizado pelo indutor, entretanto, quão maior o filtro indutivo, maior a possibilidade de atraso da corrente elétrica na rede CA.

Sabendo que a carga é equilibrada, observa-se na figura 4.78 as formas de onda das correntes com amplitudes pertinentes ao tipo de carga acoplada às fases. Apesar da diversidade de dados nesta figura, eles se sobrepõem por corresponderem à carga, apenas.

Na figura 4.79 é possível observar a corrente que flui pela rede CA. Devido à variação da indutância passada pelo controlador a referência de corrente extrapola a capacidade de chaveamento do inversor, e por isso é apresentado o seguinte resultado para ($L_{INV} = 12 mH$).

A figura 4.80 apresenta a corrente injetada pelo inversor no PAC. Assim como na figura 4.79 a corrente de saída do inversor, ao utilizar $L_{INV} = 12 mH$, deixa de satisfazer

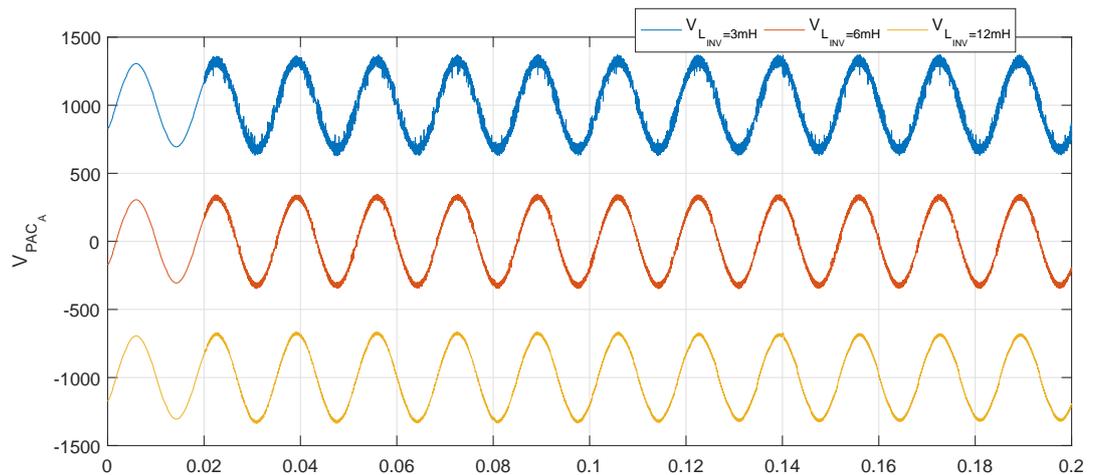


Figura 4.77: Tensões na fase A para diferentes valores de L_{INV} .

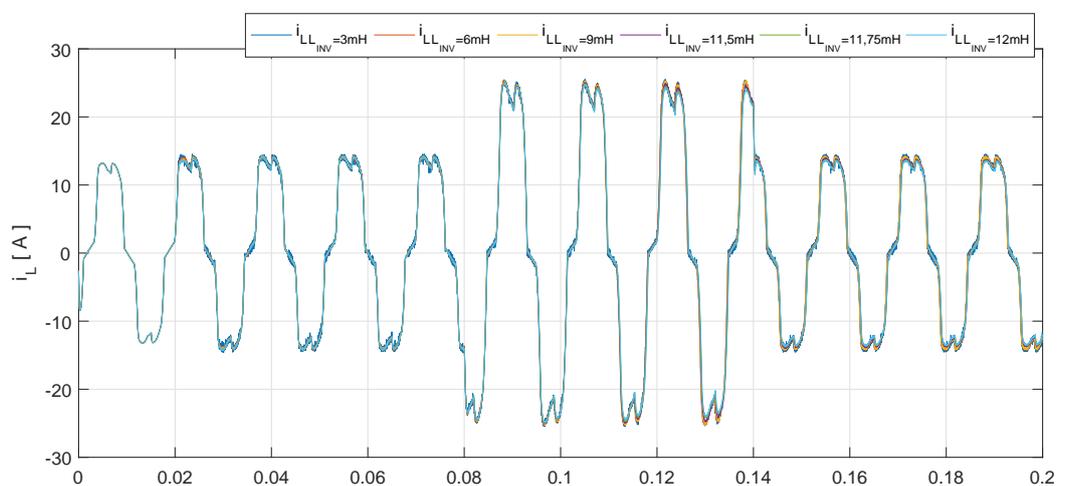


Figura 4.78: Corrente na carga (i_L).

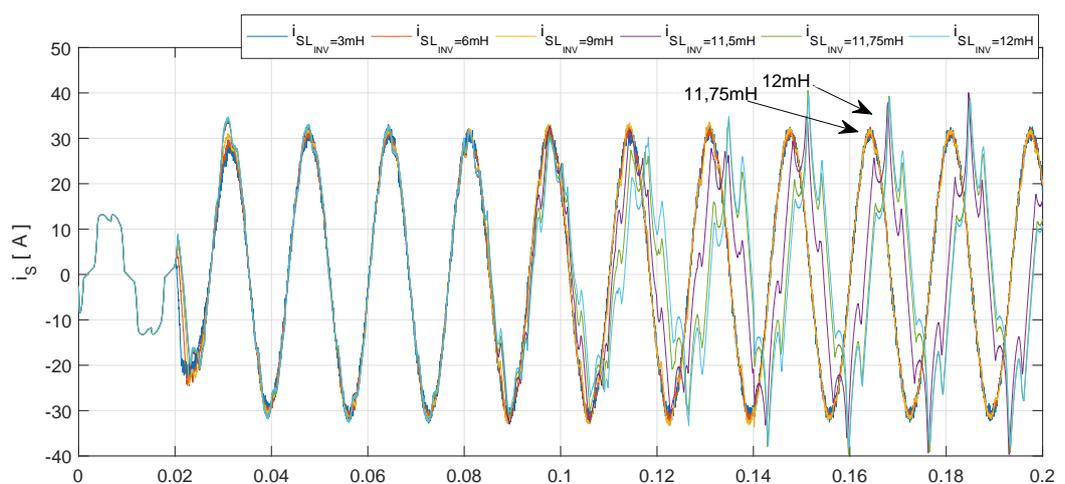


Figura 4.79: Correntes fornecidas pela fase A da fonte (i_s) para as indutâncias aplicadas.

o propósito inicial.

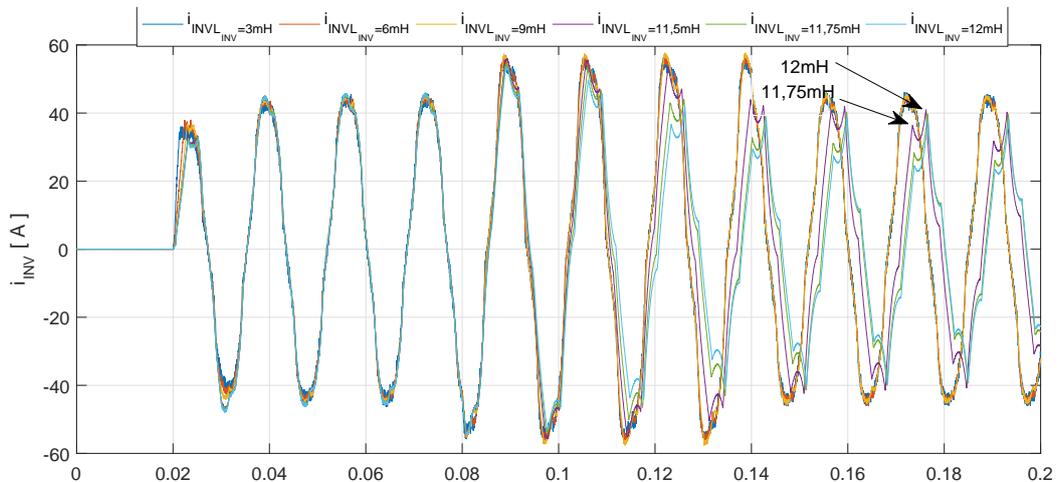


Figura 4.80: Corrente injetada no PAC pelo inversor (i_{INV}).

Na figura 4.81 é apresentada a referência de corrente a ser observada na rede CA. Para $L_{INV} = 12mH$ a referência apresenta-se instável.

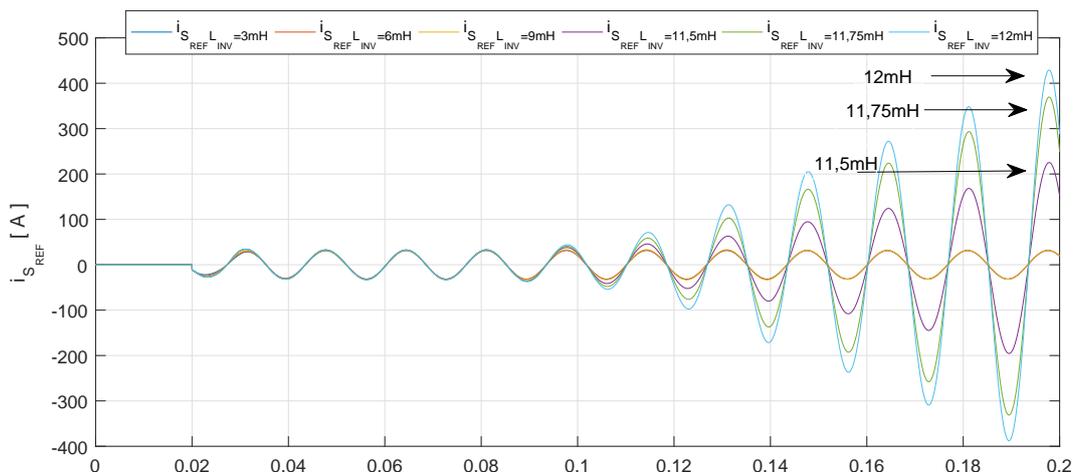


Figura 4.81: Corrente de referência a ser obtida na fonte ($i_{S_{REF}}$).

