



MÁQUINA SÍNCRONA COM TENSÃO NÃO-SENOIDAL PARA APLICAÇÕES EM FONTES ALTERNATIVAS

Thiago Machado Monteiro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Edson Hirokazu Watanabe

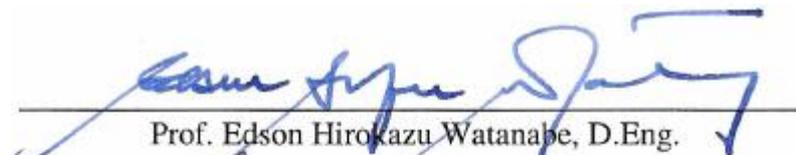
Rio de Janeiro
Outubro de 2012

MÁQUINA SÍNCRONA COM TENSÃO NÃO-SENOIDAL PARA APLICAÇÕES
EM FONTES ALTERNATIVAS

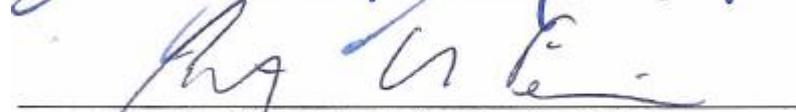
Thiago Machado Monteiro

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:



Prof. Edson Hirokazu Watanabe, D.Eng.



Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.



Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2012

Monteiro, Thiago Machado

Máquina síncrona com tensão não-senoidal para aplicações em fontes alternativas/ Thiago Machado Monteiro. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XI, 73 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Edson Hirokazu Watanabe

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 72-73.

1. Tensões não-senoidais. 2. Máquina síncrona de ímã permanente. 3. Conversor VSC back-to-back. I. Watanabe, Edson Hirokazu. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Sérgio e Leila, por sempre me apoiarem a estudar e por me proporcionarem subsídios para que eu pudesse concluir esta etapa.

À meus irmãos Diogo e Bruno, por sempre me ajudarem nas horas difíceis.

À minha esposa, Érica, por compreender minha ausência, por me fortalecer nos momentos de fraqueza e por me amar. “É melhor serem dois do que um, pois se um cair, o outro o ajuda a levantar”.

À meu falecido avô Waldemiro, que fomentou em mim a paixão pela eletricidade...

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Jesus Cristo, meu Pai, meu senhor e meu Deus, por sempre me dar paz nos momentos de angústia, por me capacitar, por me dar dons, por me dar saúde e por me amar incondicionalmente. Pai sem a Tua ajuda eu nunca teria conseguido. Obrigado meu Deus.

Agradeço também ao meu orientador, o Professor Watanabe, por me disciplinar, por me criticar, por dedicar seu tão ocupado tempo para me dar explicações e principalmente, por me mostrar o quão digno e prazeroso é o trabalho de um Pesquisador. Você tem sido meu referencial. Obrigado por me orientar neste projeto, sua ajuda foi fundamental para a conclusão deste.

Agradeço em especial a dois membros da banca examinadora deste trabalho, os professores Antônio Carlos Ferreira e Guilherme Gonçalves Sotelo, pelas contribuições, críticas, sugestões e por acreditarem que eu poderia concluir esta dissertação. A vocês deixo a seguinte mensagem:

Vossas palavras foram luz em dias de escuridão. Me disciplinaram, exortaram e me impulsionaram a ir além. Em Genesis, capítulo 12, versículo 3 está escrito “Abençoarei os que te abençoarem”. Desejo, sinceramente, que Deus ilumine os vossos caminhos e abençoe vocês e vossas descendências.

Agradeço ainda a todos que colaboram com meu trabalho, aos colegas do ELEPOT e aos Professores de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MÁQUINA SÍNCRONA COM TENSÃO NÃO-SENOIDAL PARA APLICAÇÕES EM FONTES ALTERNATIVAS

Thiago Machado Monteiro

Outubro/2012

Orientador: Edson Hirokazu Watanabe

Programa de Engenharia Elétrica

Este projeto consiste em um estudo sobre geração de energia elétrica utilizando uma máquina síncrona de ímã permanente (MSIP) para converter a energia rotacional mecânica produzida por quaisquer fontes alternativas, como a eólica ou energia das ondas, em energia elétrica. Estudou-se uma MSIP cujo fluxo magnético induzido nos enrolamentos de armadura produz tensões de geração do tipo não senoidais. Dois conversores do tipo fonte de tensão (*Voltage Source Converter*), conectados em topologia *back-to-back*, são utilizados para conectar este gerador à rede. A utilização desta máquina permite a possibilidade de gerar mais potência com o mesmo núcleo magnético. Em determinados casos ganhos da ordem de 30% foram obtidos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SYNCHRONOUS MACHINE WITH NON-SINUSOIDAL VOLTAGE FOR
ALTERNATIVE SOURCES APPLICATIONS

Thiago Machado Monteiro

October/2012

Advisor: Edson Hirokazu Watanabe

Department: Electrical Engineering

This project consists of a study on electric power generation using a permanent magnet synchronous machine (PMSM) to convert the rotational mechanical energy produced by any alternative sources such as wind or wave energy into electric power. The PMSM whose magnetic flux induced in the armature windings produces voltages generation of non-sinusoidal type was studied. Two voltage source converters (VSC) in back-to-back connection are used to connect this generator to grid. The use of this machine allows the possibility to generate more power with the same magnetic core. In certain cases gains of about 30% were obtained.

Sumário

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Estrutura da Dissertação	5
Capítulo 2 - Gerador Síncrono	6
2.1 Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes (MSIP)	6
2.2 <i>Brushless</i> DC, <i>Brushless</i> AC e A Máquina em Estudo	10
2.3 Tensões Trapezoidais.....	12
2.4 Modelo Elétrico do Sistema de Geração.....	20
Capítulo 3 – Operação e Controle	22
3.1 Estratégia de Controle.....	22
3.2 Teoria pq	23
3.3 Controle do Conversor – Lado do Gerador	26
3.4 Controle do Conversor – Lado da Rede.....	27
3.5 Esquema 1 – Somente Fundamental	31
3.6 Esquema 2 – Sem Componentes de Sequência Zero	35
3.7 Esquema 3 – Trapézio Completo.....	38
Capítulo 4 – Simulações e Resultados.....	41
4.1 Modelo Elétrico da MSIP no SimPowerSystems	42
4.2 Simulação Com Tensões Senoidais	48
4.3 Fundamental.....	52
4.4 Controle sem harmônicos múltiplos de 3	57
4.5 Trapézio Completo	64
Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros	69
5.1 Potências Geradas com Tensões Senoidais e Trapezoidais	69
5.2 Aumento do Volume de Ímã no Caso Trapezoidal.....	70
5.3 Trabalhos Futuros	71
Referências Bibliográficas.....	72

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Matriz Elétrica Brasileira (2009)	3
Figura 1.2 - Capacidade Instalada pelo PROINFA	4
Figura 2.1 - Máquina Síncrona de Ímã Permanente - Esquema Físico	7
Figura 2.2 - Circuito Elétrico da MSIP.....	9
Figura 2.3 - Tensões e Correntes Em Máquinas <i>Brushless</i> DC e AC	11
Figura 2.4 – Exemplo de Tensão e Corrente na Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes Utilizada	12
Figura 2.5 - Forma de Onda Trapezoidal	13
Figura 2.6 – Onda Trapezoidal com α variando de 0° (quadrada) a 90° (triangular)	16
Figura 2.7 - Ondas Senoidal e Trapezoidal	19
Figura 2.8 - Valores eficazes da onda trapezoidal em função de α	19
Figura 2.9 - Representação esquemática do sistema de geração proposto	20
Figura 3.1 - Diagrama de blocos do controle do conversor.....	23
Figura 3.2 - Diagrama de blocos do controle do conversor do lado do gerador	27
Figura 3.3 - Diagrama de blocos do controle do elo CC – conversor do lado da rede... ..	29
Figura 3.4 - Diagrama de blocos do controle vetorial de corrente	29
Figura 3.5 - Ponte conversora do lado da rede	30
Figura 3.6 - Circuito elétrico - Esquema 1	33
Figura 3.7 - Diagrama de blocos - controle do conversor do lado do gerador - Esquema 1	34
Figura 3.8 - Comparação tensão gerada e_a e sua componente fundamental para $\alpha = 0^\circ$	35
Figura 3.9 - Comparação tensão gerada e_a e a tensão trapezoidal sem os seus componentes $3n$	37
Figura 3.10 - Circuito Elétrico - Esquema 3 - Conversor VSC 4 Fios	39
Figura 3.11 - Diagrama de blocos - controle do conversor do lado do gerador (Retificador) a 4 Fios	40
Figura 4.1 - Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes	42
Figura 4.2 - Forças eletromotrizes - Modo Trapezoidal	45
Figura 4.3 - Tensões geradas pela MSIP senoidal	49
Figura 4.4 - Tensão no Elo de Corrente Contínua	49

Figura 4.5 - Corrente sintetizada pelo conversor e sua referência.....	50
Figura 4.6 - Velocidade angular da máquina.....	50
Figura 4.7 - Correntes sintetizadas pelo conversor da rede - Caso Senoidal.....	51
Figura 4.8 - Correntes de linha da MSIP - Caso Trapezoidal – $\alpha = 0^\circ$	52
Figura 4.9 - Tensões geradas pela MSIP com tensão trapezoidal – $\alpha = 0^\circ$	54
Figura 4.10 - Tensões geradas pela MSIP com tensão trapezoidal - $\alpha = 15^\circ$	54
Figura 4.11 - Tensões geradas pela MSIP com tensão trapezoidal - $\alpha = 45^\circ$	55
Figura 4.12 - Tensão do elo de corrente contínua - Caso Trapezoidal.....	55
Figura 4.13 - Correntes de linha máximas da MSIP - Caso Trapezoidal – $\alpha= 0^\circ, 15 \dots$	56
Figura 4.14 - Potência real instantânea - Caso Trapezoidal - $\alpha= 0^\circ$	57
Figura 4.15 - Tensão trapezoidal (quadrada) e tensão de controle do gerador – $\alpha=0^\circ$.	58
Figura 4.16 - Tensão trapezoidal e tensão de controle do gerador – $\alpha=15^\circ$	59
Figura 4.17- Tensão trapezoidal e tensão de controle do gerador – $\alpha=45^\circ$	59
Figura 4.18 - Correntes de linha máximas da MSIP - Caso Trapezoidal – $\alpha=0^\circ$	60
Figura 4.19 - Correntes de linha máximas da MSIP - Caso Trapezoidal – $\alpha=15^\circ$	60
Figura 4.20 - Correntes de linha máximas da MSIP - Caso Trapezoidal – $\alpha=45^\circ$	61
Figura 4.21 - Potência real instantânea - Caso Trapezoidal Sem Sequência Zero - $\alpha= 0^\circ$	62
Figura 4.22 - Potência real instantânea - Caso Trapezoidal Sem Sequência Zero - $\alpha= 15^\circ$	62
Figura 4.23 - Potência real instantânea - Caso Trapezoidal Sem Sequência Zero - $\alpha= 45^\circ$	63
Figura 4.24 - Correntes de linha máximas da MSIP - Caso Trapezoidal, Esquema 3 – $\alpha=15^\circ$	64
Figura 4.25 - Correntes de linha máximas da MSIP - Caso Trapezoidal, Esquema 3 – $\alpha=45^\circ$	65
Figura 4.26 - Correntes sintetizadas pelo conversor da Rede - Caso Trapezoidal, Esquema 3, $\alpha=0^\circ$	66
Figura 4.27 - Potência real instantânea - Caso Trapezoidal, Esquema 3 - $\alpha= 0^\circ$	66
Figura 4.28 - Potência real instantânea - Caso Trapezoidal, Esquema 3 - $\alpha= 15^\circ$	67
Figura 4.29 - Potência real instantânea - Caso Trapezoidal, Esquema 3 - $\alpha= 45^\circ$	67

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Componentes Harmônicos da série de Fourier para ondas trapezoidais ...	17
Tabela 2.2 - Valores eficazes da onda trapezoidal	18
Tabela 3.1 - Valores percentuais das tensões - Esquema 1 - Somente fundamental	32
Tabela 3.2 - Valores percentuais das tensões - Esquema 2 – Controle considerando componente fundamental, harmônicos de sequência positiva e negativa	36
Tabela 3.3 - Valores percentuais das tensões trapezoidais completas - Esquema 3.....	38
Tabela 4.1 - Parâmetros da MSIP Simulada.....	47
Tabela 4.2 - Grandezas da MSIP medidas - Caso Senoidal	51
Tabela 4.3 - Grandezas da MSIP medidas – Caso Trapezoidal – $\alpha = 0^\circ, 15^\circ$ e 45°	53
Tabela 4.4 - Potências ativas geradas - comparações Esquema 1	57
Tabela 4.5 - Potências ativas geradas - comparações do Esquema 2	63
Tabela 4.6 - Potências ativas geradas - Comparações Esquema 3	68

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Motivação

A crescente demanda de energia elétrica aliada ao aumento da preocupação com o meio ambiente impulsionou a procura por fontes de produção de energia mais limpas, ou melhor, fontes de energia que causam o menor impacto possível ao meio ambiente, seja a curto ou longo prazo.

Tal fato resultou numa série de estudos sobre as chamadas Fontes Alternativas e Renováveis de Energia (FARE). Estas fontes são aquelas que possibilitam a geração de energia elétrica através de meios que não geram ou geram poucos gases de efeito estufa. Energia eólica, energia solar, energia das marés são exemplos de FARE mais conhecidas.

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2020 [1] do Brasil, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a perspectiva dos diversos analistas de mercado é que o crescimento da economia brasileira será bastante favorável nos próximos anos, consolidando a retomada verificada a partir de 2009.

Ainda no plano supracitado foi considerada uma significativa ampliação da participação das fontes alternativas e renováveis de energia na matriz de geração de energia elétrica do Brasil, contribuindo, assim, para o desenvolvimento sustentável

Para que o país continue crescendo a taxas superiores à média mundial será necessário investir no aumento da capacidade de geração de energia elétrica. A proposta desta dissertação é utilizar novas tecnologias que venham a ajudar no desenvolvimento das fontes renováveis de energia (eólica, marés, ondas, etc), proporcionando uma maior eficiência na geração e conseqüente redução de custos destes novos empreendimentos.

A idéia básica deste trabalho é utilizar uma máquina síncrona de ímãs permanentes ou com enrolamentos de campo e que geram tensões não-senoidais. Acredita-se que com a geração de tensão trapezoidal é possível aumentar a quantidade de energia gerada para uma determinada máquina quando comparada com gerações puramente senoidais. Com o mesmo volume de ferro e cobre consegue-se obter uma maior geração de energia elétrica, reduzindo, por conseguinte, os impactos ambientais sobre os recursos naturais disponíveis.

A preocupação com o meio ambiente e com os recursos naturais do planeta que são limitados está cada vez mais em debate. Este movimento em favor da Terra é ratificado com a renovação do compromisso político com o desenvolvimento sustentável (Rio+20), encontro internacional sobre sustentabilidade, realizado na cidade do Rio de Janeiro em Junho de 2012, da qual participaram chefes de estado de diversos países.

A utilização de fontes alternativas de energia representa para o Brasil a possibilidade de diversificação da sua matriz energética, que hoje é baseada em combustíveis fósseis e energia hidráulica, sendo a última responsável por mais de 70% da geração de energia elétrica do país, como pode ser observado na Figura 1.1. Esta apresenta a matriz elétrica brasileira composta por todas as fontes de energia elétrica utilizadas no ano de 2009.

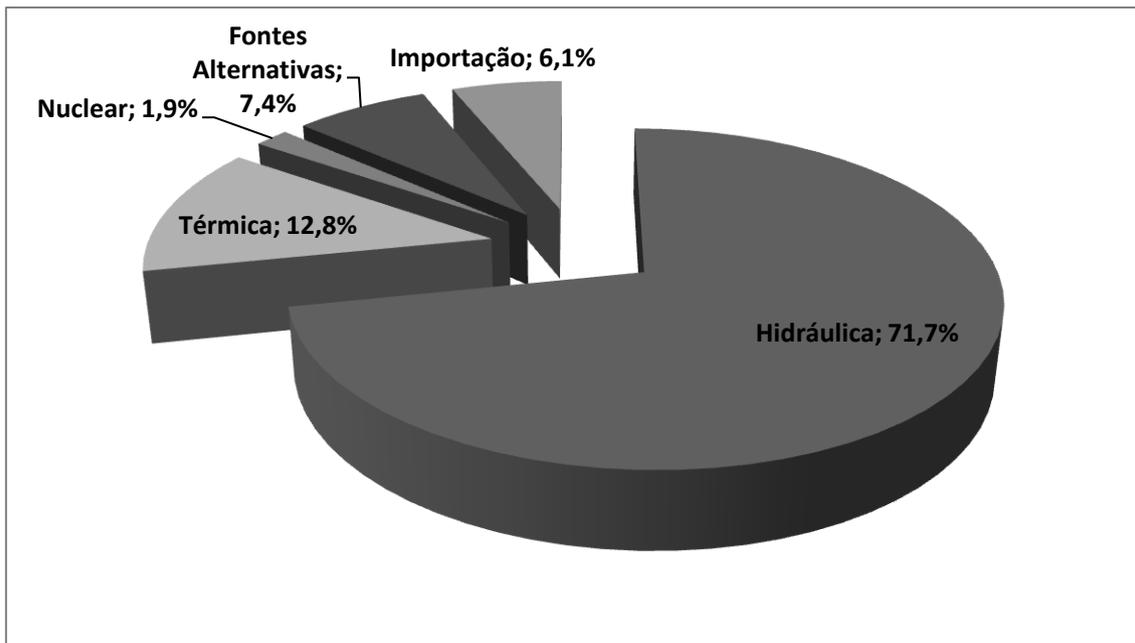


Figura 1.1 - Matriz Elétrica Brasileira (2009)

Fonte: PDE 2020, dados da tabela 42 [1].