Na figura 4.82 podem ser observadas curvas que representam as diferenças obtidas entre as correntes na rede CA (i_S) e os valores esperados de corrente na rede CA ($i_{S_{REF}}$). São apresentadas as curvas para vários valores de indutâncias utilizados no estudo de sensibilidade do sistema, os valores e escalas estão apresentados na figura.

Como pode ser observado na figura 4.83, as potências injetadas pelo inversor são da ordem de $8,75kW$ por fase, entretanto, com a variação de L_{INV} o controlador perde o sincronismo com a variação da carga não-linear.

Para as cargas, a potência consumida não é afetada. Isto pode ser observado na figura 4.84. Para a rede CA, ocorre o mesmo que no inversor, devido a perda de sincronismo do inversor a potência na rede CA é desestabilizada, conforme figura 4.85.

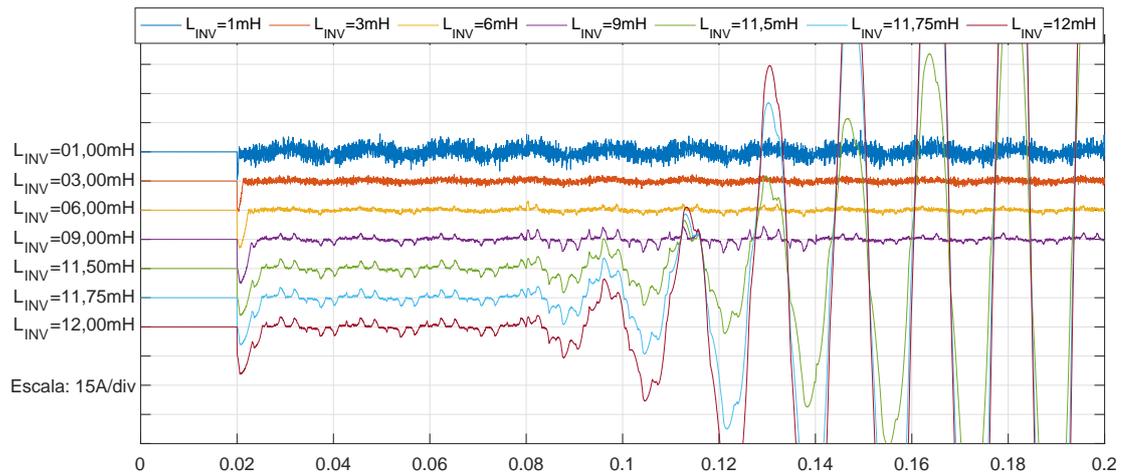


Figura 4.82: Diferença obtida entre a corrente na rede CA i_s e a referência para a corrente na rede CA i_{sREF} (Função custo (g)).

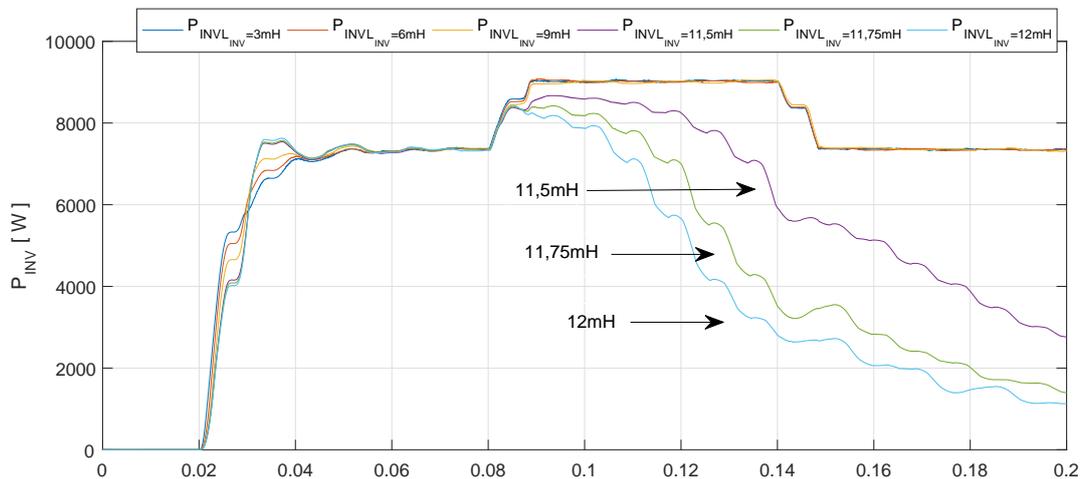


Figura 4.83: Potências na saída do inversor (P_{INV}).

O FP na figura 4.86 desestabiliza para os casos $L_{INV} = 11,50mH$, $L_{INV} = 11,75mH$ e $L_{INV} = 12,00mH$ a partir do instante de variação da carga. Para os demais valores o FP permaneceu com valores acima de 0,92, como é recomendado pela ANEEL conforme consta no módulo 8 do PRODIST [8].

A figura 4.87 apresenta as FFTs obtidas para a tensão com as indutâncias simuladas, sendo que as DHTs obtidas a partir destes dados estão apresentadas na tabela 4.4.

Com o aumento dos valores das indutâncias é observada uma redução nos valores da DHT para as tensões, assim como a redução do ruído observada em 4.82, entretanto, o sistema acoplado não é capaz de atender à potência necessária a partir de $L_{INV} = 11,5mH$ como já apresentado anteriormente.

A figura 4.88 apresenta as FFTs obtidas para as correntes com os valores das

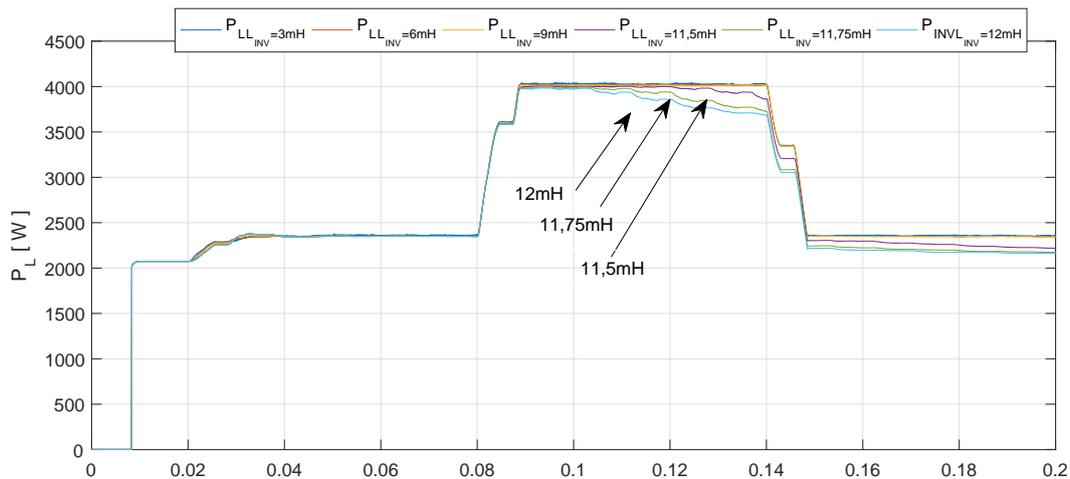


Figura 4.84: Potências na carga (P_L).

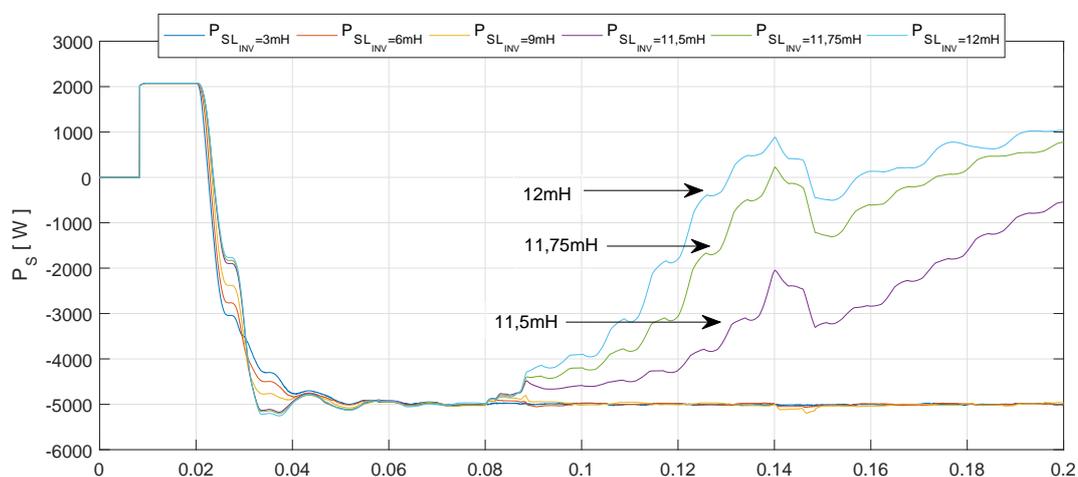


Figura 4.85: Potências na rede CA (P_S).

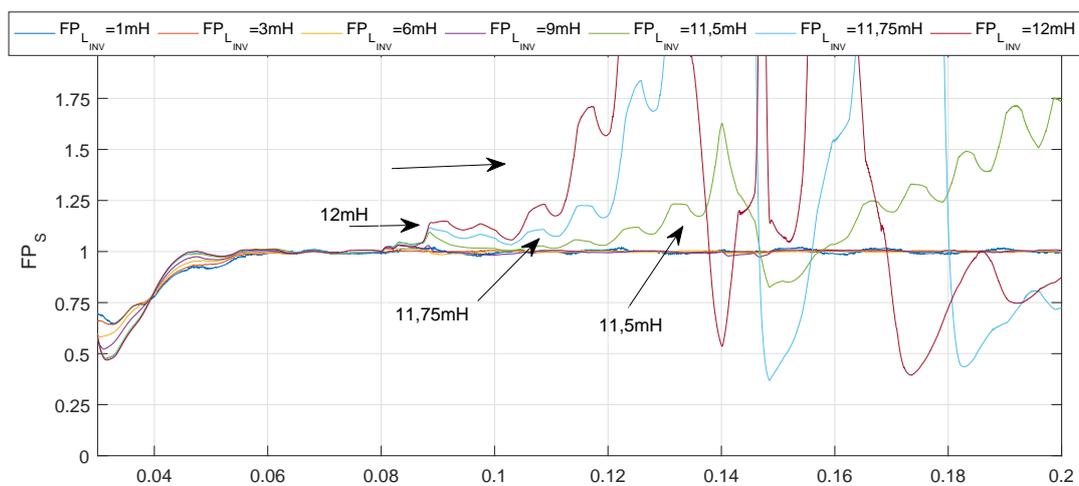


Figura 4.86: Fator de Potência (FP).

Tabela 4.4: Distorção harmônica total (DHT) das tensões perante a variação da indutância L_{INV} .

L_{INV}	$DHT_V(\%)$
01,00mH	16,52
03,00mH	06,23
06,00mH	02,77
09,00mH	01,87
11,50mH	01,76
11,75mH	01,84
12,00mH	02,08

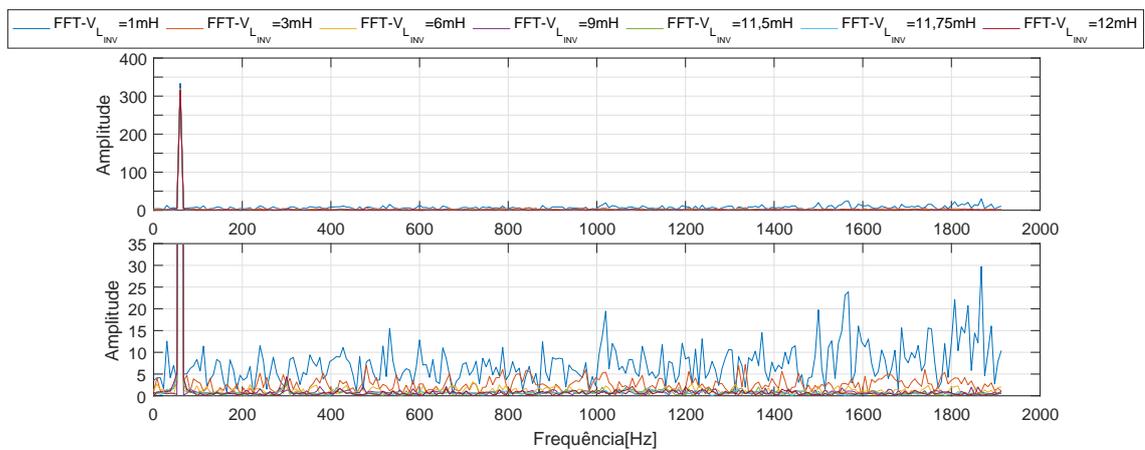


Figura 4.87: FFT das tensões.

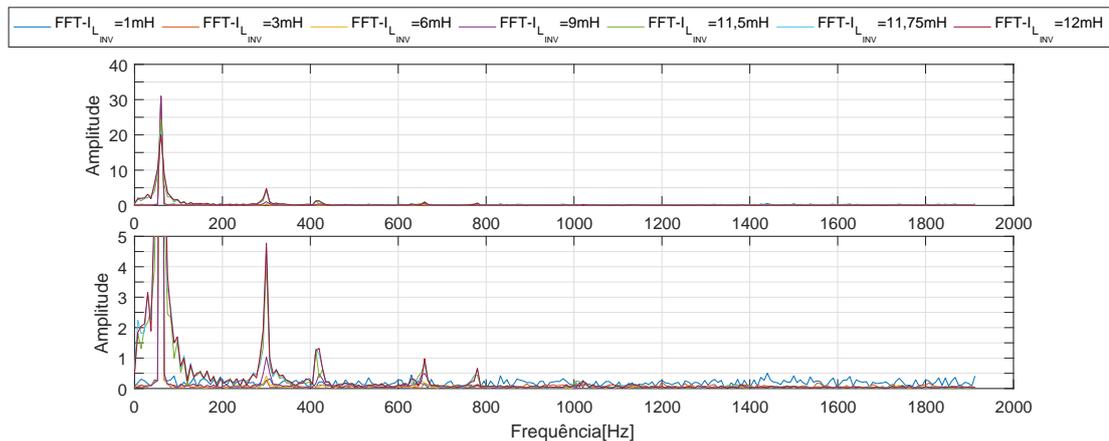


Figura 4.88: FFT das correntes.

indutâncias simuladas, sendo que as DHTs obtidas a partir destes dados são apresentadas na tabela 4.5.

Após o acoplamento do inversor ao PAC a DHT das correntes apresenta valores abaixo de 5% para indutâncias (L_{INV}) entre 1mH e 9mH, como observado. Tais valores podem ser considerados como limites observados para a sensibilidade do sistema.

Tabela 4.5: Distorção harmônica total (DHT) das correntes perante a variação da indutância L_{INV} .

L_{INV}	$DHT_I(\%)$
01,00mH	04,45
03,00mH	02,07
06,00mH	01,83
09,00mH	04,20
11,50mH	17,64
11,75mH	23,42
12,00mH	25,64

A análise de sensibilidade do parâmetro construtivo L_{INV} permite observar valores limites para caracterização construtiva do inversor. Ao analisar os resultados apresentados nesta seção é possível observar que o aumento do indutor pode ocasionar a perda de sincronia do sistema enquanto a redução da indutância apresentou crescimento da DHT das correntes. Como característica construtiva deve-se projetar, de acordo com os resultados obtidos, um indutor cuja indutância esteja no intervalo entre 50% do valor padrão ($L_{INV} = 3mH$) e até 50% a mais ($L_{INV} = 9mH$).

4.3.2 Avaliação de Sensibilidade do Resistor R_{INV}

Para este caso são apresentadas as variações já mencionadas na Tabela 4.3. Os gráficos pertinentes são apresentados a partir da figura 4.89 até a figura 4.100.

Na figura 4.89 são apresentadas as tensões no PAC para a fase A em três simulações, sendo estas as tensões correspondentes às resistências $R_{INV} = 0,05\Omega$, $R_{INV} = 0,5\Omega$ e $R_{INV} = 2\Omega$, respectivamente. Como é observado, as três formas de onda são semelhantes, isso se deve ao fato de que a resistência não atrasa ou adianta a corrente em relação à tensão, na verdade, atenuam oscilações de comutações.

Sabendo que a carga é equilibrada, observa-se na figura 4.90 as formas de onda de correntes com amplitudes pertinentes ao tipo de carga acoplada às fases.

Na figura 4.91 é possível observar a corrente fornecida pela rede CA ao PAC. Observa-se que para $R_{INV} = 2\Omega$ a corrente na rede CA (i_S) é diferente da esperada desde o acoplamento do inversor ao PAC ($t = 0,02s$).

Assim como apresentado para a corrente fornecida pela rede CA (i_S), figura 4.91, a corrente injetada no PAC pelo inversor (i_{INV}), figura 4.92, não é correspondente à corrente de referência calculada pelo controlador para a rede CA (i_{SREF}), figura 4.93, quando $R_{INV} = 1,5\Omega$ e $R_{INV} = 2\Omega$. Isso se deve à queda de tensão ocorrida nos braços de saída do inversor devido a magnitude de R_{INV} , cerca de trinta vezes o valor considerado padrão, $R_{INV} = 0,05\Omega$.

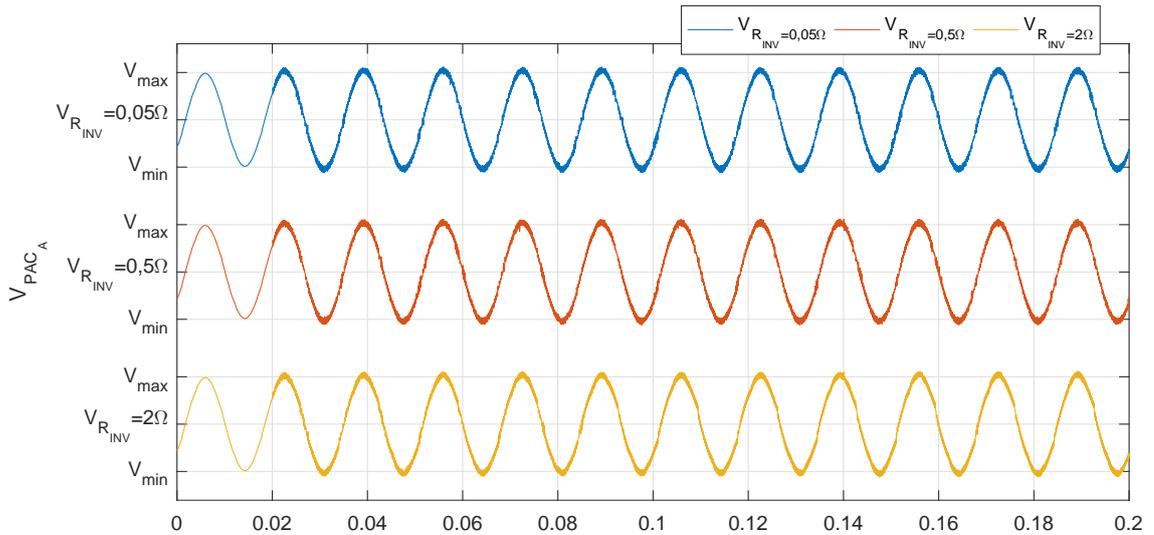


Figura 4.89: Tensões na fase A para diferentes valores de R_{INV} .