É importante citar que já existe um projeto do governo federal com o objetivo de diversificar a matriz energética do Brasil denominado “Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia – PROINFA”. Através deste programa o governo federal pretende reduzir as emissões de gases de efeito estufa, além de garantir maior confiabilidade e segurança à população em relação ao abastecimento de energia elétrica.

De acordo com o Plano Anual do PROINFA 2012 [2], divulgado pela Eletrobras, desde o início do projeto até Dezembro de 2011 foram implantados cerca de 2,87 GW de capacidade de geração através de fontes alternativas, dos quais 533,34 MW são de usinas de Biomassa, 1,18 GW de usinas Eólicas e 1,16 GW de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH’s), como pode ser observado na Figura 1.2.

A implantação deste projeto pelo Governo Federal do Brasil, além de representar para o país uma diversificação de sua matriz energética, gerou novos empregos diretos e indiretos. Também proporcionou avanços na indústria nacional e incentivos ao desenvolvimento de tecnologias de ponta nas universidades brasileiras.

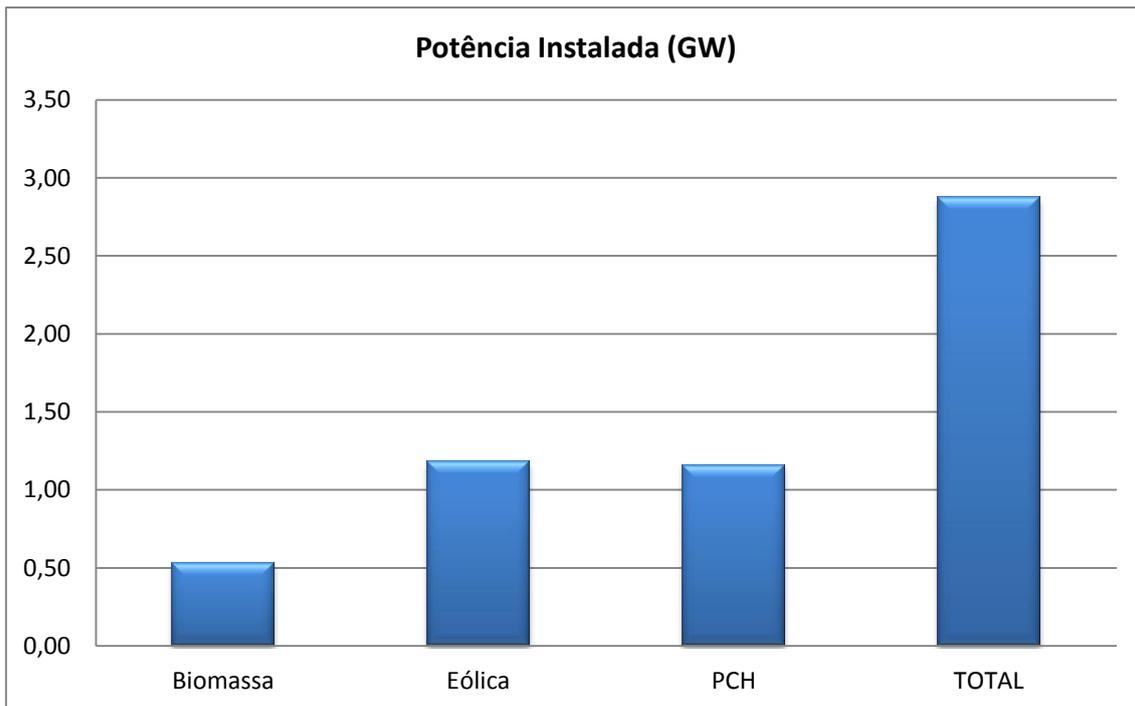


Figura 1.2 - Capacidade Instalada pelo PROINFA

Fonte: PAP 2012, dados da tabela 5 [2].

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo demonstrar que a utilização de tensões não-senoidais em máquinas síncronas, aliada a um controle de corrente baseado na Teoria pq resulta numa maior densidade de energia gerada para um dado equipamento. Desta forma acredita-se em menor consumo de matérias primas (ferro e cobre), menor peso por kW instalado e uma maior facilidade no processo de fabricação dos enrolamentos da máquina.

No caso de utilização da máquina síncrona de ímãs permanentes (MSIP), devido à ausência de enrolamentos de campo, verifica-se também uma redução das perdas quando comparado com outros tipos de máquinas, por exemplo, a máquina síncrona com enrolamentos de campo e armadura (convencional) e a máquina de indução duplamente alimentada.

A proposta do presente estudo é utilizar uma máquina síncrona de ímã permanente, operando com geração de tensão trapezoidal. Para possibilitar a conexão das tensões geradas à rede de energia elétrica convencional (do tipo senoidal) foram utilizados dois conversores fonte de tensão (*Voltage Source Converter-VSC*),

conectados em topologia *back-to-back*, isto é, com dois conversores ligados entre si através de um elo de corrente contínua, podendo operar com fluxo bidirecional de potência, para interligar os terminais da máquina com a rede. Os VSCs utilizados são compostos por chaves autocomutadas tipo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Neste caso, o chaveamento do dispositivo semicondutor é feito por sinais de controle externos.

Para realizar o controle do fluxo de potência enviado pelo conversor à rede, uma estratégia de controle vetorial de corrente é utilizada.

1.3 Estrutura da Dissertação

Os tópicos deste trabalho serão apresentados ao leitor através dos seguintes capítulos.

O capítulo 2 apresenta uma breve revisão dos fundamentos de máquinas síncronas, explica sucintamente a utilização de ímãs permanentes em máquinas elétricas e descreve o modelo elétrico de geração de energia considerado neste estudo.

O capítulo 3 apresenta os conceitos das estratégias de controle do sistema proposto, utilizando a Teoria pq para calcular as correntes ótimas para tensões do tipo trapezoidal.

O capítulo 4 mostra os resultados encontrados através de simulações computacionais do sistema considerado, utilizando softwares como o PSCAD/EMTDC e MATLAB.

O quinto capítulo apresenta um retrospecto simplificado e algumas conclusões que podem ser retiradas dos principais resultados obtidos ao longo do trabalho. De forma a complementar e aperfeiçoar o estudo realizado são citadas algumas sugestões de trabalhos futuros utilizando tensões não-senoidais.

Capítulo 2 - Gerador Síncrono

2.1 Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes (MSIP)

Neste tipo de máquina elétrica não existe o enrolamento de campo, pois os mesmos são substituídos por ímãs que apresentam elevado campo coercitivo (H_c) e elevada densidade de fluxo residual ou remanência (B_r). Um valor alto de campo coercitivo impede que o ímã seja facilmente desmagnetizado e uma elevada remanência resulta num fluxo magnético também elevado.

A MSIP não possui escovas ou fonte de tensão contínua, reduzindo, portanto, os custos com manutenção do equipamento. Por não possuir enrolamentos no rotor, as perdas Joules associadas praticamente não existem. Assim, a máquina, quando comparada com a síncrona convencional ou com a de indução gaiola de esquilo, apresenta um alto rendimento e melhor relação torque/volume.

De acordo com WEG [3] os ímãs de alta energia no rotor asseguram uma significativa redução das perdas elétricas e, por conseguinte, garantem uma menor elevação da temperatura. Desta forma, o volume e peso da MSIP, quando comparada com outras máquinas de mesma potência é menor e o tempo de vida é aumentado.

Para uma mesma relação torque/potência, diminuindo-se o tamanho da máquina, o sistema de ventilação também é reduzido. Em consequência disto os níveis de ruído e vibração apresentam um significativo decréscimo.

GRENIER *et al.*[4] desenvolveram um modelo vetorial para máquinas *brushless* DC com ímãs permanentes instalados sobre a superfície do rotor. O equacionamento da máquina é realizado através das expressões de fluxos magnéticos de cada fase do estator. A Figura 2.1 apresenta o esquema físico de um gerador síncrono de ímãs permanente de dois pólos.

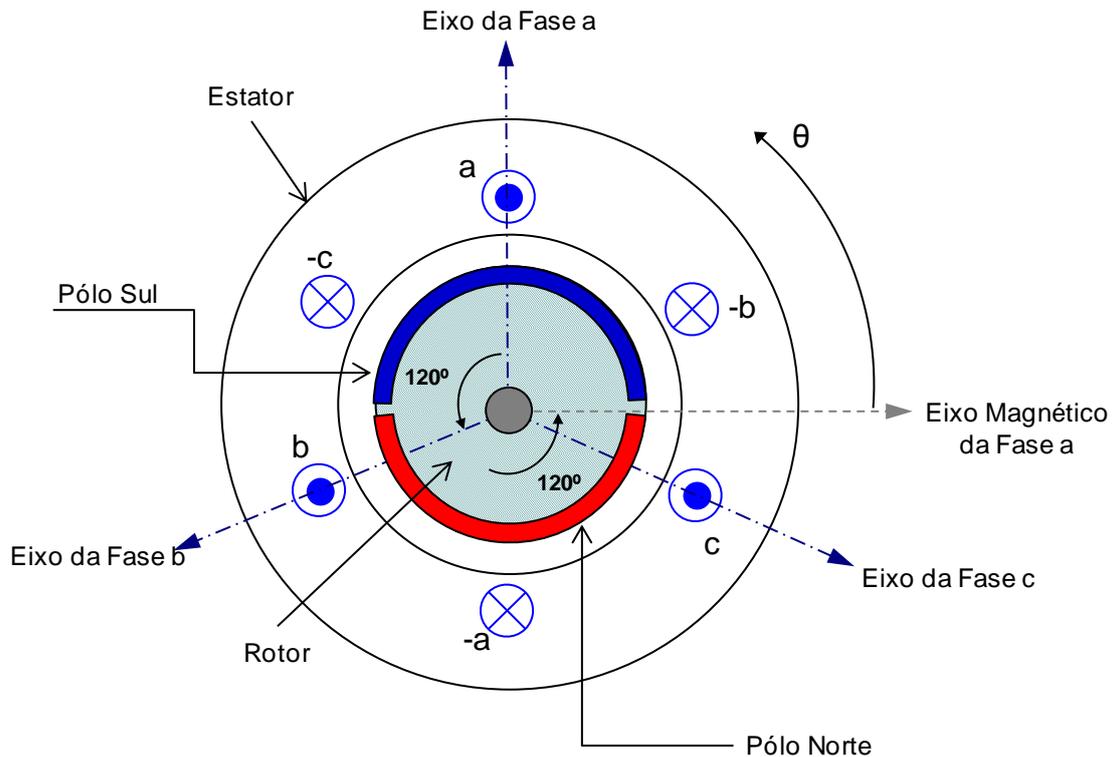


Figura 2.1 - Máquina Síncrona de Ímã Permanente - Esquema Físico

De acordo com GRENIER *et al.*[4] as equações para os fluxos magnéticos totais de cada fase do estator podem ser escritas como segue:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{tsa} \\ \Phi_{tsb} \\ \Phi_{tsc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

onde:

Φ_{tsa} , Φ_{tsb} , Φ_{tsc} são os fluxos totais nas fases a, b e c, respectivamente;

Φ_{ra} , Φ_{rb} , Φ_{rc} são os fluxos das fases a, b e c do rotor e

Φ_{sa} , Φ_{sb} , Φ_{sc} são os fluxos produzidos pelos enrolamentos de estator das fases a, b e c, respectivamente.

Os fluxos do estator também podem ser escritos como:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

onde:

L_s é a autoindutância dos enrolamentos de uma fase;

M_s é a indutância mútua entre os enrolamentos das fases e

i_a , i_b e i_c são as correntes que circulam nas fases a, b e c do estator.

A partir de (2.1) GRENIER *et al.*[4] escreve as tensões nas fases da máquina como:

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{tsa} \\ \Phi_{tsb} \\ \Phi_{tsc} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

onde:

v_{an} , v_{bn} e v_{cn} são as tensões das fases do estator.

GRENIER *et al.*[4] e BOFFINO [5] assumem que as indutâncias são praticamente constantes na região de operação da máquina devido ao entreferro ser relativamente grande e, desde que não haja saturação. Desta forma (2.3) pode ser desenvolvida como segue:

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \omega \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

onde:

$\omega = \frac{d\theta}{dt}$ é a velocidade angular do rotor em [rad/s] e

θ = ângulo elétrico do rotor em relação ao eixo magnético da fase a (Figura 2.1).

As tensões internas da máquina são escritas como:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \omega \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Utilizando (2.4) e (2.5) é possível desenhar o circuito elétrico equivalente para a máquina síncrona de ímãs permanentes. Este é mostrado na Figura 2.2.

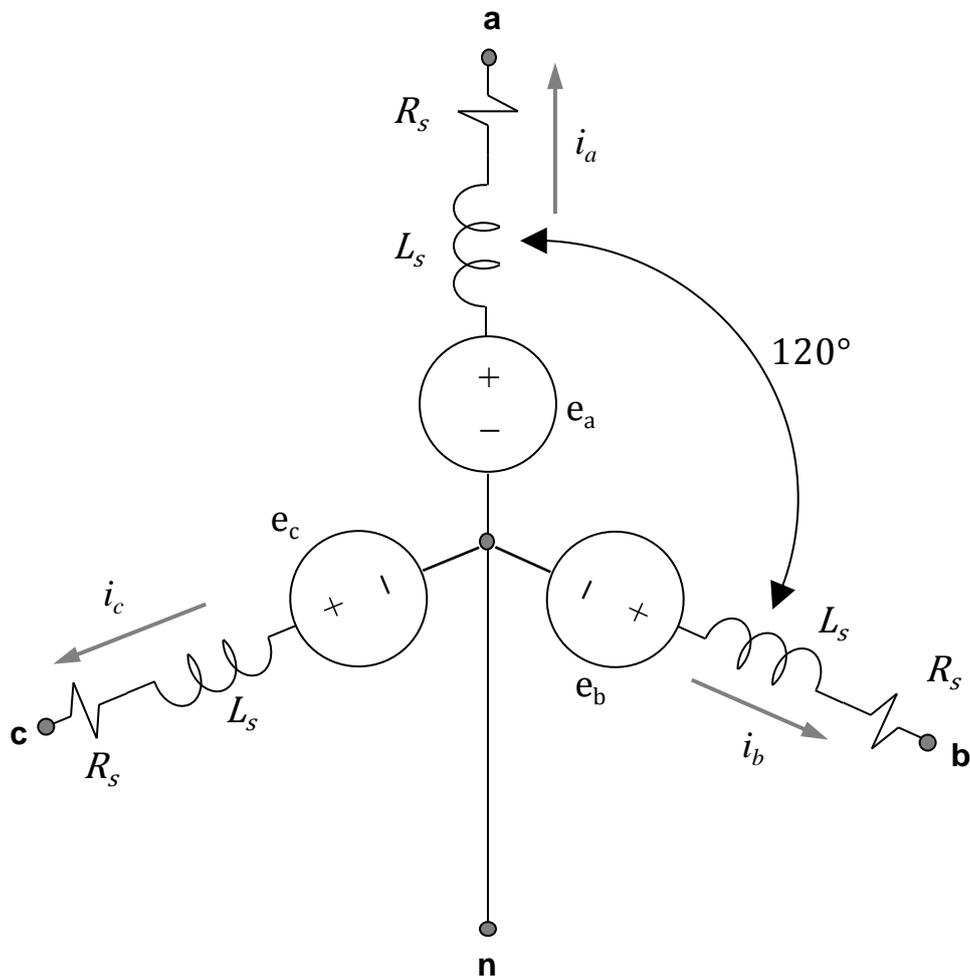


Figura 2.2 - Circuito Elétrico da MSIP

O circuito equivalente da máquina consiste em três fontes de tensão idênticas (tensões internas) conectadas em estrela e defasadas de 120° elétricos uma da outra, cada qual conectada em série com uma resistência de estator e uma auto-indutância, que leva em conta os efeitos das indutâncias mútuas das outras fases. As tensões internas

são denominadas forças eletromotrizes e correspondem a uma diferença de potencial produzida pelo deslocamento do fluxo magnético do rotor nos enrolamentos de estator. De acordo com BOFFINO [5], estas tensões determinarão as características mais significativas da máquina e também podem ser chamadas de forças eletromotrizes mecânicas.

2.2 *Brushless DC, Brushless AC e A Máquina em Estudo*

WEG [3] apresenta dois tipos de motores síncronos de ímãs permanentes MSIP: *brushless DC* e *brushless AC*. A MSIP *brushless DC* é projetada para desenvolver uma forma de onda não-senoidal das tensões induzidas nos enrolamentos de estator, mais precisamente, do tipo trapezoidal. Já a corrente de alimentação, neste caso, é idealmente retangular, conforme mostrado na Figura 2.3. De acordo com WEG [3], os sistemas de controle para o acionamento da máquina trapezoidal é mais simples, já que não é necessário utilizar um sensor de posição de alta resolução no rotor, pois existem apenas seis instantes de comutação da corrente a cada ciclo elétrico. Todavia, este tipo de máquina apresenta um torque mais pulsante em relação ao *brushless AC*.