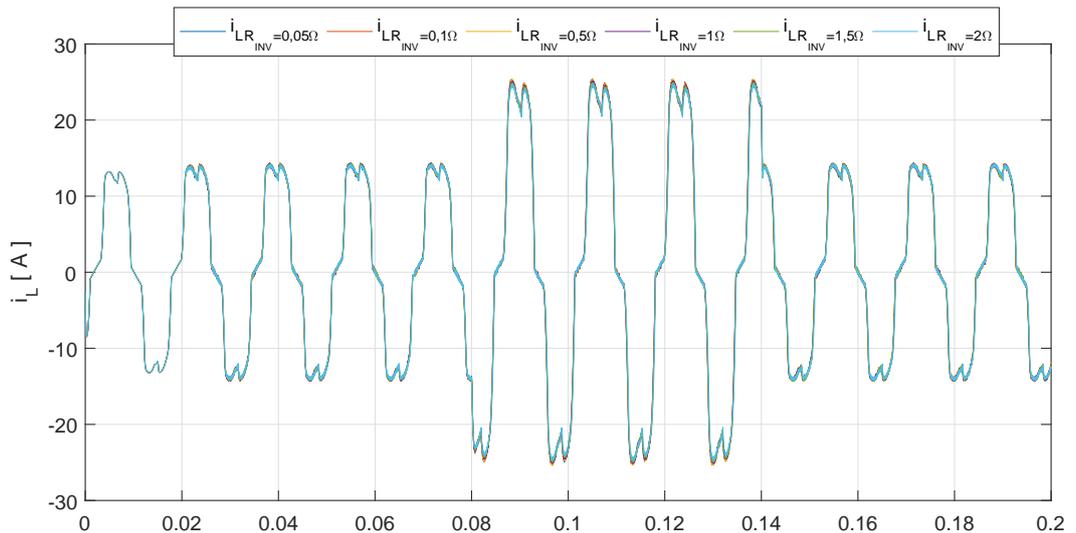


Figura 4.90: Corrente na carga (i_L).

A figura 4.94 apresenta de maneira simples as formas de onda e magnitude do erro entre i_S e $i_{S_{REF}}$ para cada valor de R_{INV} considerado, ou seja, o erro entre a corrente na rede CA (i_S) e a expectativa de corrente na rede CA ($i_{S_{REF}}$) na avaliação de sensibilidade do parâmetro R_{INV} . Verifica-se que de acordo com o aumento da resistência elétrica a diferença entre as correntes chega a atingir até 65A ($R_{INV} = 2\Omega$), o que acaba provocando uma queda de tensão e conseqüentemente perda de potência ativa no sistema, como observado nos gráficos das potências, figuras 4.95, 4.96 e 4.97.

A figura 4.95 apresenta as potências injetadas no PAC pelo inversor. É percebido um atraso na resposta do inversor nos instantes em que a carga é aumentada e reduzida.

A potência consumida pela carga é apresentada na figura 4.96 e segue os parâmetros das potências nas cargas obtidos nas simulações apresentadas anteriormente.

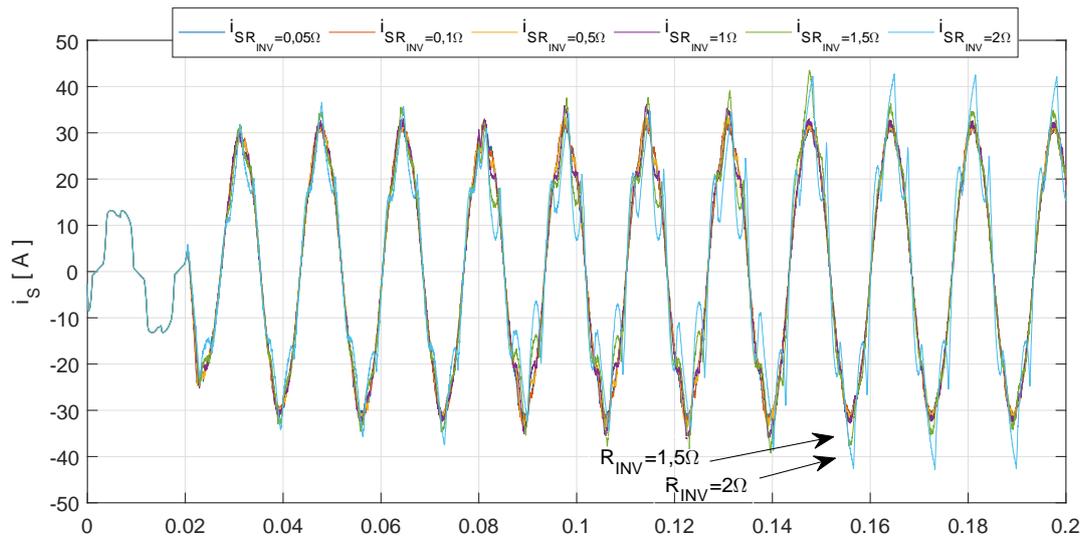


Figura 4.91: Corrente fornecida pela rede CA (i_s).

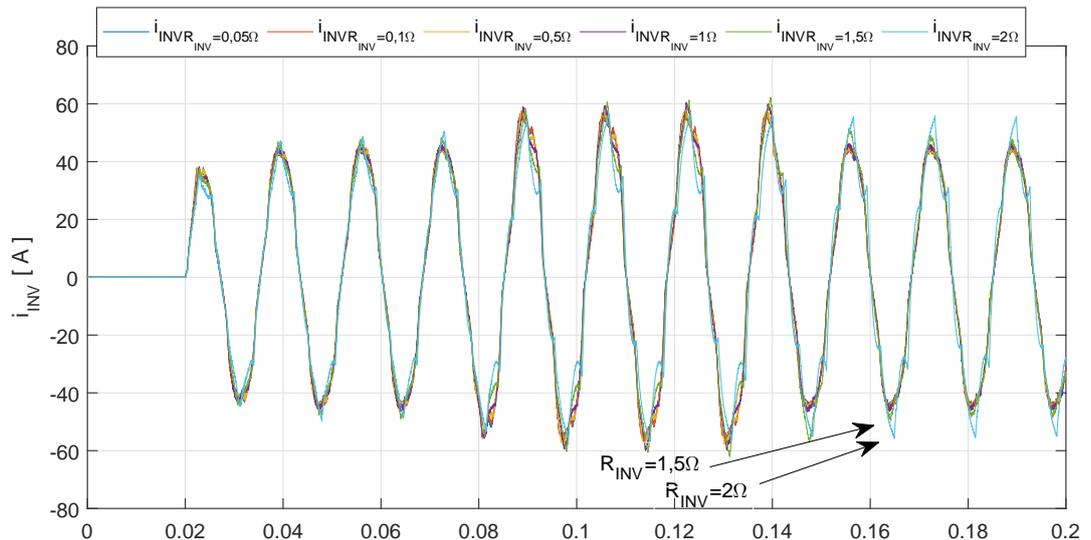


Figura 4.92: Corrente injetada no PAC pelo inversor (i_{INV}).

A potência na rede CA é apresentada na figura 4.97 e, pelos mesmos motivos que P_{INV} apresenta perdas.

O fator de potência (FP) na figura 4.98 se aproxima do valor unitário, entretanto, para valores de $R_{INV} > 1,00\Omega$ a resistência do filtro na saída do inversor provoca uma queda de tensão maior que a esperada pelo sistema, gerando assim uma falha para conexão com o PAC.

A figura 4.99 apresenta as FFTs obtidas para a tensão com as resistências simuladas, sendo que as DHTs obtidas a partir destes dados são apresentadas na tabela 4.6.

A partir destes dados pode ser afirmado que a DHT das tensões permanece

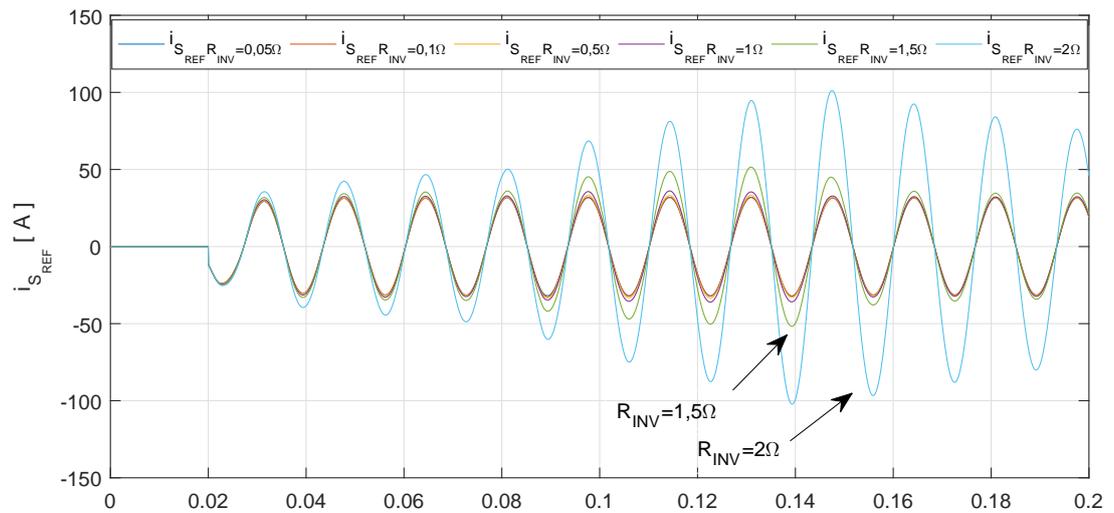


Figura 4.93: Corrente de referência a ser obtida na fonte ($i_{S_{REF}}$).

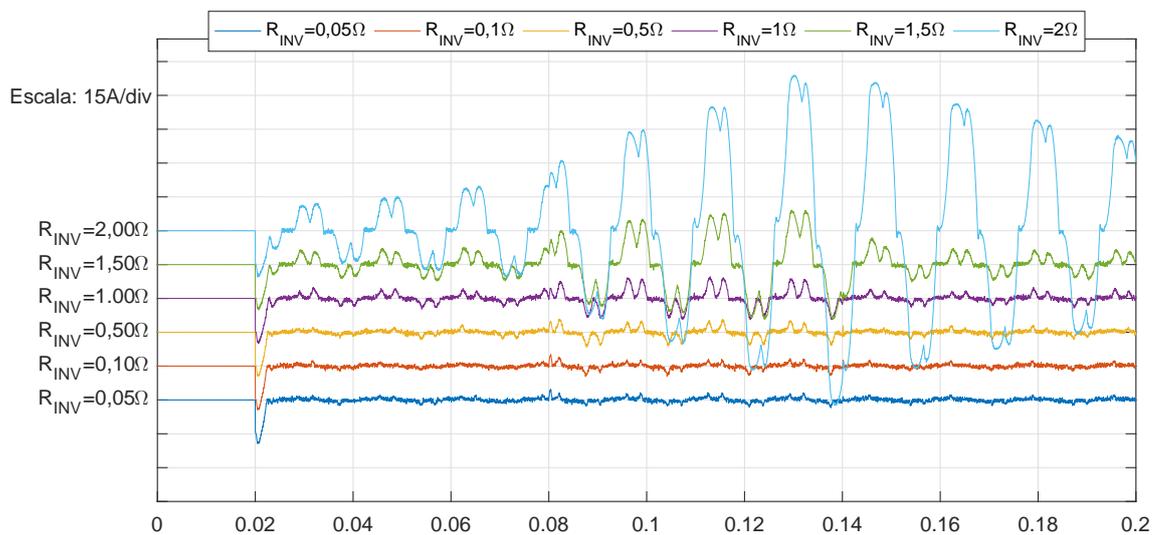


Figura 4.94: Diferença obtida entre a corrente na rede CA i_S e a referência para a corrente na rede CA $i_{S_{REF}}$.

Tabela 4.6: Distorção harmônica total (DHT) das tensões perante a variação da resistência R_{INV} .

R_{INV}	$DHT_V(\%)$
0,05Ω	02,77
0,10Ω	02,35
0,50Ω	02,43
1,00Ω	02,52
1,50Ω	02,03
2,00Ω	03,14

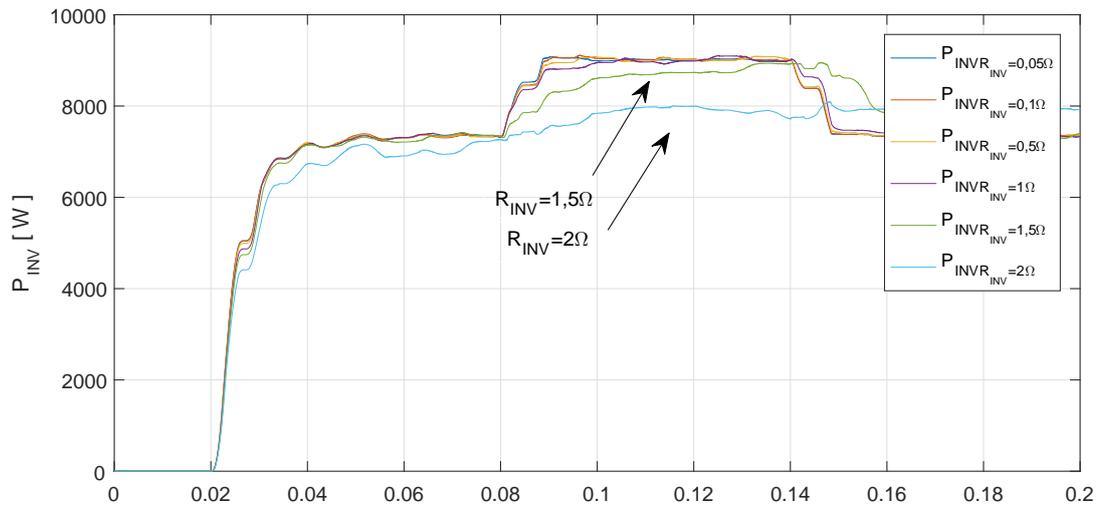


Figura 4.95: Potências nas saídas do inversor (P_{INV}).

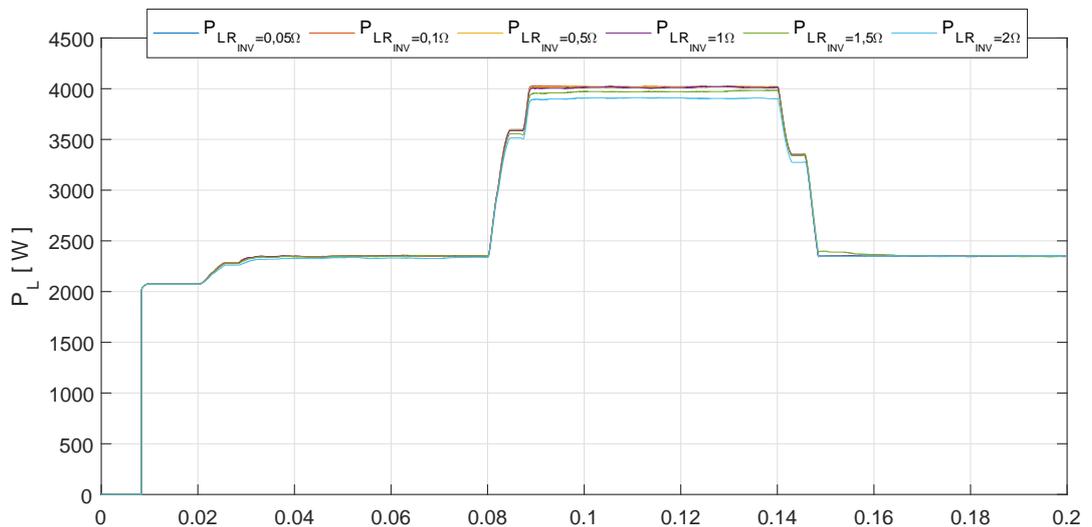


Figura 4.96: Potências na carga (P_L).

constante e abaixo de 5% para todos os valores de R_{INV} utilizados. Tal fato já havia sido superficialmente observado na figura 4.89.

A figura 4.100 apresenta as FFTs obtidas para as correntes com os valores das resistências simuladas, sendo que as DHTs obtidas a partir destes dados são apresentadas na tabela 4.7.

Após o acoplamento do inversor ao PAC a DHT das correntes apresenta valores abaixo de 5% para resistências (R_{INV}) simuladas que sejam menores que 1Ω, como observado e de acordo com a NTC-71 [38].

A análise de sensibilidade de R_{INV} permite considerar que o parâmetro R_{INV} apresentou influências quando variado por um limite maior que vinte vezes (20x) o padrão utilizado ($R_{INV} = 0,05\Omega$), de modo que a parte que apresentou maior prejuízo no sistema

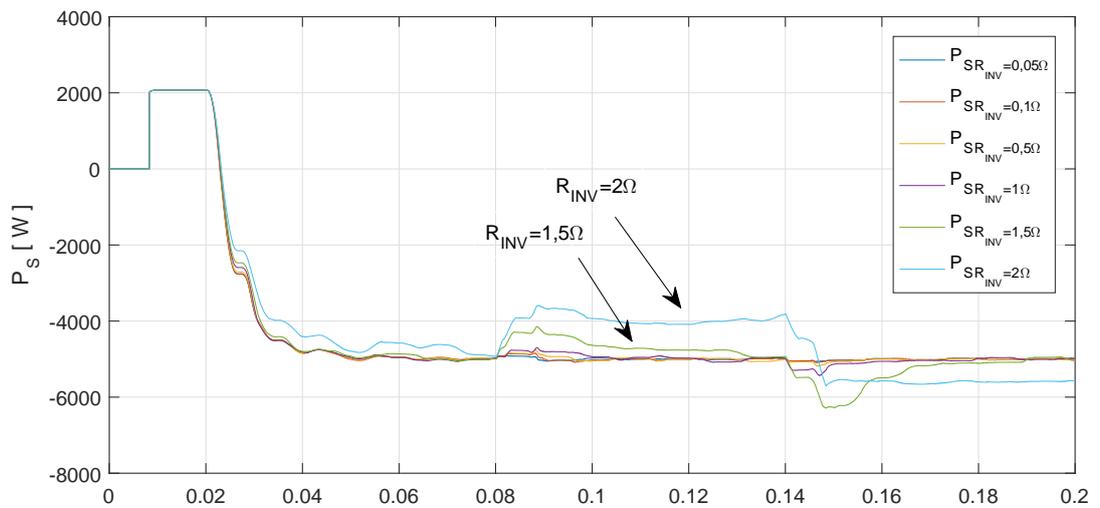


Figura 4.97: Potências na rede CA (P_S).