Normalmente as máquinas *brushless DC* são utilizadas em aplicações de poucos kW e que não necessitam de elevado desempenho.

Já as máquinas *brushless AC* são projetadas para que as tensões induzidas e as correntes de alimentação sejam do tipo senoidais, conforme apresentado na Figura 2.3, o que resulta num torque mais suave. WEG [3] relata que ao contrário do que ocorre no caso trapezoidal, o sistema de controle para o *brushless AC* é mais complexo, pois existe a necessidade de utilização de sensores de posição de alta resolução no rotor, além dos sensores de corrente em cada fase para manter o controle preciso da forma de onda da corrente com a posição angular do rotor em cada instante de tempo.

Em geral, as máquinas *brushless AC* são utilizadas em potências maiores e em situações que necessitam de alto desempenho.

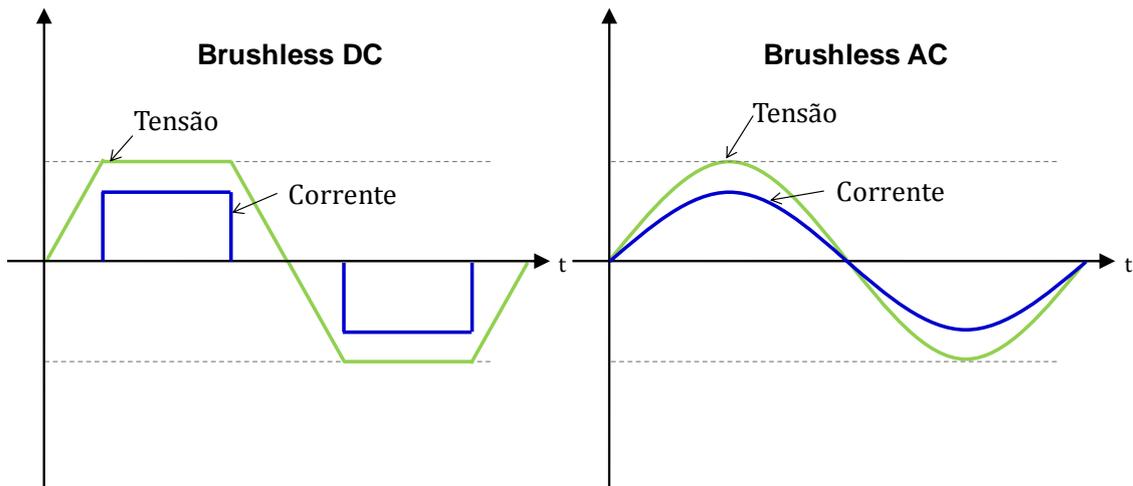


Figura 2.3 - Tensões e Correntes Em Máquinas *Brushless* DC e AC

BOFFINO [5] apresenta um estudo sobre as estratégias de acionamento de controle em máquinas de corrente alternada de ímã permanente com tensões não-senoidais. Apresenta um modelo vetorial para controle destas máquinas que resultam em menores custos de produção e volume.

NASAR *et al.* [6] menciona que as MSIP não-senoidais se diferenciam das senoidais pelos enrolamentos de estator. Os enrolamentos da máquina não-senoidal são dispostos de maneira mais simples que nos casos senoidais, pois são dispostos concentrados nas ranhuras do estator, não apresentando grande complexidade no processo de construção e fabricação da máquina.

MILLER [7] menciona que, segundo o princípio de funcionamento as máquinas MSIP podem ser denominadas senoidais ou não-senoidais, também chamadas de retangulares, quadradas ou trapezoidais, dependendo da forma de onda induzida nos enrolamentos de estator.

BERENDSEN *et al.*[8] utilizam como forma de onda da tensão induzida no estator o trapézio, para máquinas com tensões não-senoidais.

A máquina objeto desta dissertação é a MSIP com ímãs no rotor, tensão trapezoidal e forma de onda das correntes de linha calculadas através da teoria pq e sintetizadas no conversor por um controle de corrente por histerese. Em um caso específico para uma tensão trapezoidal cujo ângulo de inclinação do trapézio é de 45° e

fornecendo como ordem de controle apenas a potência ativa instantânea, as formas de onda da tensão e corrente da máquina pode ser observada na Figura 2.4.

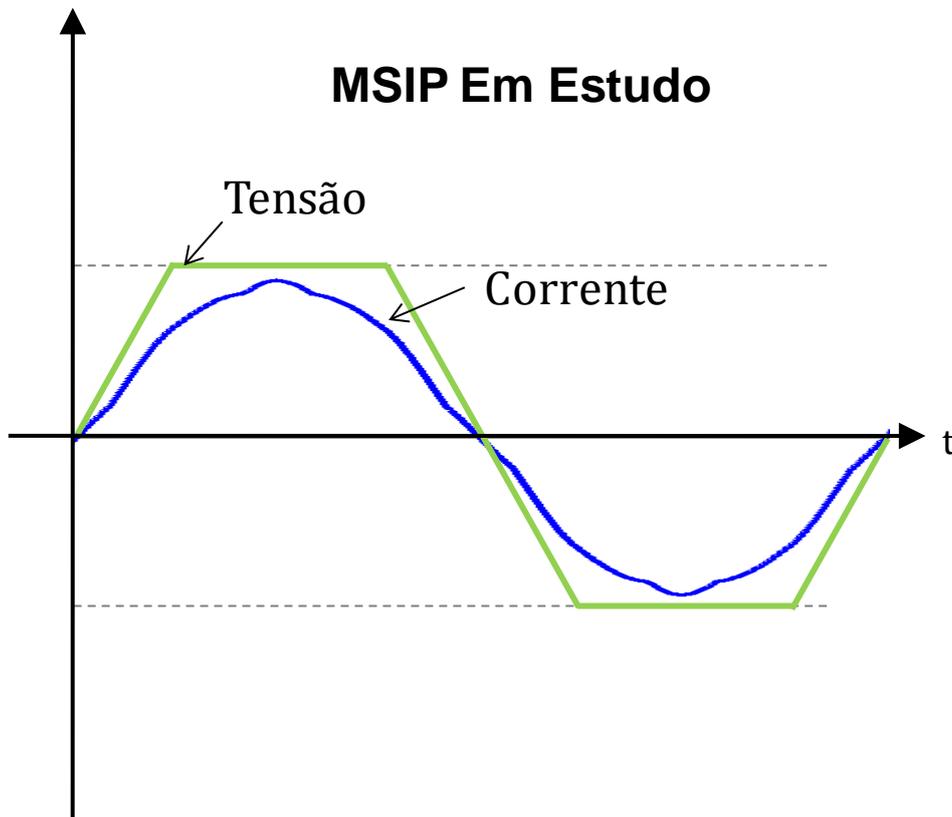


Figura 2.4 – Exemplo de Tensão e Corrente na Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes Utilizada

2.3 Tensões Trapezoidais

Para permitir uma melhor compreensão sobre as formas de onda das tensões trapezoidais estudadas, utilizou-se a decomposição em Série de Fourier do sinal periódico não-senoidal para expressar como a função “trapézio” varia com o tempo.

De acordo com Jean Baptiste Joseph Fourier qualquer sinal periódico pode ser expresso como um somatório de senos e cossenos. Portanto tem-se a definição que segue.

Seja $f(x) = f(x + 2\pi)$ uma função integrável sobre o intervalo $[-\pi, \pi]$ e $n \in \mathbb{N}$. A série de Fourier de f é a série trigonométrica:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)) \quad (2.9)$$

onde a_0 , a_n e b_n são os coeficientes de Fourier de $f(x)$ definidos por:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx ; n = 1, 2, 3, \dots$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx ; n = 1, 2, 3, \dots$$

A Figura 2.5 apresenta graficamente a forma de onda genérica de uma tensão trapezoidal no intervalo $[-\pi, \pi]$.

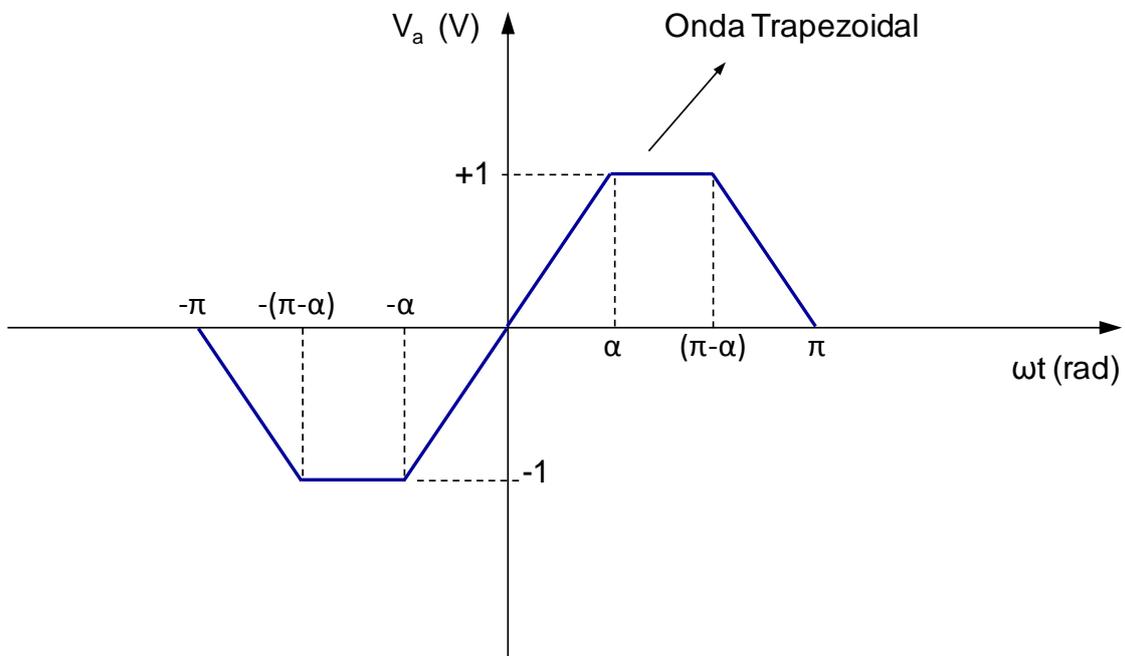


Figura 2.5 - Forma de Onda Trapezoidal

Esta onda pode ser escrita como:

$$V_a(\omega t) = \begin{cases} -\frac{(\omega t + \pi)}{\alpha}; & -\pi \leq \omega t < -(\pi - \alpha) \\ -1 & ; -(\pi - \alpha) \leq \omega t < -\alpha \\ \frac{\omega t}{\alpha} & ; -\alpha \leq \omega t < \alpha \\ +1 & ; \alpha \leq \omega t < (\pi - \alpha) \\ -\frac{(\omega t - \pi)}{\alpha}; & (\pi - \alpha) \leq \omega t < \pi \end{cases} \quad (2.6)$$

Calculando os coeficientes de Fourier de V_a .

Por simetria pode-se mostrar que o valor médio da onda trapezoidal vale zero. Portanto, $a_0 = 0$.

Como a função é ímpar, ou seja, $f(-x) = -f(x)$, a_n também é igual a zero.

Para calcular o valor de b_n , calcula-se a integral dos coeficientes de Fourier no intervalo de $[0, \pi]$ e multiplica-se o resultado por 2, como segue:

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^\alpha \frac{\omega t}{\alpha} \sin(n\omega t) d\omega t + \frac{2}{\pi} \int_\alpha^{(\pi-\alpha)} \sin(n\omega t) d\omega t + \frac{2}{\pi} \int_{(\pi-\alpha)}^\pi -\frac{(\omega t - \pi)}{\alpha} \sin(n\omega t) d\omega t \quad (2.7)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sin(n\omega t)}{\alpha n^2} - \frac{\omega t \cos(n\omega t)}{\alpha n} \right)_0^\alpha + \frac{2}{\pi} \left(-\frac{\cos(n\omega t)}{n} \right)_\alpha^{(\pi-\alpha)} + \dots$$

$$\dots + \frac{2}{\pi} \left[\left(-\frac{\sin(n\omega t)}{\alpha n^2} + \frac{\omega t \cos(n\omega t)}{\alpha n} \right) + \left(-\frac{\pi \cos(n\omega t)}{\alpha n} \right) \right]_{(\pi-\alpha)}^\pi$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sin(n\alpha)}{\alpha n^2} - \frac{\alpha \cos(n\alpha)}{\alpha n} \right) + \frac{2}{\pi} \left(-\frac{\cos(n(\pi-\alpha))}{n} + \frac{\cos(n\alpha)}{n} \right) + \dots$$

$$\dots + \frac{2}{\pi} \left[\left(-\frac{\sin(n\pi)}{\alpha n^2} + \frac{\pi \cos(n\pi)}{\alpha n} \right) + \frac{\sin(n(\pi-\alpha))}{\alpha n^2} - \frac{(\pi-\alpha) \cos(n(\pi-\alpha))}{\alpha n} \right] - \frac{\pi \cos(n\pi)}{\alpha n} + \frac{\pi \cos(n(\pi-\alpha))}{\alpha n}$$

Simplificando os termos simétricos, tem-se que:

$$b_n = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sin(n\alpha) + \sin(n(\pi - \alpha))}{\alpha n^2} \right) \quad (2.8)$$

Para α igual a zero é necessário calcular o limite de b_n , para α tendendo a zero. A partir de (2.8), tem-se:

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} b_n = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sin(n\alpha) + \sin(n(\pi - \alpha))}{\alpha n^2} \right)$$

O limite da expressão supracitada é indeterminado. Aplicando a regra de L'Opital (derivada do numerador e denominador), pode-se reescrever o limite como:

$$\begin{aligned} \lim_{\alpha \rightarrow 0} b_n &= \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sin(n\alpha) + \sin(n(\pi - \alpha))}{\alpha n^2} \right) = \frac{2}{\pi} \left(\frac{n \cos(n\alpha) - n \cos(n(\pi - \alpha))}{n^2} \right) \\ \lim_{\alpha \rightarrow 0} b_n &= \frac{2}{\pi} \left(\frac{1 - \cos(n\pi)}{n} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

É sabido que para uma onda senoidal do tipo $v(t) = V_m \sin(\omega t)$ o valor RMS (*root mean square*) vale $V_m/\sqrt{2}$.

De acordo com a identidade de Parseval FRYZE [9], para uma onda do tipo não senoidal, pode-se realizar o cálculo do valor RMS através da seguinte fórmula:

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (2.10)$$

onde V_n são os valores RMS das senóides de cada frequência dos respectivos harmônicos. Desta forma, pode-se escrever que:

$$V_n = \frac{b_n}{\sqrt{2}} \quad (2.11)$$

Utilizando uma rotina desenvolvida no MATLAB, calculou-se as séries de Fourier para ondas do tipo trapezoidal de amplitude unitária com α variando de zero (onda quadrada) até o valor de 90 graus (onda triangular) – Figura 2.6.

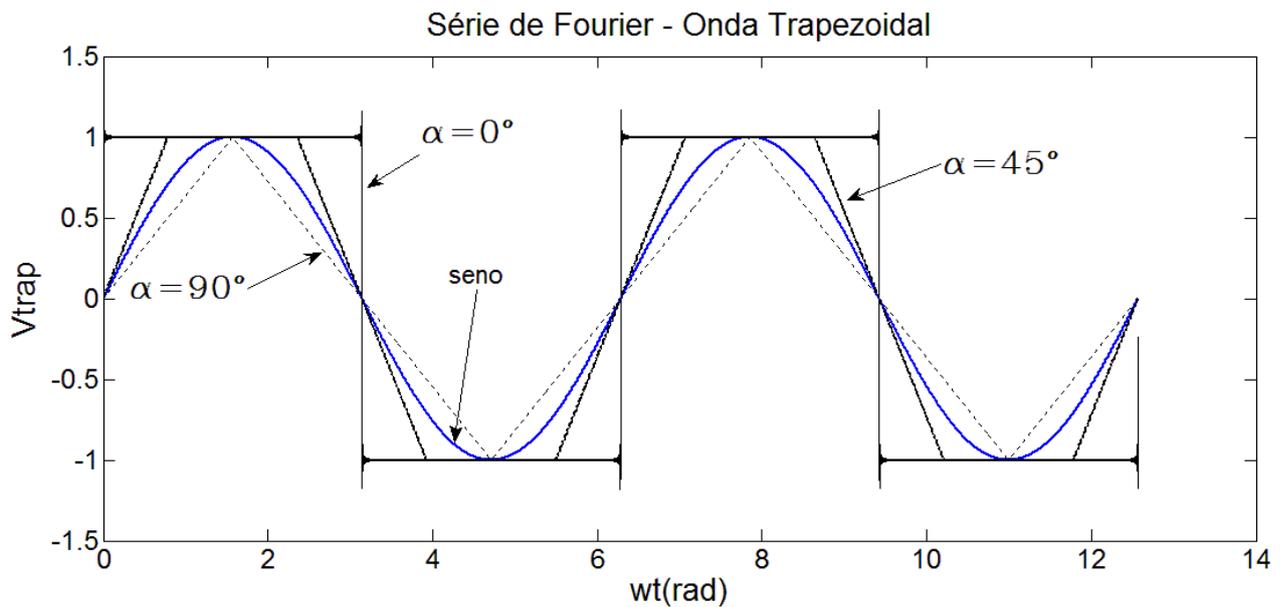


Figura 2.6 – Onda Trapezoidal com α variando de 0° (quadrada) a 90° (triangular)

Os valores das harmônicas para cada ângulo α estão exibidos na Tabela 2.1, que segue.