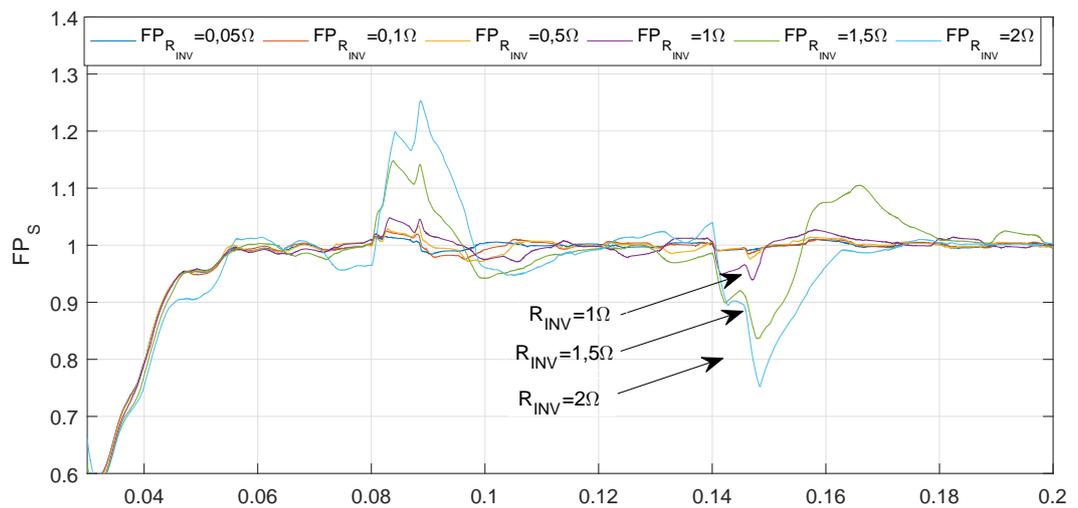


Figura 4.98: Fator de Potência (FP).

Tabela 4.7: Distorção harmônica total (DHT) das correntes perante a variação da resistência R_{INV} .

R_{INV}	$DHT_I(\%)$
0,05Ω	01,84
0,10Ω	01,97
0,50Ω	03,46
1,00Ω	06,14
1,50Ω	12,41
2,00Ω	28,76

foi a injeção de potência ativa do inversor no PAC devido à queda de tensão ocorrida nos ramos do inversor e, devido a esta ocorrência, o FP. Desta forma, pode-se considerar

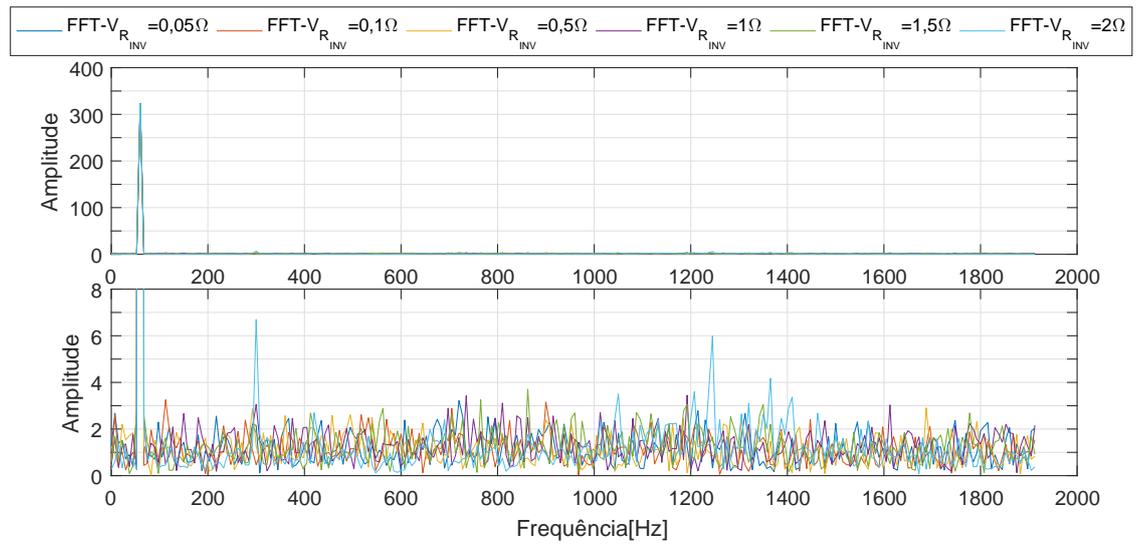


Figura 4.99: *FFT das tensões.*

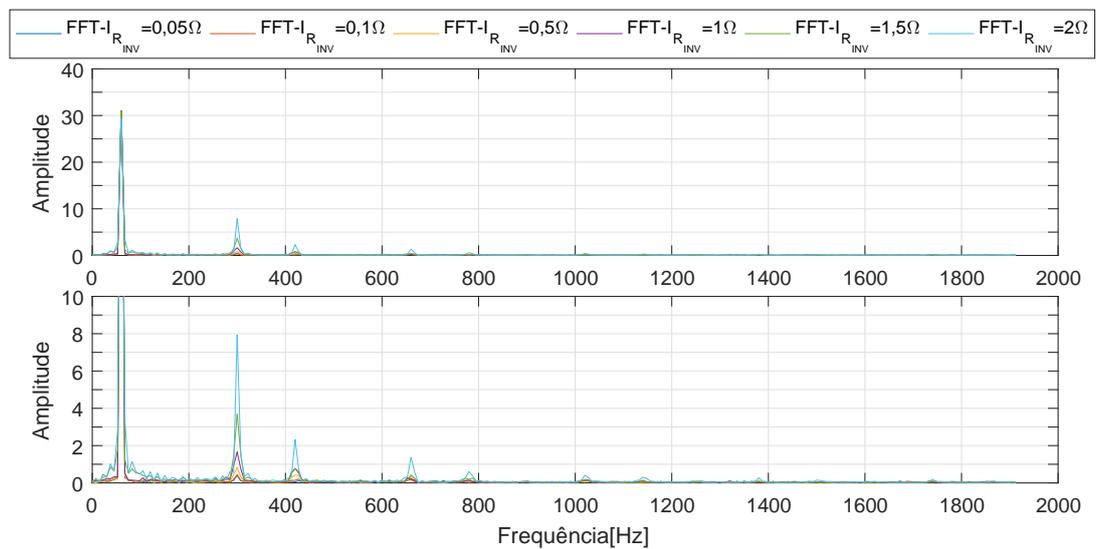


Figura 4.100: *FFT das correntes.*

que uma variação construtiva do parâmetro terá pequena influência no equacionamento do problema, tendo em vista que o projetista é consciente de que deve proporcionar uma resistência condizente com o problema e que esta possua pequenas variações, as quais são coerentes.

4.4 Conclusões Parciais

Neste capítulo foram abordados os estudos de casos para a topologia do inversor trifásico a quatro braços em situações com cargas equilibradas, com injeção de potência ativa na rede e variações dos parâmetros constritivos L_{INV} e R_{INV} .

Foi possível notar que há valores limites para a correta operação do inversor trifásico a quatro braços. São elas:

- $3mH < L_{INV} < 9mH$ e
- $0,05\Omega < R_{INV} < 1,0\Omega$.

Quanto aos limites encontrados, é possível que uma queda de tensão ocorrida no filtro ($R_{INV} + j\omega L_{INV}$) devido ao crescimento do valor da indutância ou resistência possa fazer com que a tensão CC que alimenta o inversor não seja suficiente para que o mesmo seja capaz de seguir a forma de onda de referência passada pelo controlador, figura 4.93, e por consequência disso, o mesmo apresente as formas de onda das correntes na rede CA e na saída do inversor indicadas nas figuras 4.91 e 4.92, respectivamente.

No capítulo seguinte serão apresentadas as conclusões gerais do trabalho bem como as sugestões para continuidade do mesmo.

Conclusões Finais

Conforme proposto, o objetivo principal estabelecido é a aplicação do método de controle baseado em modelo na operação do inversor trifásico a quatro braços alimentado por uma fonte de corrente contínua originada de um sistema fotovoltaico (FV). A qual, é tratada como uma tensão CC contínua e estável, vinda de um conversor CC/CC, caso seja necessário, que adequa a sua tensão de saída (conversor CC/CC) à entrada do inversor trifásico a quatro braços. Considera-se também como tensão de entrada para o inversor em estudo quaisquer métodos utilizados que apliquem na entrada do conversor tensão contínua conforme parâmetros propostos.

De acordo com o desenvolvimento deste trabalho foi observado que o MPC apresentou comportamento estável e robusto em definir uma sequência de chaveamento para o conversor CC/CA, mesmo em situações de variação nas cargas consideradas.

Para efeito de comparação também foram apresentadas a topologia do inversor trifásico em ponte completa e a sua modelagem matemática de forma anterior à apresentação do mesmo detalhamento referente ao modelo trifásico a quatro braços. As duas topologias foram comparadas, assim como suas modelagens matemáticas e as respostas obtidas para um mesmo sistema elétrico proposto. Notou-se que ao aplicar uma carga desbalanceada no sistema com o inversor trifásico a quatro braços o inversor foi capaz de estabilizar as correntes na rede CA, enquanto para o inversor trifásico em ponte completa ocorreram pequenas diferenças entre as correntes nas fases devido a ausência de chaveamento para o condutor neutro.