Tabela 2.1 – Componentes Harmônicos da série de Fourier para ondas trapezoidais

α (°)	Harmônicos (fn)										Valor Eficaz
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	Total
0	1,27	0,42	0,25	0,18	0,14	0,12	0,10	0,08	0,07	0,07	1,00
5	1,27	0,42	0,25	0,17	0,13	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04	0,98
10	1,27	0,41	0,22	0,14	0,09	0,06	0,03	0,02	0,00	0,00	0,96
15	1,26	0,38	0,19	0,10	0,04	0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01	0,94
20	1,25	0,35	0,14	0,05	0,00	-0,02	-0,02	-0,01	0,00	0,00	0,92
25	1,23	0,31	0,10	0,01	-0,03	-0,02	-0,01	0,00	0,01	0,01	0,90
30	1,22	0,27	0,05	-0,02	-0,03	-0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,88
35	1,20	0,22	0,01	-0,04	-0,02	0,01	0,01	0,00	-0,01	0,00	0,86
40	1,17	0,18	-0,02	-0,04	0,00	0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,84
45	1,15	0,13	-0,05	-0,02	0,01	0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,82
50	1,12	0,08	-0,05	-0,01	0,02	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,79
55	1,09	0,04	-0,05	0,01	0,01	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,77
60	1,05	0,00	-0,04	0,02	0,00	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,75
65	1,02	-0,03	-0,03	0,02	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,72
70	0,98	-0,06	-0,01	0,02	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69
75	0,94	-0,08	0,01	0,01	-0,01	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,67
80	0,90	-0,09	0,02	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,64
85	0,85	-0,09	0,03	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,61
90	0,81	-0,09	0,03	-0,02	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58

Analisando a Tabela 2.1 percebe-se que a componente fundamental do trapézio é a principal responsável pelo valor eficaz desta onda ser maior que o valor eficaz da onda senoidal. Nos casos em que isso acontece (para ângulos α menores que 65° , já que o valor eficaz do seno de amplitude unitária vale $1/\sqrt{2} = 0,7071$). Porém, no caso de ângulos α entre 0° e 35° a parcela correspondente aos harmônicos de baixa ordem (3, 5 e 7) é um tanto significativa e, por sua vez, pode ser explorada utilizando-se circuitos elétricos que gerem harmônicos nestas frequências convenientes (estrela com neutro para permitir circulação de correntes de sequência zero).

A segunda coluna (Total) da Tabela 2.2 apresenta o percentual dos valores eficazes totais das ondas trapezoidais. É importante ressaltar que estes valores eficazes das ondas trapezoidais calculadas são maiores que o valor eficaz de uma onda senoidal com mesmo valor de pico que a onda trapezoidal. Isto pode ser observado na Figura 2.7. Ratificando o que foi mencionado no parágrafo acima, analisando a Tabela 2.2, nota-se que para ângulos α maiores que 65° não existe aumento do valor eficaz da tensão

trapezoidal em relação à senoidal. Para α igual a 70° , por exemplo, o valor RMS do trapézio é 2,07% menor que o do seno.

A terceira coluna (sem 3n) da Tabela 2.2 apresenta o percentual dos valores eficazes da onda trapezoidal excluindo-se as harmônicas múltiplas de 3. Estes cálculos foram realizados porque para circuitos elétricos trifásico a três fios as componentes de sequência zero (múltiplas de 3) não circulam. Neste caso percebe-se que os valores das tensões trapezoidais ainda são maiores que o seno, para ângulos entre 0 e 65° , porém são inferiores aos do trapézio completo.

Já a quarta coluna (Só f1) apresenta apenas o valor eficaz da componente fundamental da onda trapézoidal. Conforme mencionado anteriormente a componente fundamental é a principal responsável pelo valor RMS da onda trapézoidal ser maior que o da onda senoidal.

Tabela 2.2 - Valores eficazes da onda trapezoidal

α ($^\circ$)	Valor Eficaz da Tensão		
	TOTAL	Sem 3n	Só f1
0°	139,98%	132,37%	127,32%
5°	138,68%	131,42%	127,16%
10°	136,06%	129,56%	126,68%
15°	133,33%	127,65%	125,87%
20°	130,52%	125,70%	124,75%
25°	127,65%	123,73%	123,32%
30°	124,72%	121,72%	121,59%
35°	121,71%	119,63%	119,55%
40°	118,63%	117,33%	117,23%
45°	115,47%	114,75%	114,63%
50°	112,22%	111,91%	111,77%
55°	108,87%	108,79%	108,65%
60°	105,41%	105,41%	105,30%
65°	101,83%	101,78%	101,72%
70°	98,13%	97,95%	97,93%
75°	94,28%	93,97%	93,95%
80°	90,27%	89,84%	89,80%
85°	86,07%	85,57%	85,50%
90°	81,65%	81,14%	81,06%

Obs.: Percentuais em relação ao valor eficaz de uma onda senoidal de amplitude unitária.

A Figura 2.8 apresenta a forma gráfica da Tabela 2.2. As três curvas apresentadas representam as três colunas da tabela. A curva superior equivale ao

trapézio completo (segunda coluna da Tabela 2.2). A curva do meio, representa os valores RMS da onda trapezoidal excluindo-se os harmônicos múltiplas de 3 e a curva inferior apresenta apenas os valores RMS da componente fundamental das ondas trapezoidais.

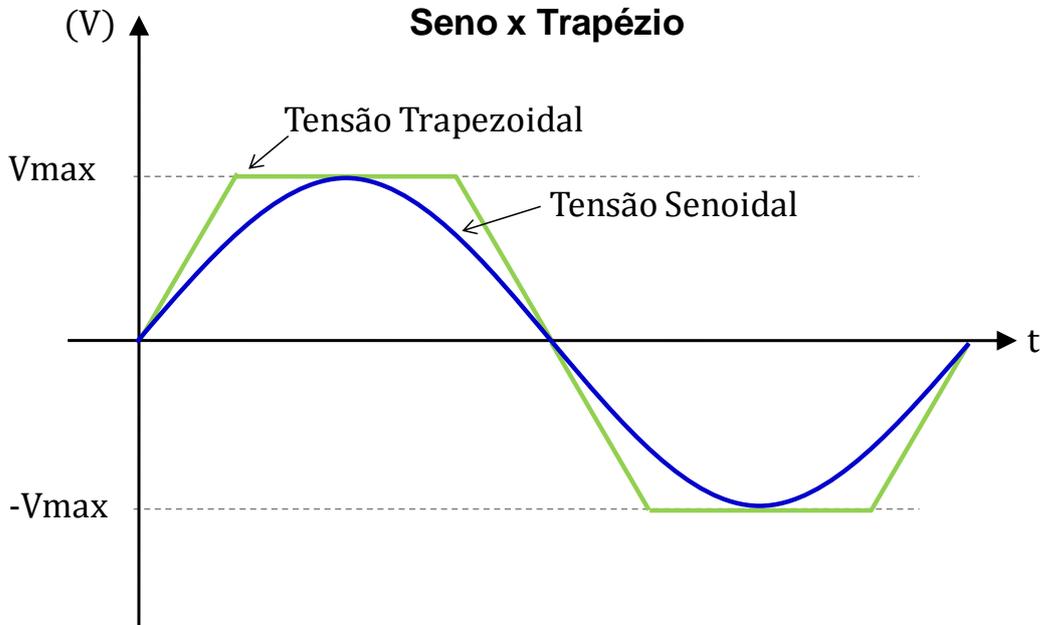


Figura 2.7 - Ondas Senoidal e Trapezoidal

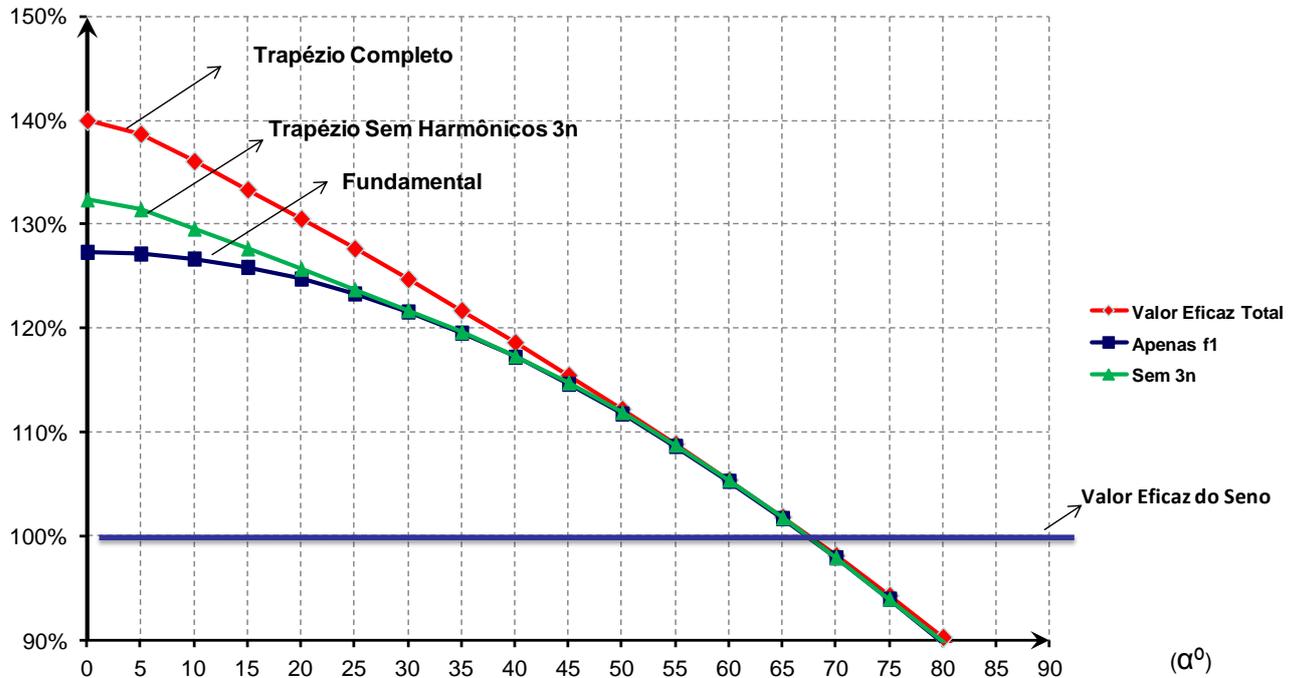


Figura 2.8 - Valores eficazes da onda trapezoidal em função de α

2.4 Modelo Elétrico do Sistema de Geração

O modelo elétrico de geração proposto consiste em um gerador síncrono de ímas permanentes conectado à rede através de dois conversores VSC (*Voltage Source Converter*) com controle PWM (*Pulse Width Modulation*) senoidal a IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), conforme apresentado na Figura 2.9.

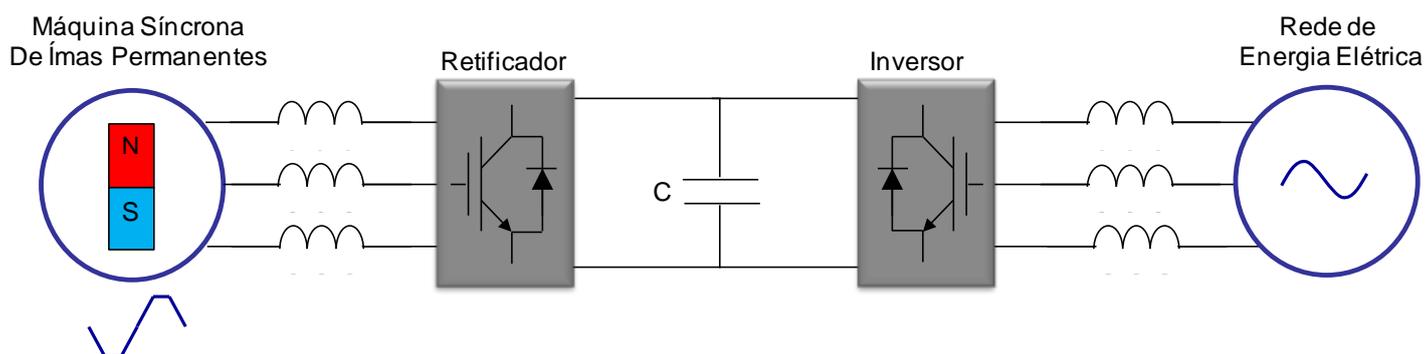


Figura 2.9 - Representação esquemática do sistema de geração proposto

A rede é representada como uma fonte de tensão em série com uma impedância (equivalente de Thévenin).

O capacitor C tem a função de garantir a tensão do elo CC “constante” durante transitórios, necessária para a operação do VSC. Isto é essencial para que se garanta um *ripple* de tensão dentro de limites aceitáveis, para que sejam minimizados os efeitos dos harmônicos de chaveamento no circuito e a fim de manter estáveis os controles de corrente do conversor.

Os reatores na saída do conversor têm o papel de auxiliar na filtragem da tensão, bem como de ajudar no controle de corrente do conversor.

Ao contrário das máquinas elétricas convencionais, que funcionam com tensões de armadura do tipo senoidais, a MSIP deste trabalho utilizará tensões do tipo trapezoidais. De acordo com WEG [3], as máquinas deste tipo são projetadas para desenvolver uma forma de onda da força eletromotriz (*fem* ou *tensão interna*) trapezoidal.

No capítulo seguinte será apresentada ao leitor a estratégia para controle do sistema (máquina x rede) e os cálculos que foram realizados para determinar a melhor forma de onda da corrente para tensão trapezoidal.

Capítulo 3 – Operação e Controle

3.1 Estratégia de Controle

A Estratégia de controle dos conversores adotada foi tal que a ponte conversora do lado da máquina síncrona de ímãs permanentes é responsável pelo controle de potência ativa, que deverá fluir da MSIP para a rede de energia elétrica. O conversor do lado da rede é responsável pelo controle da tensão v_{cc} sobre o capacitor e das correntes que serão injetadas na rede.

O controle do chaveamento dos dois conversores foi realizado através da utilização da modulação por largura de pulso (PWM) seno-triângulo.

Na Figura 3.1 encontra-se o diagrama unifilar em estudo e o diagrama de blocos do controle considerado, onde:

e_{ger} – vetor de tensões contendo as medições das tensões instantâneas das fases a, b e c do gerador;

i_{ger} – vetor de correntes contendo as medições das correntes de linha instantâneas das fases a, b e c do gerador;

i_L – vetor de correntes contendo as medições das correntes de linha instantâneas das fases a, b e c da rede;

i^*_{ref1} – vetor de correntes contendo as correntes instantâneas de referência das fases a, b e c do gerador;

i^*_{ref2} – vetor de correntes contendo as correntes instantâneas de referência das fases a, b e c da rede;

v_{cc} – tensão instantânea do elo de corrente contínua;

v_{rede} – vetor de tensões contendo as medições das tensões instantâneas das fases a, b e c da rede;

$gates_{ger}$ – vetor de sinais contendo os pulsos de abertura e fechamento dos IGBTs 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do conversor VSC do lado do gerador e

$gates_{rede}$ – vetor de sinais contendo os pulsos de abertura e fechamento dos IGBTs 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do conversor VSC do lado da rede.

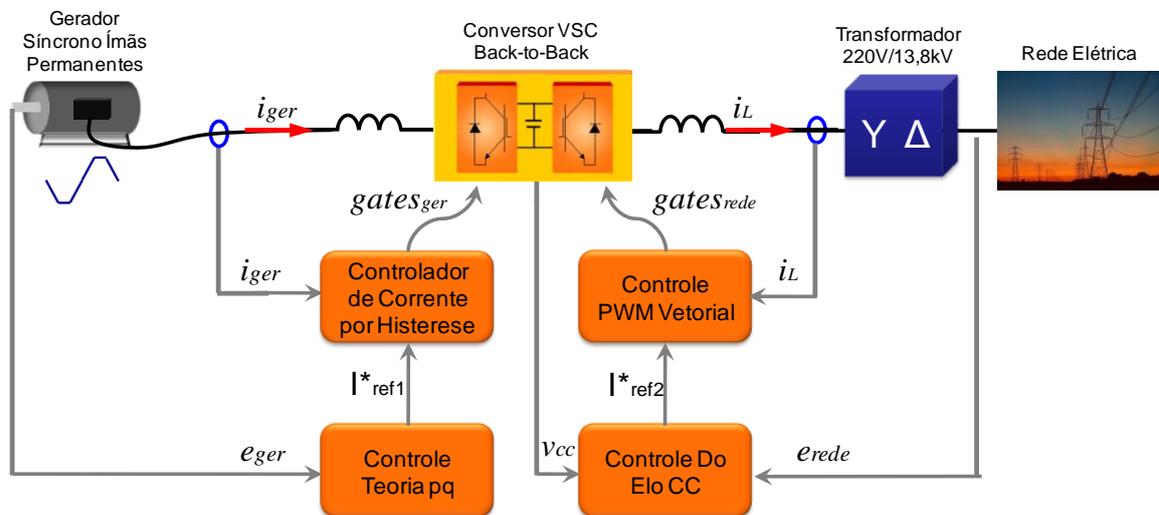


Figura 3.1 - Diagrama de blocos do controle do conversor

3.2 Teoria pq

A Teoria da Potência Ativa e Reativa Instantânea é uma importante ferramenta que foi desenvolvida por AKAGI *et al* [10] para o controle de filtros ativos de potência,

válida para regimes permanente e transitório, assim como para formas de ondas genéricas de tensão e corrente. Desta forma, esta teoria fornece conhecimentos bastante úteis na análise de sistemas não-senoidais.

Abaixo será apresentado um resumo desta teoria de acordo com AKAGI *et al* [10].

Utilizando a Transformação de Clarke realiza-se uma mudança do sistema de coordenadas a-b-c para α - β -0. As transformações direta e inversa das tensões v_a, v_b e v_c são expressas por:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} - \text{transformação direta (3.1)}$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} - \text{transformação inversa (3.2)}$$

Da mesma forma é possível escrever as equações para as correntes a-b-c e α - β -0.

As potências, então, são definidas como segue:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

onde:

p_0 – é a potência instantânea de sequência zero;

p - é a potência real instantânea e

q - é a potência imaginária instantânea.

Em termos das variáveis nas coordenadas a-b-c e α - β -0, a potência trifásica instantânea é dada por:

$$p_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 = p + p_0. \quad (3.4)$$

A equação acima mostra que $p_{3\phi}$ é igual à soma das potências real e de sequência zero.

Por outro lado, a potência imaginária pode ser escrita como:

$$q = -v_\alpha i_\beta + v_\beta i_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}}[(v_b - v_c)i_a + (v_c - v_a)i_b + (v_a - v_b)i_c] \quad (3.5)$$

A unidade de q é o Volt-Ampere Imaginário “vai” AKAGI *et al* [10].

As tensões e correntes instantâneas podem apresentar desequilíbrio e harmônicos, pois são genéricas. Portanto, no caso geral em que as imperfeições supracitadas estão presentes, as potências p_0 , p e q podem conter componentes com valores médios e oscilantes. Ou seja:

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0, \quad (3.6)$$

$$p = \bar{p} + \tilde{p}, \quad (3.7)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}, \quad (3.8)$$

onde a “barra” indica valores médios e o “til” indica as partes oscilantes.

Após algumas manipulações algébricas das matrizes acima é possível escrever as correntes nas coordenadas α e β em função das tensões nessas coordenadas e das potências p e q :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Pode-se separar a equação acima em:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \left\{ \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\}$$

Uma vantagem na utilização da Teoria pq deve-se a possibilidade de tratar as potências reais e imaginárias separadamente.

A Teoria pq foi utilizada para calcular as correntes ótimas, isto é, que resultam em $p=\text{constante}$ e $q=0$ no gerador considerado neste estudo.

3.3 Controle do Conversor – Lado do Gerador

O controle da ponte conversora do lado do gerador foi realizado de acordo com os cálculos descritos na seção 3.1 deste capítulo, utilizando-se da Teoria pq para calcular as correntes de referência a serem aplicadas no controlador de corrente por histerese (bloco que compara as correntes medidas com as de referência e resulta em pulsos de disparo tipo PWM para ligar e desligar os IGBTs).

Após realizadas as medições das tensões de fase terminais do gerador aplica-se a transformada de Clarke passando estas tensões do sistema de coordenadas a-b-c para o sistema de coordenadas α - β -0.

Posteriormente, com os valores de referência de $p_g^*=\text{constante}$ e $q_g^*=0$, calculam-se as correntes de referência no sistema de coordenadas α - β -0. Aplica-se então a transformada inversa de Clarke e obtém-se os valores de referência das correntes em coordenadas a-b-c, que serão utilizadas no controlador de corrente por histerese. Este bloco produzirá os pulsos de disparo dos IGBTs, controlando, assim, as potências geradas pela máquina.

O diagrama de blocos do controle do conversor do lado do gerador é apresentado na Figura 3.2.

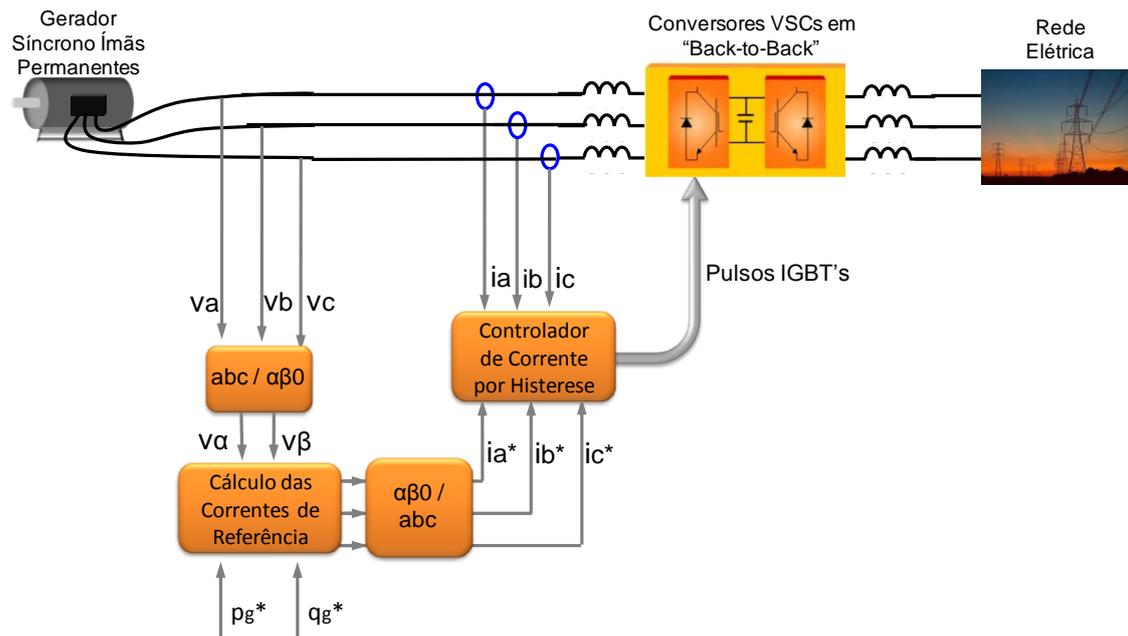


Figura 3.2 - Diagrama de blocos do controle do conversor do lado do gerador

3.4 Controle do Conversor – Lado da Rede

O controle do conversor do lado da rede de energia elétrica idealizado para as aplicações deste trabalho tem a função de enviar para o sistema toda a potência ativa que foi gerada pela máquina. Apesar deste controle permitir a regulação da tensão no ponto de conexão comum através da potência imaginária instantânea, esta aplicação não foi implementada neste estudo, já que o objetivo do trabalho em questão é aumentar a quantidade de potência gerada pela máquina.

Para implementar este controle foram utilizadas formas já existentes e bastante difundidas na literatura técnica de eletrônica de potência. Seguem algumas referências que apresentam maiores detalhes sobre as técnicas que serão utilizadas: FERREIRA [11], OGATA *et al* [12] e LIMA [13].

Conforme mostrado na Figura 3.1 a tensão do elo de corrente contínua v_{cc} (tensão sobre o capacitor) é comparada com um valor de referência v_{cc_ref} dentro do bloco “Controle do Elo CC”. O erro obtido é aplicado a um controlador PI, ajustado

manualmente através do método da tentativa e erro e gera um sinal p_r^* . Este sinal representa a potência ativa instantânea de referência para o conversor da rede, ou seja, a potência real que deve ser injetada na rede elétrica. Sempre que a tensão v_{cc} no capacitor for maior do que a tensão de referência significa que há um excesso de energia armazenada no capacitor e esta deve ser enviada à rede.

Para controle do conversor do lado da rede as tensões v_a , v_b e v_c da rede são medidas. Posteriormente realiza-se uma transformação de coordenadas de a-b-c para α - β -0. Conforme mencionado anteriormente, não será utilizada a potência imaginária instantânea para a regulação da tensão no ponto de conexão do conversor com a rede. Desta forma o valor de q_r^* utilizado será zero.

De posse das tensões nas coordenadas α - β -0 da rede e das potências ativa e imaginária de referência (p_r^* e q_r^*) calcula-se as correntes de referência necessárias para que o conversor transmita à rede de energia elétrica toda a potência ativa gerada pela máquina síncrona de ímãs permanentes.

Estas correntes calculadas são fornecidas ao controlador vetorial de corrente, que fornece os pulsos de disparo dos IGBTs.

A Figura 3.3 apresenta o diagrama de blocos do controle do elo CC.

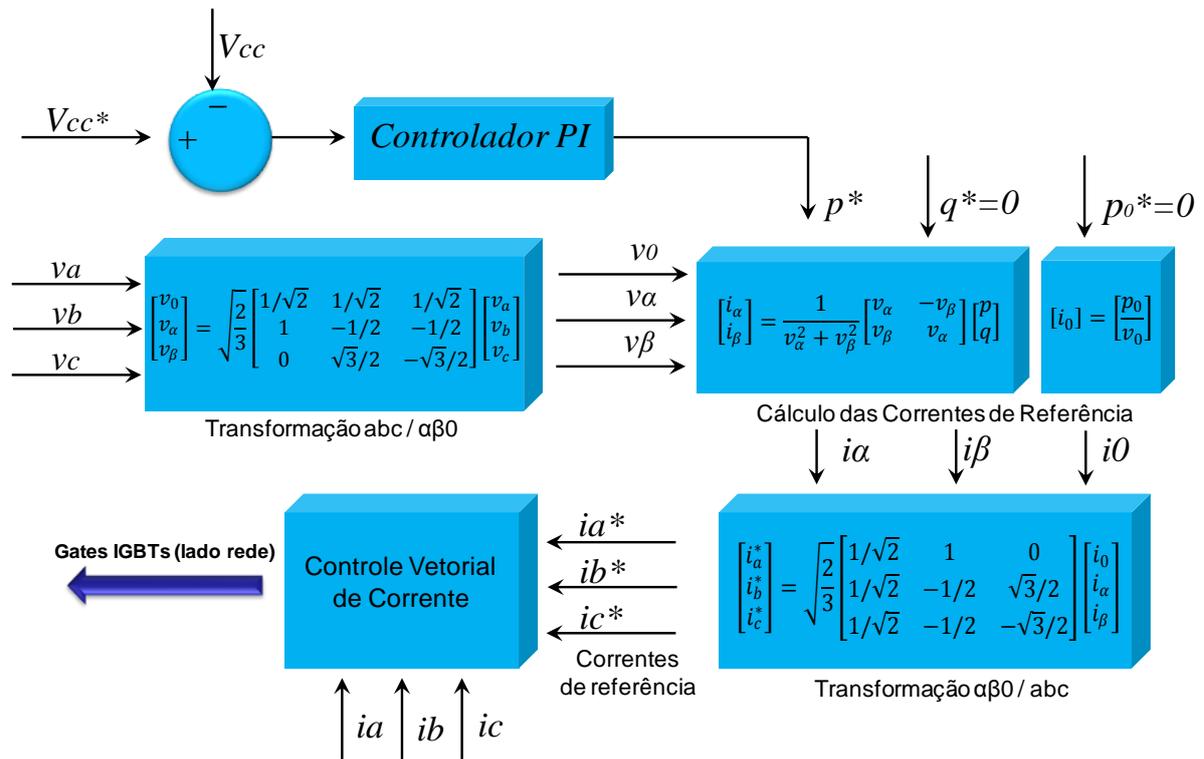


Figura 3.3 - Diagrama de blocos do controle do elo CC – conversor do lado da rede

A Figura 3.4 apresenta o diagrama de blocos do controle vetorial de corrente.

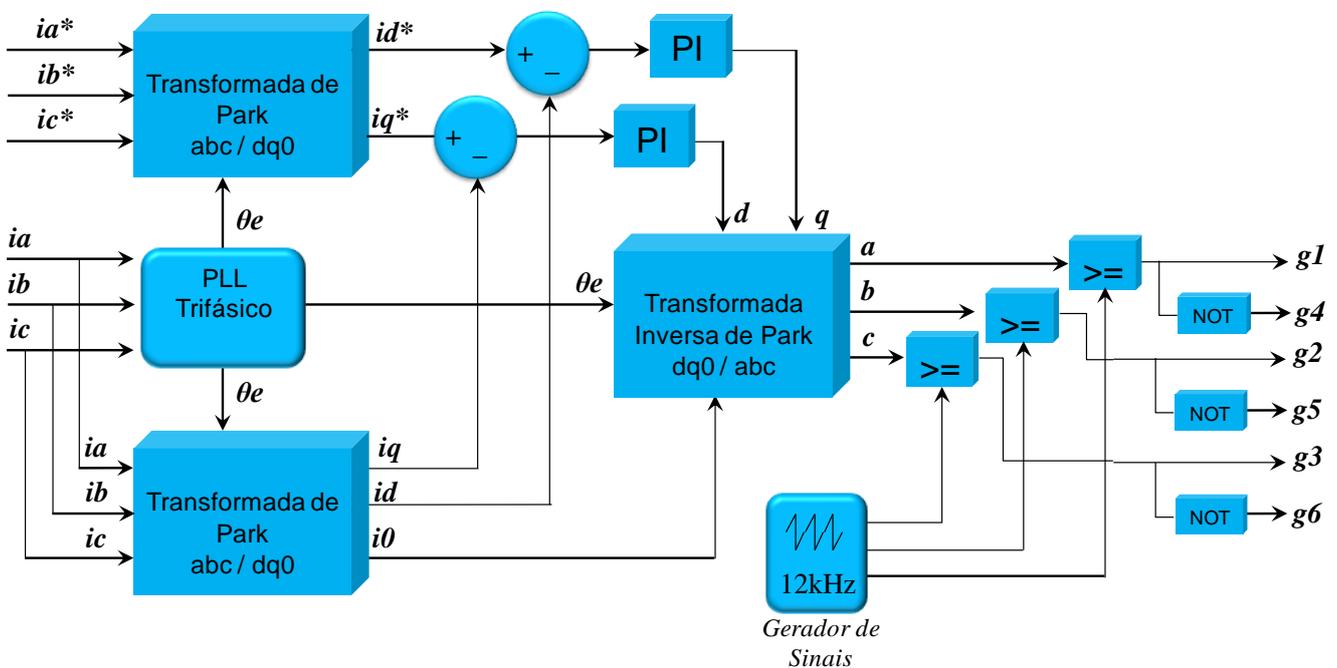


Figura 3.4 - Diagrama de blocos do controle vetorial de corrente

As correntes de referência calculadas através do controle do elo CC (Figura 3.3) são fornecidas como dados de entrada para o controlador vetorial (i_a^* , i_b^* e i_c^*), assim como as correntes de linha medidas (i_a , i_b e i_c). Os dois grupos de corrente passam por uma transformação de coordenadas do sistema abc para o sistema dq0 (Transformada de Park). Utiliza-se um PLL trifásico (phase locked loop) para identificar o ângulo elétrico das correntes de linha. As correntes i_d e i_q são comparadas com os valores de referência i_d^* e i_q^* . Em seguida passam por um controlador PI, antes de passarem pela transformação inversa de Park (dq0 para abc). Os valores resultantes das correntes abc são comparados com uma onda dente de serra de frequência igual a 12 kHz. Estes sinais são fornecidos aos “gates” dos IGBTs ($g1_4$, $g2_5$ e $g3_6$), que podem ser observados na Figura 3.5.

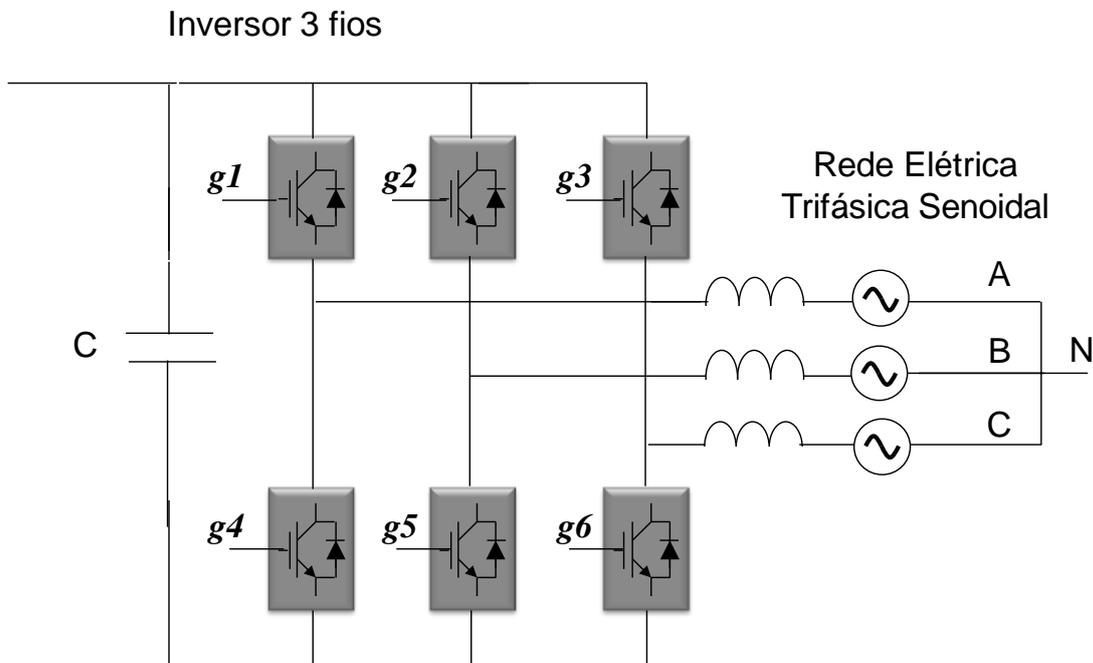


Figura 3.5 - Ponte conversora do lado da rede

Com o objetivo de verificar as diferenças entre as tensões trapezoidais apresentadas na Tabela 2.2 - Valores eficazes da onda trapezoidal, três sistemas de geração e controle foram propostos, utilizando a mesma máquina. Estes são apresentados nas seções 3.5, 3.6 e 3.7, que seguem.