Também observou-se que o uso do inversor trifásico a quatro braços proporcionou o controle sobre o fluxo de corrente elétrica no condutor neutro da rede CA, além das características semelhantes ao inversor trifásico em ponte completa (por exemplo, o controle eficaz das correntes nas fases do sistema e a DHT obtida). Por essa razão, é possível concluir que a topologia trifásica a quatro braços é capaz de proporcionar melhores resultados que a topologia do inversor trifásico de onda completa (chaveamento de apenas nas três braços).

Notou-se que em ambas as topologias o método de controle discutido neste trabalho foi capaz de determinar a combinação mais adequada para o chaveamento do inversor

considerando o instante analisado e a previsão para comportamentos futuros das grandezas elétricas monitoradas. Além disso, a combinação mais adequada foi determinada a partir da minimização da função custo, conforme princípio de operação do método de controle escolhido.

Ao aplicar uma fonte controlada que apresente em sua saída tensão CC na faixa da tensão de entrada do inversor em estudo, o sistema proposto foi capaz de injetar potência ativa no PAC compartilhado com a rede CA. Dessa forma, a qualidade da energia elétrica (QEE) na rede de distribuição apresentou melhorias: correntes com formas de onda mais próximas das respectivas referências (redução de DHT), equilíbrio entre as fases ainda que as cargas sejam desequilibradas e correção do fator de potência.

Caso a tensão CC seja fornecida por um arranjo fotovoltaico pressupõe-se que as rotinas do seguidor do ponto de potência máxima (SPPM) mantenham esse valor de tensão na faixa considerada para operação do inversor. Caso existam variações nessa tensão de saída do arranjo FV (por motivos climáticos), espera-se que o controlador preditivo seja capaz de compensar esse desbalanço de tensão e de manter a injeção de corrente conforme os níveis de referência desejados. Tal análise pode ser compreendida como uma sugestão de continuidade deste trabalho.

Por fim, foi questionada a dependência do sistema proposto em relação a possíveis variações nos parâmetros de seu modelo matemático. Dessa forma fez-se uma análise da sensibilidade para o alcance dos objetivos do sistema frente às divergências percentuais dos parâmetros do indutor de acoplamento do inversor ao PAC (L_{INV} e R_{INV}). Tais divergências podem ser compreendidas como variações construtivas ou de interferências climáticas.

Com o desenvolvimento da avaliação de sensibilidade realizada foi possível verificar que a indutância (L_{INV}) é mais influente no funcionamento do inversor trifásico a quatro braços controlado pelo MPC do que a resistência do indutor (R_{INV}). Durante a análise de sensibilidade considerou-se uma variação percentual de $\pm 50\%$ para a indutância L_{INV} e um ganho de até vinte vezes ao valor estipulado padrão para a resistência R_{INV} . Tal análise foi detalhada na seção 4.3.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Ficam como sugestões para trabalhos futuros os seguintes tópicos:

- Estudo da influência e cálculo analítico do grau de sensibilidade do sistema a partir da função custo, considerando as possíveis variações e características dos elementos construtivos: $L_{INV} = L_{INV_0} + \Delta L_{INV}$ e $R_{INV} = R_{INV_0} + \Delta R_{INV}$ com possíveis valores limites supostos para averiguar o comportamento do sistema, Ex.: 60%, 70%, 75%. Com a finalidade de encontrar uma equação solução para esta peculiaridade.

- Análise da resposta do inversor trifásico a quatro braços considerando uma tensão CC de entrada fornecida por uma fonte primária de energia;
- Análise da influência de condições climáticas no modelo proposto, em especial se ele estiver sendo alimentado por um arranjo FV;
- Verificação dos impactos de variações na tensão de saída do arranjo FV na operação do inversor trifásico a quatro braços controlado pelo método MPC;
- Construção e validação dos resultados em protótipo experimental.
- Uso do método de controle preditivo proposto na operação em malha fechada de outras topologias de conversores estáticos de potência.

Referências Bibliográficas

- [1] Marcelo Gradella Villalva. *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*. Érica, São Paulo, 2015.
- [2] Roberto Zilles, Wilson Negrão Macêdo, Marcos André Barros Galhardo, and Sérgio Henrique Ferreira de Oliveira. *Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica*. Oficina de Textos, 2015.
- [3] Casa Civil Presidência da República do Brasil. Decreto n 5.163 de 2004. julho 30, 2004.
- [4] ANEEL. Resolução normativa nº 482. *Agência Nacional de Energia Elétrica–ANEEL.*, 2012.
- [5] ANEEL. Resolução normativa nº 687. *Agência Nacional de Energia Elétrica–ANEEL.*, 2015.
- [6] J. Hu, J. Zhu, and D. G. Dorrell. Model predictive control of grid-connected inverters for pv systems with flexible power regulation and switching frequency reduction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(1):587–594, Jan 2015.
- [7] ANEEL. Módulo 3 – Acesso ao sistema de distribuição. *Agência Nacional de Energia Elétrica–ANEEL.*, 2015.
- [8] ANEEL. Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica. *Agência Nacional de Energia Elétrica–ANEEL.*, 2015.
- [9] Lázaro Rubens A. Pinto, Sérgio P. Pimentel, and Bernardo P. de Alvarenga. Uso do controlador preditivo na operação de um inversor monofásico de ponte completa. *CONPEEX - Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão*, 13:2189–2193, Outubro 2016.
- [10] Ashfaq Ahmed. *Eletrônica de potência*. Prentice hall, São Paulo, 2000.
- [11] Denizar Cruz Martins and Ivo Barbi. *Eletrônica de Potência: Introdução ao Estudo dos Conversores CC-CA*. Edição dos Autores, 2005.

- [12] Muhammad H. Rashid. *Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações*. Makrow Books, São Paulo, 1999.
- [13] Remus Teodorescu, Marco Liserre, and Pedro Rodriguez. *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Wiley-IEEE Press, 2011.
- [14] E. C. D. Santos, C. B. Jacobina, N. Rocha, J. A. A. Dias, and M. B. R. Correa. Single-phase to three-phase four-leg converter applied to distributed generation system. *IET Power Electronics*, 3(6):892–903, Nov 2010.
- [15] J. M. Espi Huerta, J. Castello, J. R. Fischer, and R. Garcia-Gil. A synchronous reference frame robust predictive current control for three-phase grid-connected inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(3):954–962, March 2010.
- [16] I. Vechiu, O. Curea, and H. Camblong. Transient operation of a four-leg inverter for autonomous applications with unbalanced load. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Feb 2010.
- [17] D. A. Fernandes, S. R. Naidu, and A. M. N. Lima. A four leg voltage source converter based dynamic voltage restorer. In *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, June 2008.
- [18] S. R. Naidu and D. A. Fernandes. Dynamic voltage restorer based on a four-leg voltage source converter. *IET Generation, Transmission Distribution*, May 2009.
- [19] M. Rivera, J. Rodriguez, C. Garcia, R. Pena, and J. Espinoza. A simple predictive voltage control method with unity displacement power factor for four-leg indirect matrix converters. In *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, pages DS2c.5–1–DS2c.5–6, Sept 2012.
- [20] M. Rivera, V. Yaramasu, A. Llor, J. Rodriguez, B. Wu, and M. Fadel. Digital predictive current control of a three-phase four-leg inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Nov 2013.
- [21] Jang-Hwan Kim and Seung-Ki Sul. A carrier-based pwm method for three-phase four-leg voltage source converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(1):66–75, Jan 2004.
- [22] I. Vechiu, O. Curea, H. Camblong, S. Ceballos, and J. L. Villate. Digital control of a three-phase four-leg inverter under unbalanced voltage conditions. In *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, pages 1–10, Sept 2007.
- [23] Katsuhiko Ogata. *Engenharia de controle moderno*. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2010.

- [24] Gene F Franklin, J David Powell, and Abbas Emami-Naeini. *Sistemas de controle para engenharia*. Bookman Editora, 2013.
- [25] Richard C. Dorf and Robert H. Bishop. *Sistemas de controle moderno*. Pearson Educacion,, 2005.
- [26] M. Sami Fadali and Antonio Visioli. *Digital Control Engineering, Second Edition: Analysis and Design*. Academic Press, 2 edition, 2012.
- [27] José Antenor Pomilio, Helmo Kelis Morales Paredes, and Sigmar Maurer Deckmann. *Eletrônica de potência para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica*, 2013.
- [28] J. Rodriguez, J. Pontt, C. A. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortes, and U. Ammann. Predictive current control of a voltage source inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(1):495–503, Feb 2007.
- [29] J. Rodriguez, M. P. Kazmierkowski, J. R. Espinoza, P. Zanchetta, H. Abu-Rub, H. A. Young, and C. A. Rojas. State of the art of finite control set model predictive control in power electronics. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(2):1003–1016, May 2013.
- [30] Juan C Ramirez Martinez and Ralph Kennel. Boosting the performance of field-oriented control by using a model predictive direct current strategy. In *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International*, pages T4–90. IEEE, 2010.
- [31] M. Preindl, E. Schaltz, and P. Thogersen. Switching frequency reduction using model predictive direct current control for high-power voltage source inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(7):2826–2835, July 2011.
- [32] J. Rodriguez, R. M. Kennel, J. R. Espinoza, M. Trincado, C. A. Silva, and C. A. Rojas. High-performance control strategies for electrical drives: An experimental assessment. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(2):812–820, Feb 2012.
- [33] S. Aurtenechea, M. A. Rodriguez, E. Oyarbide, and J. R. Torrealday. Predictive direct power control of mv-grid-connected two-level and, three-level npc converters: experimental results. In *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, pages 1–10, Sept 2007.
- [34] S. Kouro, P. Cortes, R. Vargas, U. Ammann, and J. Rodriguez. Model predictive control; a simple and powerful method to control power converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(6):1826–1838, June 2009.