3.5 Esquema 1 – Somente Fundamental

Esta configuração consiste em uma máquina síncrona de ímãs permanentes de 6,3kW nominais, com os enrolamentos de estator conectados em delta ou em estrela com neutro flutuante (sistema a 3 fios). O conversor a IGBTs neste caso é trifásico com três fios. Utiliza-se somente a componente fundamental das tensões trapezoidais nos cálculos do controle do conversor do lado do gerador (coluna 4 da Tabela 2.2).

A Tabela 3.1 mostra os valores percentuais das tensões trapezoidais considerando apenas a frequência fundamental (coluna “Só f1” marcada) para diversos ângulos α (de 0° a 90°). No capítulo 4 desta dissertação será apresentado ao leitor os resultados para simulações realizadas considerando ângulos de 0° (onda quadrada), 15° e 45° .

É esperado que os valores de potência obtidos com as simulações deste esquema sejam menores que os valores dos esquemas 2 (trapézio sem harmônicos 3n) e 3 (trapézio completo), já que estes possuem tensões com valores maiores que o caso presente.

Tabela 3.1 - Valores percentuais das tensões - Esquema 1 - Somente fundamental

α (°)	Valor Eficaz da Tensão		
	TOTAL	Sem 3n	Só f1
0°	139,98%	132,37%	127,32%
5°	138,68%	131,42%	127,16%
10°	136,06%	129,56%	126,68%
15°	133,33%	127,65%	125,87%
20°	130,52%	125,70%	124,75%
25°	127,65%	123,73%	123,32%
30°	124,72%	121,72%	121,59%
35°	121,71%	119,63%	119,55%
40°	118,63%	117,33%	117,23%
45°	115,47%	114,75%	114,63%
50°	112,22%	111,91%	111,77%
55°	108,87%	108,79%	108,65%
60°	105,41%	105,41%	105,30%
65°	101,83%	101,78%	101,72%
70°	98,13%	97,95%	97,93%
75°	94,28%	93,97%	93,95%
80°	90,27%	89,84%	89,80%
85°	86,07%	85,57%	85,50%
90°	81,65%	81,14%	81,06%

Obs.: Percentuais em relação ao valor eficaz de uma onda senoidal de amplitude unitária.

Analisando a Tabela 3.1 pode-se notar que para o ângulo de 0°, as tensões geradas pela máquina síncrona são 27,32% maior que a tensão RMS dada por uma onda senoidal de mesmo valor de pico que a onda trapezoidal. Se a tensão de fase de uma máquina com tensão senoidal fosse igual a 127V, o valor das tensões no caso trapezoidal seriam:

$$V_{rms_{trap}} = \frac{127,32}{100} \times V_{rms_{seno}}$$

$$V_{rms_{trap}} = 1,2732 \times 127 \cong 161,7V$$

Para ângulos α iguais a 15° e 45° os valores das tensões geradas são respectivamente 159,85V e 145,58V.

A Figura 3.6 mostra o circuito elétrico considerado no esquema 1.

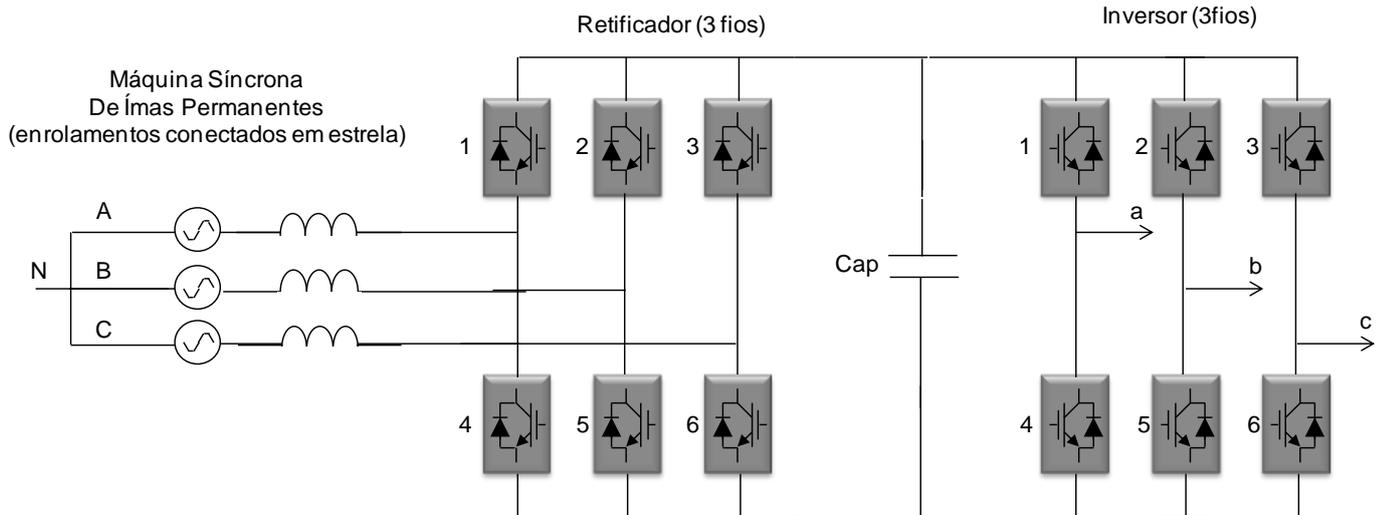


Figura 3.6 - Circuito elétrico - Esquema 1

O diagrama de blocos do controle dos IGBTs da ponte do lado do gerador é apresentado na Figura 3.7. Os valores das tensões de referência (e_a^* , e_b^* e e_c^*) são iguais à componente fundamental das tensões geradas pela máquina (e_a , e_b e e_c).

Uma comparação entre a tensão gerada pela máquina na fase a e sua componente fundamental é apresentada na Figura 3.8.

Os valores de referências das potências real e imaginária são constantes e valem 6300W e 0 vai, respectivamente.

Utilizando as tensões fundamentais e as potências de referência calcula-se as correntes necessárias para que o conversor forneça ao sistema potência ativa constante (\bar{p}).

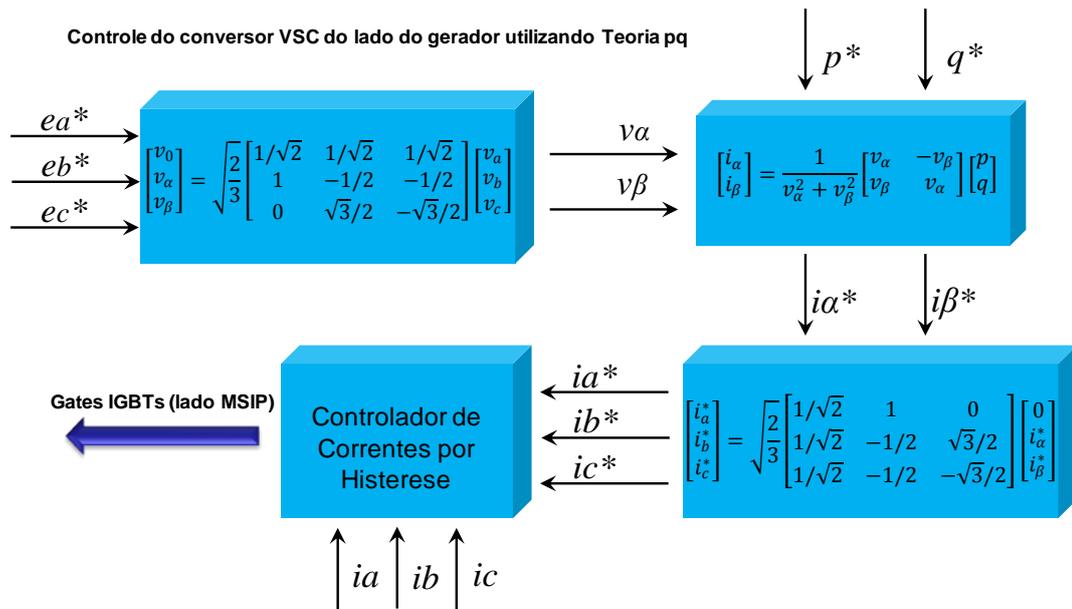


Figura 3.7 - Diagrama de blocos - controle do conversor do lado do gerador - Esquema 1

A seguir são listadas as principais características do Esquema 1:

- Não permite a circulação de correntes de sequência zero;
- As sequências positiva e negativa podem circular;
- Controle da ponte conversora do lado do gerador (retificador) utilizando teoria pq considerando somente a componente de frequência fundamental da tensão gerada pela máquina MSIP nos cálculos;
- A componente fundamental da tensão gerada apresenta valor eficaz maior que o de uma onda senoidal de mesma amplitude que a onda trapezoidal;
- Referência de potência constante para o controlador do lado do gerador. No caso de uso deste gerador em aproveitamento eólico esta seria calculada a partir da velocidade do vento FERREIRA [11].

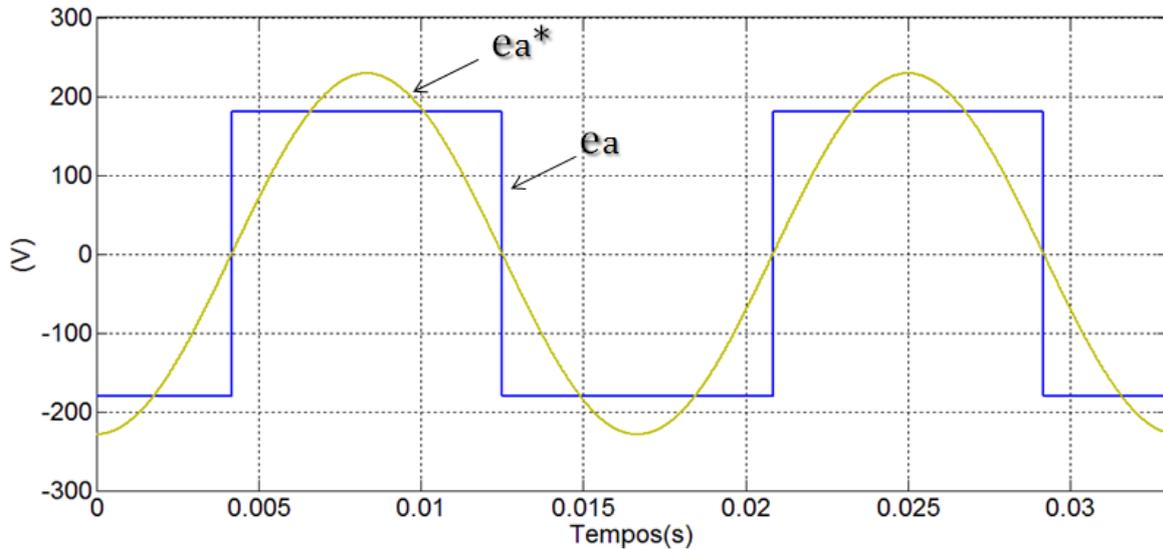


Figura 3.8 - Comparação tensão gerada e_a e sua componente fundamental para $\alpha = 0^\circ$

3.6 Esquema 2 – Sem Componentes de Sequência Zero

Neste esquema é usada a mesma máquina síncrona de ímã permanente de 6,3kW nominais, com os enrolamentos de estator conectados em estrela com neutro flutuante ou delta (sistema a 3 fios). O conversor a IGBTs neste caso é também trifásico, com três fios como no caso anterior. Utiliza-se a componente fundamental das tensões trapezoidais e também as componentes de sequência positiva e negativa nos cálculos do controle do conversor do lado do gerador (coluna 3 da Tabela 2.2). Apenas as componentes de sequência zero das tensões não são utilizadas (harmônicas múltiplas de 3), já que o sistema a 3 fios não permite a circulação de correntes deste tipo.

A Tabela 3.2 mostra os valores percentuais das tensões trapezoidais considerando a sua frequência fundamental e as componentes harmônicas de sequência positiva e negativa (coluna “Sem 3n” marcada) para diversos ângulos α (de 0° a 90°).

É esperado que os valores de potência obtidos com as simulações deste esquema sejam menores que os valores dos esquemas 3, porém maiores que os do esquema 1.

Tabela 3.2 - Valores percentuais das tensões - Esquema 2 – Controle considerando componente fundamental, harmônicos de sequência positiva e negativa

α (°)	Valor Eficaz da Tensão		
	TOTAL	Sem 3n	Só f1
0°	139,98%	132,37%	127,32%
5°	138,68%	131,42%	127,16%
10°	136,06%	129,56%	126,68%
15°	133,33%	127,65%	125,87%
20°	130,52%	125,70%	124,75%
25°	127,65%	123,73%	123,32%
30°	124,72%	121,72%	121,59%
35°	121,71%	119,63%	119,55%
40°	118,63%	117,33%	117,23%
45°	115,47%	114,75%	114,63%
50°	112,22%	111,91%	111,77%
55°	108,87%	108,79%	108,65%
60°	105,41%	105,41%	105,30%
65°	101,83%	101,78%	101,72%
70°	98,13%	97,95%	97,93%
75°	94,28%	93,97%	93,95%
80°	90,27%	89,84%	89,80%
85°	86,07%	85,57%	85,50%
90°	81,65%	81,14%	81,06%

Obs.: Percentuais em relação ao valor eficaz de uma onda senoidal de amplitude unitária.

Analisando a Tabela 3.2 pode-se notar que para o ângulo $\alpha=0^\circ$, a tensão RMS gerada pela máquina síncrona é 32,37% maior que uma tensão senoidal com mesmo valor de pico que a onda trapezoidal. Se a tensão de fase de uma máquina com tensão senoidal fosse igual a 127V, o valor da tensão no caso trapezoidal seria:

$$V_{rms_{trap}} = \frac{132,37}{100} \times V_{rms_{seno}}$$

$$V_{rms_{trap}} = 1,3237 \times 127 \cong 168,1V$$

Para ângulos α iguais a 15° e 45° os valores RMS das tensões trapezoidais geradas são, respectivamente, 162,11V e 145,73V.

O circuito elétrico deste caso é idêntico ao do esquema 1 apresentado na Figura 3.6.

Uma comparação entre a tensão gerada pela máquina na fase 'a' e a tensão de referência utilizada (excluindo-se as harmônicas $3n$) é apresentada na Figura 3.9.

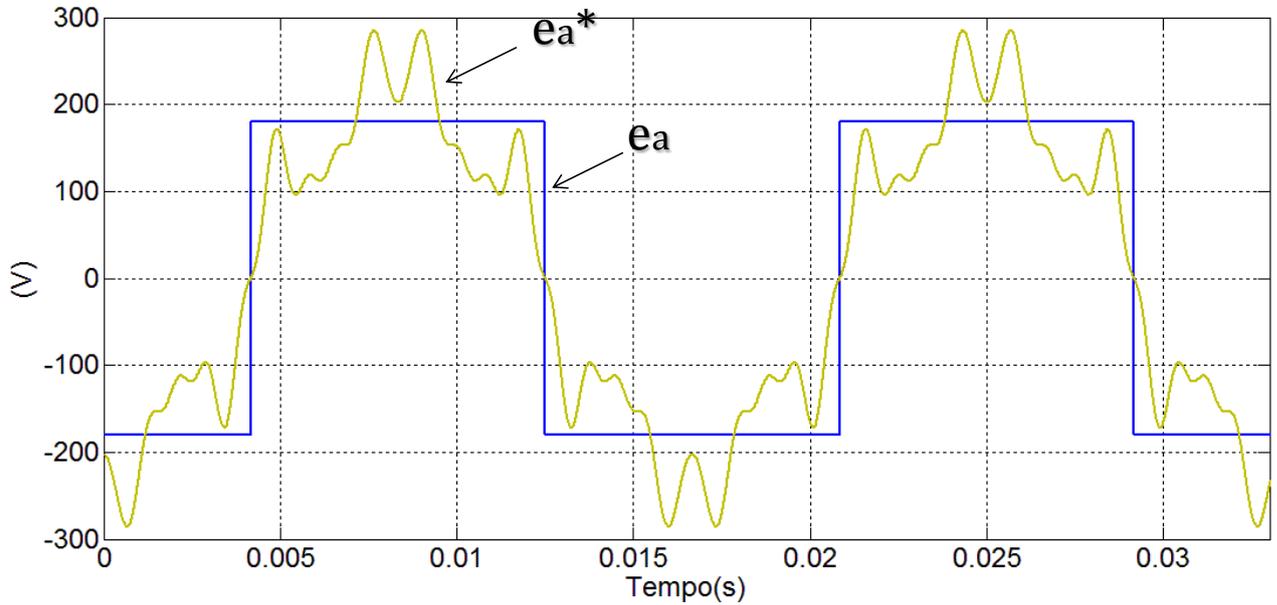


Figura 3.9 - Comparação tensão gerada e_a e a tensão trapezoidal sem os seus componentes $3n$

A seguir são listadas as principais características do esquema 2:

- Não permite a circulação de correntes de sequência zero;
- As seqüências positiva e negativa circulam;
- Controle da ponte conversora do lado do gerador (retificador) é baseado na teoria pq e utiliza a componente fundamental, harmônicos de seqüências positiva e negativa da tensão gerada pela máquina MSIP;
- A tensão de referência utilizada apresenta valor eficaz maior que o caso anterior (esquema 1);
- Referência de potência constante para o controlador do lado do gerador.