- [35] CELG D. Norma técnica celg d, nº 08 - critérios de projetos de redes de distribuição aéreas urbanas classes 15 e 36,2 kv. *Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL*, 2015.
- [36] S. P. Pimentel, R. M. M. Martinez, and J. A. Pomilio. Single-phase distributed generation system based on asymmetrical cascaded multilevel inverter. In *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, pages 346–353, Sept 2009.
- [37] T. E. Nunez-Zuniga and J. A. Pomilio. Shunt active power filter synthesizing resistive loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17(2):273–278, Mar 2002.
- [38] CELG D. Norma técnica celg d, nº 71 - requisitos para conexão de microgeradores e minigeradores ao sistema de distribuição da celg d. *Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL*, 2016.

Códigos Utilizados no Controlador

Um detalhe importante a ser observado, é na implementação do código de programação feito no MATLAB. Ao calcular a exponencial da matriz **A** deve-se utilizar o comando "*expm*(**A***t*)" em vez de "*exp*(**A***t*)".

A.1 Código de Controle para o Inversor Trifásico em Ponte Completa

```
function [y]=controle(u)
Ts=1/30e3;
f=60;
R=0.05;
L=0.006;
van=u(1);
vbn=u(2);
vcn=u(3);
vdc=u(4);
iu_ref=u(5);
iv_ref=u(6);
iw_ref=u(7);
iu=u(8);
iv=u(9);
iw=u(10);

minimo=7;
X=[iu; iv; iw];
A=[(-R/L) 0 0; 0 (-R/L) 0; 0 0 (-R/L)];
B=(1/(1*L))*[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1];
```

```

vun_opt = (R*(2*iu_ref+iv_ref+iw_ref)) +...
... (L*2*pi*f*(2*iu_ref+iv_ref+iw_ref)) + van;
vvn_opt = (R*(2*iv_ref+iu_ref+iw_ref)) +...
... (L*2*pi*f*(2*iu_ref+iv_ref+iw_ref)) + vbn;
vwn_opt = (R*(2*iw_ref+iv_ref+iu_ref)) +...
... (L*2*pi*f*(2*iu_ref+iv_ref+iw_ref)) + vcn;

```

```

C=eye(3);
F=expm(A*Ts)
f1=F(1,1);
f2=F(1,2);
f3=F(1,3);
f4=F(2,1);
f5=F(2,2);
f6=F(2,3);
f7=F(3,1);
f8=F(3,2);
f9=F(3,3);

```

```

G=A\((F-C)*B)
g1=G(1,1);
g2=G(1,2);
g3=G(1,3);
g4=G(2,1);
g5=G(2,2);
g6=G(2,3);
g7=G(3,1);
g8=G(3,2);
g9=G(3,3);

```

```

k=8; % numero de posições das chaves.
vun(8)=zeros;
vvn(8)=zeros;
vwn(8)=zeros;
SU=[0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1];
SV=[0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1];
SW=[0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1];
g=1e20;

```

```

g_minimo=1e10;
i=1;
iuk1=f1*iu+f2*iv+f3*iw+g1*(vun_opt-van)+g2*(vvn_opt-vbn)+g3*(vwn_opt-vcn);
ivk1=f4*iu+f5*iv+f6*iw+g4*(vun_opt-van)+g5*(vvn_opt-vbn)+g6*(vwn_opt-vcn);
iwk1=f7*iu+f8*iv+f9*iw+g7*(vun_opt-van)+g8*(vvn_opt-vbn)+g9*(vwn_opt-vcn);
%%
while(i<=k)
vuv(i)=(SU(i)-SV(i))*vdc;
vvw(i)=(SV(i)-SW(i))*vdc;
vwu(i)=(SW(i)-SU(i))*vdc;

iuk2(i)=(f1*iuk1)+(f2*ivk1)+(f3*iwk1)+...
... (g1*(vun(i)-van)+(g2*(vvn(i)-vbn)+(g3*(vwn(i)-vcn)));
ivk2(i)=(f4*iuk1)+(f5*ivk1)+(f6*iwk1)+...
... (g4*(vun(i)-van)+(g5*(vvn(i)-vbn)+(g6*(vwn(i)-vcn)));
iwk2(i)=(f7*iuk1)+(f8*ivk1)+(f9*iwk1)+...
... (g7*(vun(i)-van)+(g8*(vvn(i)-vbn)+(g9*(vwn(i)-vcn)));

aux1=(iu_ref-iuk2(i));
aux2=(iv_ref-ivk2(i));
aux3=(iw_ref-iwk2(i));
g=(aux1*aux1+aux2*aux2+aux3*aux3);

if ( g<=g_minimo)
minimo= i;
g_minimo=g;
end
i=i+1;
vun_opt=vun(minimo);
vvn_opt=vvn(minimo);
vwn_opt=vwn(minimo);
end
sU=SU(minimo);
sV=SV(minimo);
sW=SW(minimo);
sX=SX(minimo);
y(1)=sU; % pino 1
y(2)=sV; % pino 2

```

```

y(3)=sW; % pino 3
end

```

A.2 Código de Controle para o Inversor Trifásico a Quatro Braços

```

function [y]=controle(u)
Ts=1/30e3;
f=60;
R=0.05;
L=0.006;
van=u(1);
vbn=u(2);
vcn=u(3);
vdc=u(4);
iu_ref=u(5);
iv_ref=u(6);
iw_ref=u(7);
ix_ref=iu_ref+iv_ref+iw_ref;
iu=u(8);
iv=u(9);
iw=u(10);

vux_opt = (R*(2*iu_ref + iv_ref + iw_ref)) + ...
... (L*2*pi*f*(2*iu_ref + iv_ref + iw_ref)) + van;
vvx_opt = (R*(2*iv_ref + iu_ref + iw_ref)) + ...
... (L*2*pi*f*(2*iv_ref + iu_ref + iw_ref)) + vbn;
vwx_opt = (R*(2*iw_ref + iu_ref + iv_ref)) + ...
... (L*2*pi*f*(2*iw_ref + iu_ref + iv_ref)) + vcn;

X=[iu; iv; iw];
A=[(-R/L 0 0; 0 (-R/L) 0; 0 0 (-R/L)];
B=(1/(4*L))*[3 -1 -1; -1 3 -1; -1 -1 3];

C=eye(3); % matriz identidade
F=expm(A*Ts)
f1=F(1,1);

```

```

f2=F(1,2);
f3=F(1,3);
f4=F(2,1);
f5=F(2,2);
f6=F(2,3);
f7=F(3,1);
f8=F(3,2);
f9=F(3,3);

G=A\((F-C)*B)
g1=G(1,1);
g2=G(1,2);
g3=G(1,3);
g4=G(2,1);
g5=G(2,2);
g6=G(2,3);
g7=G(3,1);
g8=G(3,2);
g9=G(3,3);

k=15; % numero de posições das chaves.
vux(16)=zeros;
vvx(16)=zeros;
vwx(16)=zeros;

SU=[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1];
SV=[0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1];
SW=[0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1];
SX=[0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1];
g_minimo=1e10;
i=1;

iuk1=f1*iu+f2*iv+f3*iw+g1*(vux_opt-van) + ...
... g2*(vvx_opt-vbn)+g3*(vwx_opt-vcn);
ivk1=f4*iu+f5*iv+f6*iw+g4*(vux_opt-van) + ...
... g5*(vvx_opt-vbn)+g6*(vwx_opt-vcn);
iwk1=f7*iu+f8*iv+f9*iw+g7*(vux_opt-van) + ...
... g8*(vvx_opt-vbn)+g9*(vwx_opt-vcn);

```

```

while (i<=k)
vux(i) = ((SU(i)-SX(i))*vdc);
vvx(i) = ((SV(i)-SX(i))*vdc);
vwx(i) = ((SW(i)-SX(i))*vdc);

iuk2(i) = ((f1*iuk1)+(f2*ivk1)+(f3*iwk1)+ ...
... (g1*(vux(i)-van))+(g2*(vvx(i)-vbn))+(g3*(vwx(i)-vcn)));
ivk2(i) = ((f4*iuk1)+(f5*ivk1)+(f6*iwk1)+ ...
... g4*(vux(i)-van))+(g5*(vvx(i)-vbn))+(g6*(vwx(i)-vcn)));
iwk2(i) = ((f7*iuk1)+(f8*ivk1)+(f9*iwk1)+ ...
... (g7*(vux(i)-van))+(g8*(vvx(i)-vbn))+(g9*(vwx(i)-vcn)));

%FUNÇÃO CUSTO
g = ((iu_ref-iuk2(i))^2+(iv_ref-ivk2(i))^2+(iw_ref-iwk2(i)));

if ( g<=g_minimo)
minimo= i;
g_minimo=g;
end

i=i+1;
vux_opt=vux(minimo);
vvx_opt=vvx(minimo);
vwx_opt=vwx(minimo);
end

y(1)=SU(minimo); % Braço U
y(2)=SV(minimo); % Braço V
y(3)=SW(minimo); % Braço W
y(4)=SX(minimo); % Braço X
end

```