3.7 Esquema 3 – Trapézio Completo

Esquema 3 - máquina síncrona de ímãs permanentes de 6,3kW nominais, com os enrolamentos de estator conectados em estrela com neutro conectado (sistema a 4 fios). O conversor a IGBTs neste caso é trifásico, com quatro fios. Utiliza-se as tensões trapezoidais completas nos cálculos do controle do conversor do lado do gerador (coluna 1 da Tabela 2.2).

Tabela 3.3 - Valores percentuais das tensões trapezoidais completas - Esquema 3

α (°)	Valor Eficaz da Tensão		
	TOTAL	Sem 3n	Só f1
0°	139,98%	132,37%	127,32%
5°	138,68%	131,42%	127,16%
10°	136,06%	129,56%	126,68%
15°	133,33%	127,65%	125,87%
20°	130,52%	125,70%	124,75%
25°	127,65%	123,73%	123,32%
30°	124,72%	121,72%	121,59%
35°	121,71%	119,63%	119,55%
40°	118,63%	117,33%	117,23%
45°	115,47%	114,75%	114,63%
50°	112,22%	111,91%	111,77%
55°	108,87%	108,79%	108,65%
60°	105,41%	105,41%	105,30%
65°	101,83%	101,78%	101,72%
70°	98,13%	97,95%	97,93%
75°	94,28%	93,97%	93,95%
80°	90,27%	89,84%	89,80%
85°	86,07%	85,57%	85,50%
90°	81,65%	81,14%	81,06%

Obs.: Percentuais em relação ao valor eficaz de uma onda senoidal de amplitude unitária.

Analisando a Tabela 3.3 pode-se notar que para o ângulo $\alpha=0^\circ$, a tensão gerada pela máquina síncrona é aproximadamente 40% maior que a tensões senoidal gerada pela mesma máquina, considerando o mesmo valor de pico. Se a tensão de fase da máquina senoidal fosse igual a 127V, o valor da tensão no caso trapezoidal seria

$$V_{rms_{trap}} = \frac{139,98}{100} \times V_{rms_{seno}}$$

$$V_{rms_{trap}} = 1,3998 \times 127 \cong 177,77V$$

Para ângulos α iguais a 15° e 45° os valores das tensões geradas são respectivamente 169,33V e 146,65V.

A Figura 3.10 mostra o circuito elétrico considerado no esquema 3.

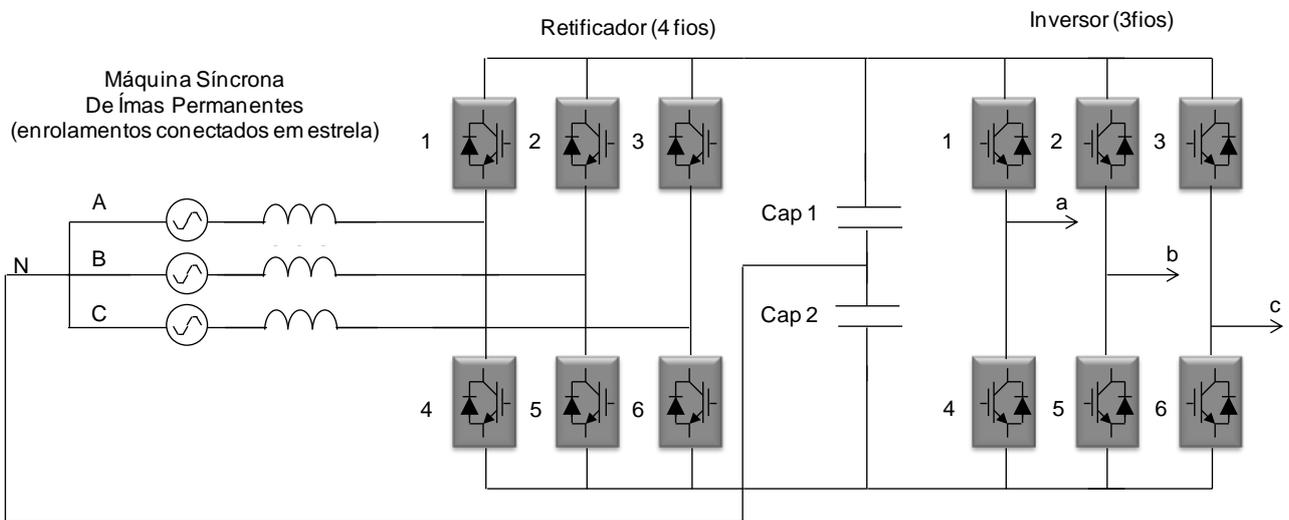


Figura 3.10 - Circuito Elétrico - Esquema 3 - Conversor VSC 4 Fios

O diagrama de blocos do controle dos IGBTs da ponte retificadora é apresentado na Figura 3.11. Os valores das tensões de referência (e_a^* , e_b^* e e_c^*) são iguais às tensões geradas pela máquina (e_a , e_b e e_c).

Os valores de referências das potências real e imaginária são constantes e valem 6300W e 0 vai, respectivamente. Porém neste caso será necessário acrescentar uma ordem de controle da potência de sequência zero. Este valor será melhor explicado no capítulo 4.

Utilizando as tensões fundamentais e as potências de referência calcula-se as correntes necessárias para que o conversor forneça ao sistema potência ativa constante (\bar{p}) e potência de sequência zero (p_0).

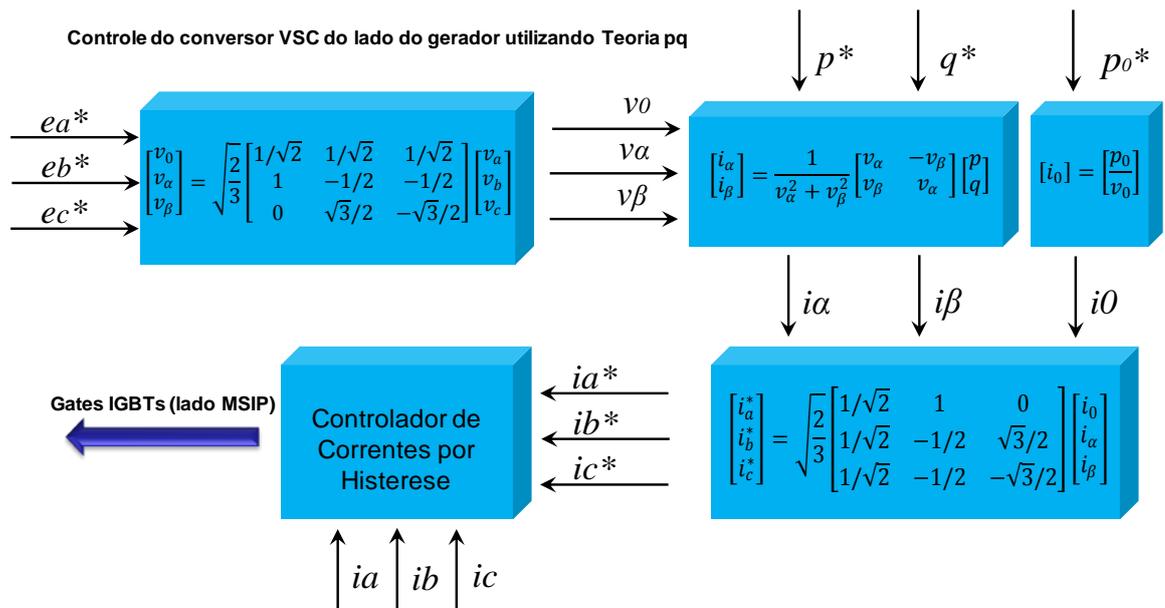


Figura 3.11 - Diagrama de blocos - controle do conversor do lado do gerador (Retificador) a 4 Fios

A seguir são listadas as principais características do esquema 3:

- Permite a circulação de correntes de sequência zero;
- Utilização de conversor trifásico 4 fios;
- Controle da ponte conversora do lado do gerador (retificador) utilizando teoria pq e tensões trapezoidais completas nos cálculos;
- A tensão de referência utilizada apresenta o maior valor eficaz dos casos em estudo;
- Referência de potência (\bar{p}) e (p_0) para o controlador do lado do gerador.

Capítulo 4 – Simulações e Resultados

Este capítulo apresenta uma série de simulações no domínio do tempo do sistema de geração de energia elétrica proposto. Para realizar estas simulações foram utilizados os modelos elétricos e estratégias de controle apresentados nos capítulos 2 e 3 desta dissertação.

Dois programas foram utilizados para realizar tais simulações. São eles: o programa de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC e o programa Matrix Laboratory (MATLAB) que é um programa interativo de alto desempenho voltado para o cálculo numérico.

Inicialmente o trabalho foi modelado e simulado no PSCAD/EMTDC. Porém este software apresenta a limitação de dispor apenas do modelo senoidal para o bloco correspondente à máquina síncrona de ímãs permanentes. Portanto, para os propósitos desta dissertação, o programa se mostrou inadequado.

Em seguida o modelo de geração de energia elétrica proposto por este trabalho foi implementado no aplicativo SIMULINK do MATLAB através da *toolbox* SimPowerSystems. Este aplicativo dispõe de um bloco de máquina síncrona de ímãs permanentes que pode funcionar como motor ou gerador e com tensões senoidais ou trapezoidais.

4.1 Modelo Elétrico da MSIP no SimPowerSystems

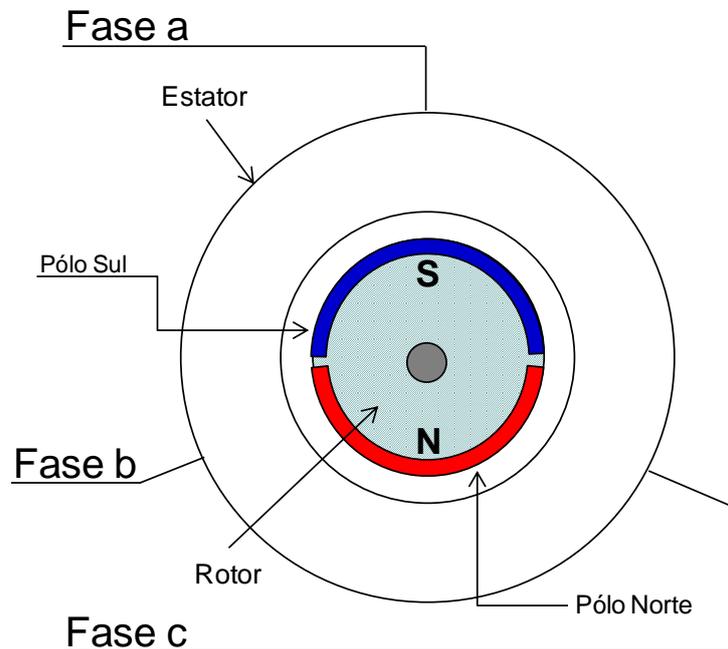


Figura 4.1 - Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes

De acordo com MATHWORKS [14] o bloco da MSIP do MATLAB pode operar nos modos de gerador ou motor. O funcionamento (como motor ou gerador) é determinado pelo sinal do torque mecânico aplicado (positivo para o modo de motor e negativo para o modo de gerador). As partes elétrica e mecânica da máquina são representadas cada uma por um modelo de segunda ordem em espaço de estado. O modelo senoidal assume que o fluxo criado pelos ímãs permanentes no estator é senoidal, o que implica que as forças eletromotrizes também são ondas senoidais, já que a tensão induzida (ou gerada) é igual a derivada no tempo do fluxo concatenado. Para a máquina com geração de tensão trapezoidal, o modelo assume que o fluxo magnético estabelecido pelos ímãs permanentes induz nos enrolamentos do estator forças eletromotrizes cujas formas de onda são do tipo trapezoidal.

Abaixo seguem as equações implementadas pelo bloco MSIP, de acordo com MATHWORKS [14].

4.1.1 - Modelo elétrico senoidal

As equações a seguir são expressas em relação às coordenadas dq fixas no rotor:

$$\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_r i_q, \quad (4.1)$$

$$\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q + \frac{L_d}{L_q}p\omega_r i_d - \frac{\lambda p\omega_r}{L_q}, \quad (4.2)$$

$$T_e = 1,5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q], \quad (4.3)$$

onde todas as quantidades no quadro de referência do rotor são referidas ao estator:

L_q, L_d – indutâncias nos eixos q e d, respectivamente;

R – resistência dos enrolamentos do estator;

i_q, i_d – correntes nos eixos q e d;

v_q e v_d – tensões nos eixos q e d;

ω_r – velocidade angular do rotor;

λ – amplitude do fluxo induzido pelos ímãs permanentes do rotor nos enrolamentos das fases do estator;

p – número de pares de pólos;

T_e – torque eletromagnético.

As indutâncias L_q e L_d representam a relação entre a indutância de fase e a posição do rotor, devido à saliência do rotor MATHWORKS [14]. Por exemplo, a indutância de fase medida entre a e b (fase c é deixada em aberto) é dada por:

$$L_{ab} = L_d + L_q + (L_q - L_d)\cos\left(2\theta_e + \frac{\pi}{3}\right), \quad (4.4)$$

onde θ_e representa o ângulo elétrico.

4.1.2 - Modelo Trapezoidal

Estas equações são expressas nas coordenadas abc. É importante ressaltar que neste modelo a indutância de fase L_s é assumida constante e não varia com a posição do rotor.

$$\frac{d}{dt} i_a = \frac{1}{3L_s} [2v_{ab} + v_{bc} - 3R_s i_a + \lambda p \omega_r (-2e_a + e_b + e_c)], \quad (4.5)$$

$$\frac{d}{dt} i_b = \frac{1}{3L_s} [-v_{ab} + v_{bc} - 3R_s i_b + \lambda p \omega_r (e_a - 2e_b + e_c)], \quad (4.6)$$

$$\frac{d}{dt} i_c = - \left(\frac{d}{dt} i_a + \frac{d}{dt} i_b \right), \quad (4.7)$$

$$T_e = p\lambda [e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c], \quad (4.8)$$

onde e_a , e_b e e_c são as tensões induzidas ou internas da máquina e são representadas por formas de onda trapezoidais, como pode ser observado na Figura 4.2.

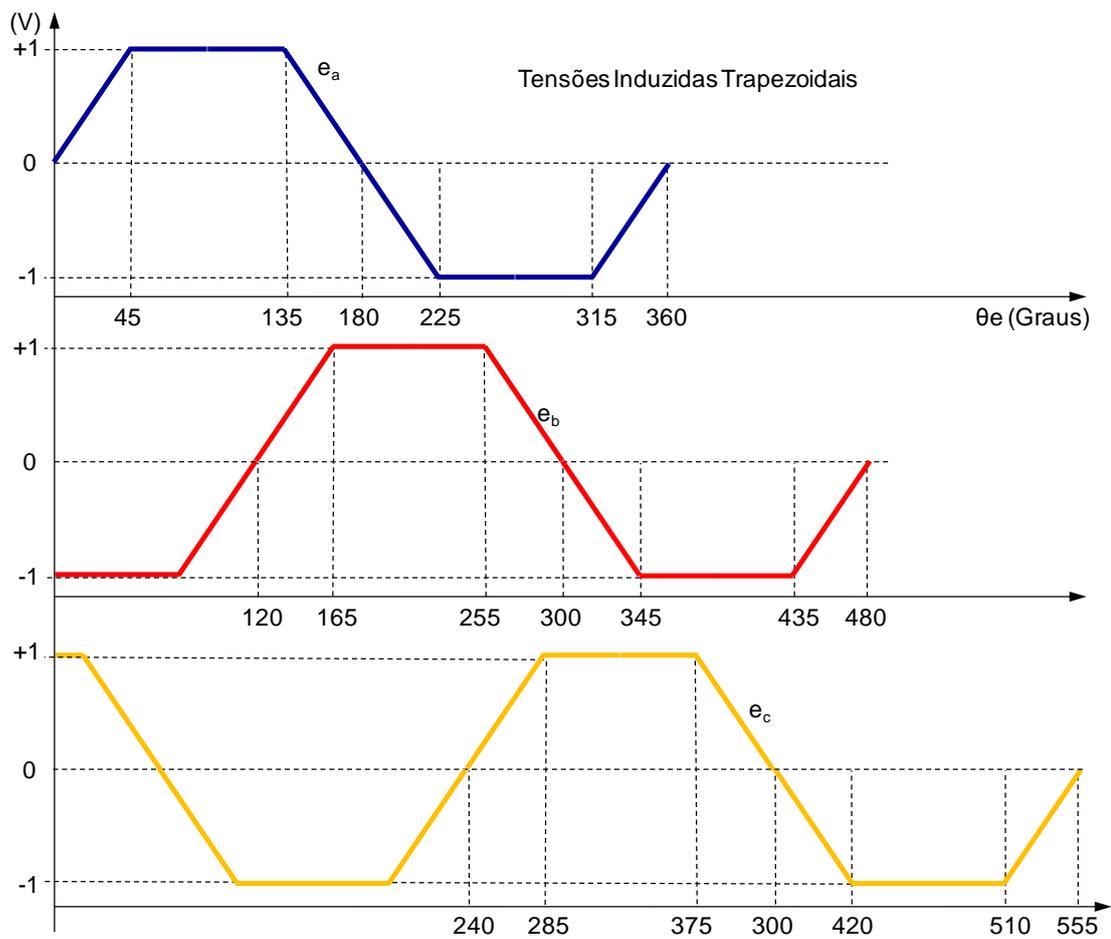


Figura 4.2 - Forças eletromotrizes - Modo Trapezoidal

onde:

L_s – indutância dos enrolamentos de estator;

R – resistência dos enrolamentos de estator;

i_a , i_b e i_c – correntes nas fases a, b e c;

v_{ab} , v_{bc} – tensões fase fase ab e bc;

λ – amplitude do fluxo induzido pelos ímãs permanentes do rotor nos enrolamentos das fases do estator;

Para modelar o sistema mecânico tem-se:

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_m - F\omega_r - T_e), \quad (4.9)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r, \quad (4.10)$$

onde:

J – inércia combinada do rotor e da carga;

F – coeficiente de viscosidade do rotor e da carga combinados;

θ – posição angular do rotor e

T_m – torque mecânico aplicado ao eixo do rotor.

É importante informar que MATHWORKS [14] menciona que o bloco da máquina síncrona de ímã permanente do MATLAB assume um circuito magnético linear sem saturação do núcleo do estator e rotor. De acordo com MATHWORKS [14], esta suposição pode ser assumida por causa do entreferro grande geralmente encontrado em máquinas síncronas de ímã permanente.

MATHWORKS [14] relata que o bloco da MSIP do MATLAB também possui algumas limitações. Quando a MSIP é utilizada em simulação numérica, uma pequena carga parasita resistiva deve ser conectada aos terminais da máquina, a fim de evitar oscilações numéricas. Tempos de amostragem grandes (da ordem de dezenas de micro segundos) requerem cargas que drenem mais corrente. A carga resistiva mínima é proporcional ao tempo de amostragem. Como uma regra geral, um passo de integração de 25 micro segundos, em um sistema de 60 Hz, a carga mínima é de, aproximadamente, 2,5% da potência nominal da máquina. Se o tempo discretizado de amostragem for de 50 micro segundos, a carga deverá ser igual a 5% da potência nominal da MSIP.

4.1.4 – Parâmetros da Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes

Na Tabela 4.1 encontram-se os parâmetros utilizados nas simulações da máquina síncrona de ímã permanente.

Tabela 4.1 - Parâmetros da MSIP Simulada

Parâmetros	Unidade	Valor
Resistência de fase do estador R_s	Ω	0,8
Indutância de fase do estador L_s	H	0,00064
Fluxo Magnético Produzido pelos Ímãs	Wb	0,5252
Área plana da força eletromotriz	graus	$180^\circ - 2\alpha$
Número de pares de pólos	-	2
Potência Nominal	kW	6,3
Valor RMS da Tensão de Linha Senoidal	V	220

O valor do fluxo magnético produzido pelos ímãs foi ajustado para que a máquina fornecesse 6,3kW quando conectada a uma carga puramente resistiva, operando com tensão senoidal de linha de 220V, na frequência de 60 Hz.

Sabe-se que, para uma máquina síncrona, a velocidade angular elétrica ω_e se relaciona com a velocidade angular mecânica, ω_m de acordo com a equação que segue:

$$\omega_e = p\omega_m, \quad (4.11)$$

onde p é o número de pares de pólos da máquina.

Como:

$$\omega_e = 2\pi f = 2\pi 60 = 120\pi$$

e p , para a máquina em estudo é igual a 2 pares de pólos, de acordo com a Tabela 4.1, o valor de ω_m é:

$$\omega_m = \frac{1}{p} \omega_e = \frac{1}{2} 2\pi 60 = 60\pi \cong 188,5 \text{ rad/s}$$

4.1.5 – Dimensionamento do capacitor do elo de corrente contínua

O dimensionamento do capacitor do elo de corrente contínua foi realizado através da constante de inércia do conversor, como segue:

$$S_{base_3\phi} = 10kVA - \text{potência aparente base do conversor};$$

$$V_{cc} = \sqrt{2}V_{linha} + \Delta V - \text{tensão do elo de corrente contínua};$$

$$V_{cc} = 500V;$$

$$H = 20ms - \text{constante de inércia do conversor definida por:}$$

$$H = \frac{\frac{1}{2}CV_{cc}^2}{S_{base_3\phi}}$$

$$20ms = \frac{\frac{1}{2}C500^2}{10000}$$

$$C = \frac{400}{500^2} \cong 1,6mF$$

4.2 Simulação Com Tensões Senoidais

Com o objetivo de verificar o funcionamento da máquina em regime permanente e possibilitar a comparação com os casos posteriores uma simulação do sistema de geração foi realizada considerando a MSIP com os enrolamentos de estator conectados em estrela e cujas tensões geradas são senoidais.

Na Figura 4.3 abaixo são apresentadas as tensões de fase internas geradas pela máquina síncrona de ímã permanente no caso de geração senoidal. Estas possuem valor eficaz de 127V, na frequência de 60Hz.

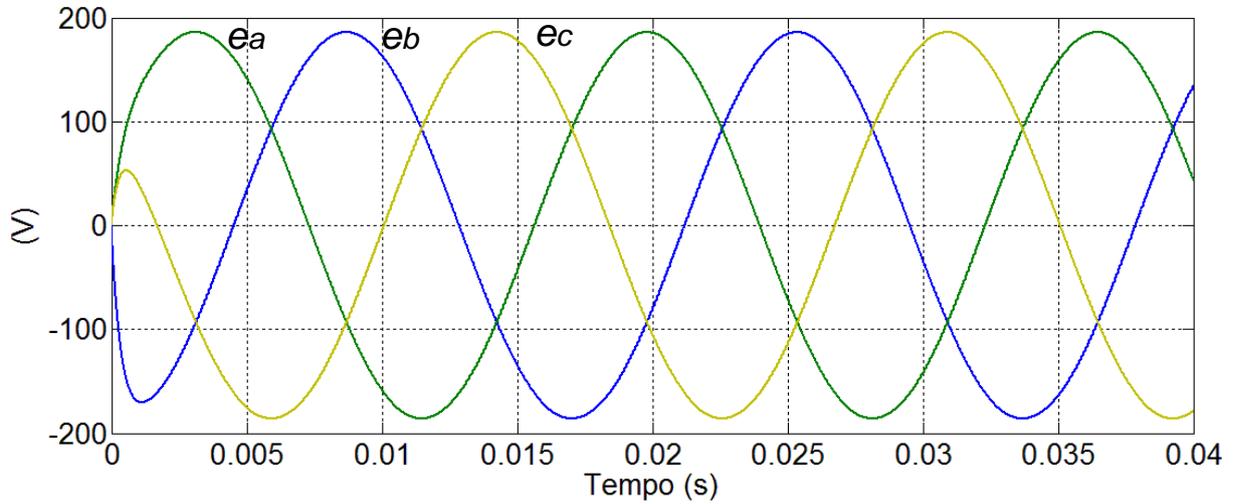


Figura 4.3 - Tensões geradas pela MSIP senoidal

A tensão do elo de corrente contínua foi controlada em 500V, como pode ser observado na Figura 4.4.

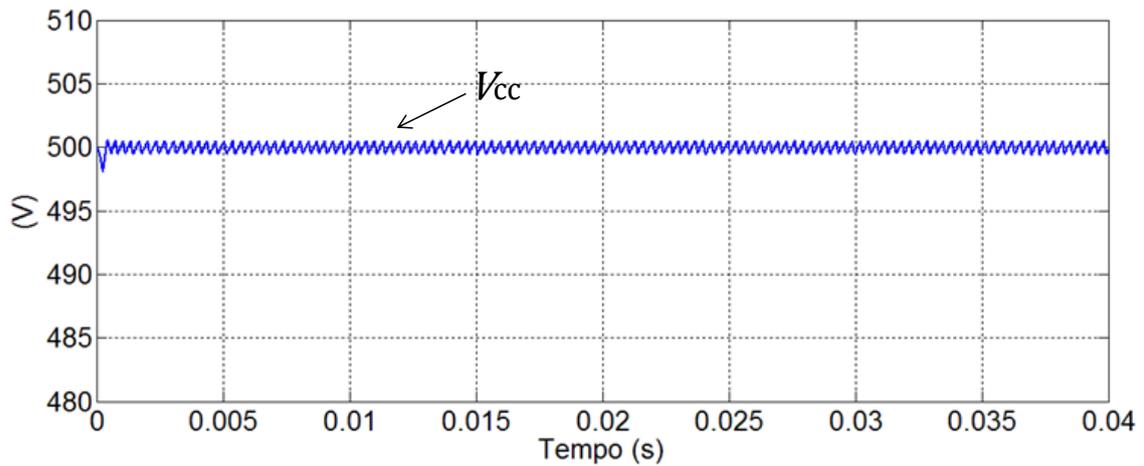


Figura 4.4 - Tensão no Elo de Corrente Contínua

Abaixo se encontram as correntes do controlador do lado do gerador (refência) e a corrente na fase “a” da máquina sintetizada pelo conversor.

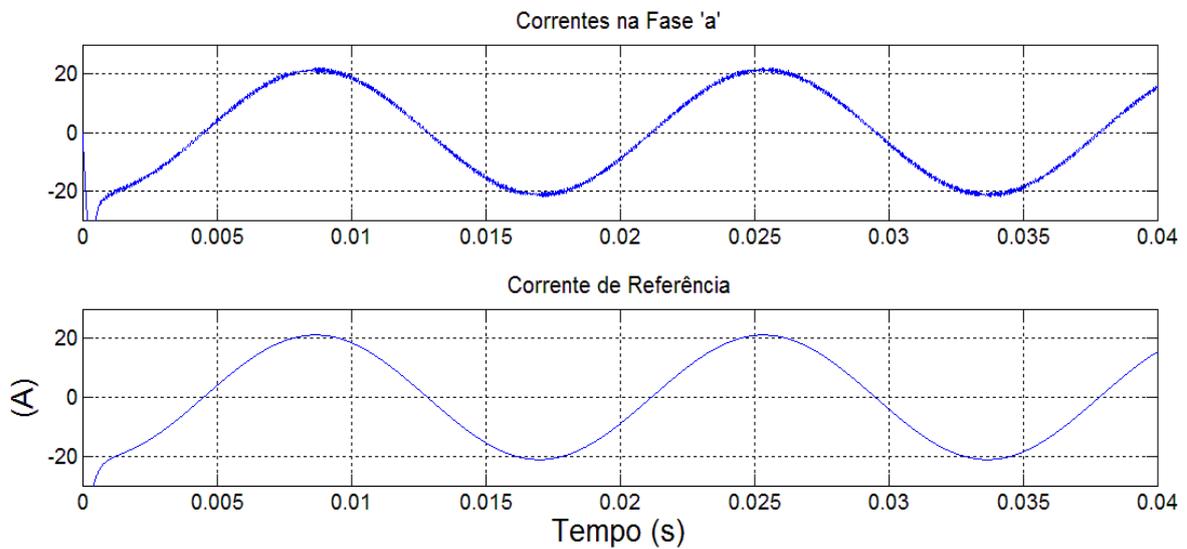


Figura 4.5 - Corrente sintetizada pelo conversor e sua referência

Conforme apresentado na seção 4.1.4, a velocidade angular da máquina utilizada foi de 188,5 rad/s. Isto pode ser verificado na Figura 4.6. É importante ressaltar que este valor foi mantido para todas as demais simulações que foram realizadas (casos trapezoidais, esquemas 1, 2 e 3).

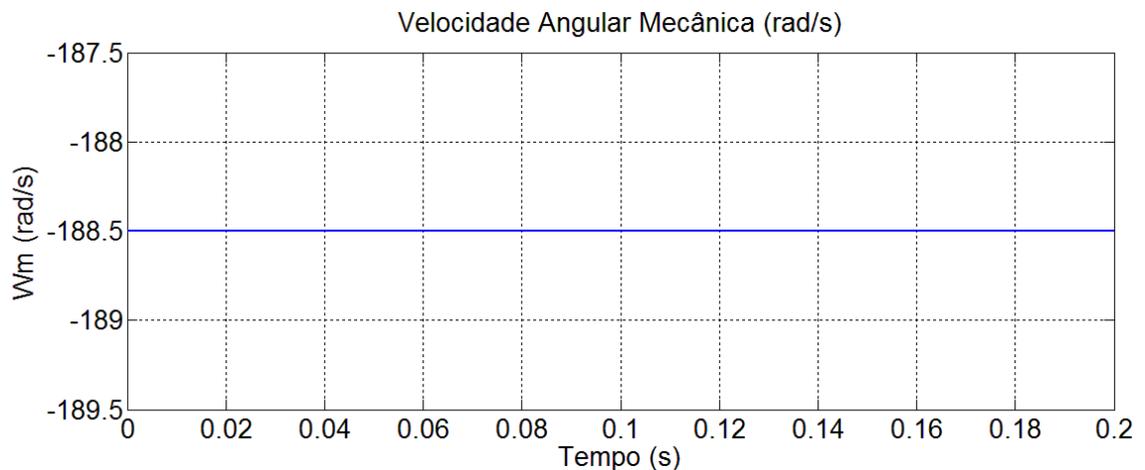


Figura 4.6 - Velocidade angular da máquina

A função do controle do conversor VSC do lado da rede elétrica é enviar à rede toda a potência ativa gerada pela máquina síncrona. Para isto foi realizado um controle vetorial das correntes de linha, conforme apresentado na Figura 3.4 do capítulo 3. As correntes sintetizadas pelo conversor do lado da rede são apresentadas.

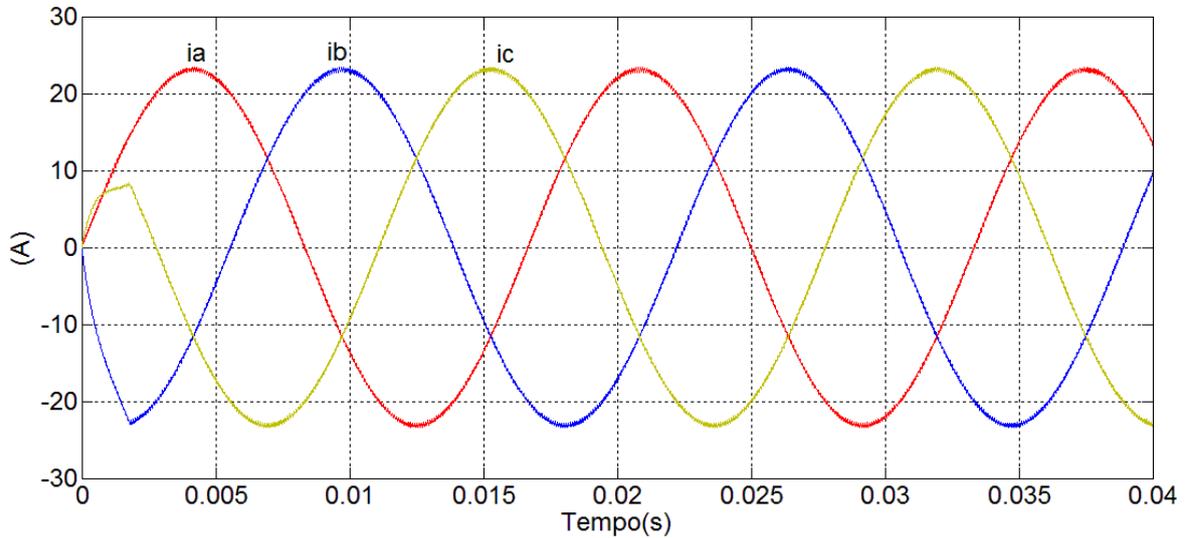


Figura 4.7 - Correntes sintetizadas pelo conversor da rede - Caso Senoidal

A máquina no caso de tensão senoidal gerou potência ativa igual a 6,3kW (nominal), com tensões de linha iguais a 220V, 60Hz. As correntes de linha do gerador foram iguais a 16,55A (mesmo valor de corrente que foi enviado para a rede elétrica).

Na Tabela 4.2 encontra-se o resumo das principais grandezas obtidas com a simulação do sistema de geração utilizando a máquina síncrona de ímã permanente com tensões senoidais.

Tabela 4.2 - Grandezas da MSIP medidas - Caso Senoidal

Grandezas Medidas	Seno
Potência Ativa (W)	6300
Tensão (V)	220V
Corrente (A)	16,55A

4.3 Fundamental

De acordo com a Tabela 2.2 apresentada no capítulo 2, sabe-se que o valor eficaz das ondas trapezoidais são maiores que o valor eficaz das ondas senoidais, para ângulos α de inclinação do trapézio menores que 65° .

Para cada esquema apresentado nas seções 3.5, 3.6 e 3.7, do capítulo 3, foram simulados sistemas de geração com α igual a 0° , 15° e 45° , respectivamente.

A máquina em estudo possui potência nominal de 6,3kW. No caso senoidal, para uma tensão de linha de 220V e inserindo no controle do conversor do lado do gerador apenas a referência de potência ativa constante igual à potência nominal da máquina, ou seja, máquina com fator de potência unitário, a corrente resultante foi de 16,55A. Como os valores eficazes das tensões trapezoidais para os ângulos supracitados são maiores que para o caso das tensões senoidais, é esperado que, nos casos trapezoidais, para a mesma referência de potência ativa (6300W) o valor das correntes de linha da máquina sejam inferiores aos valores do caso senoidal.

A Figura 4.8 mostra as correntes de linha do gerador simuladas para α igual a 0° . O valor eficaz destas foi de aproximadamente 13A (menor que a corrente no caso senoidal que foi de 16,55A).

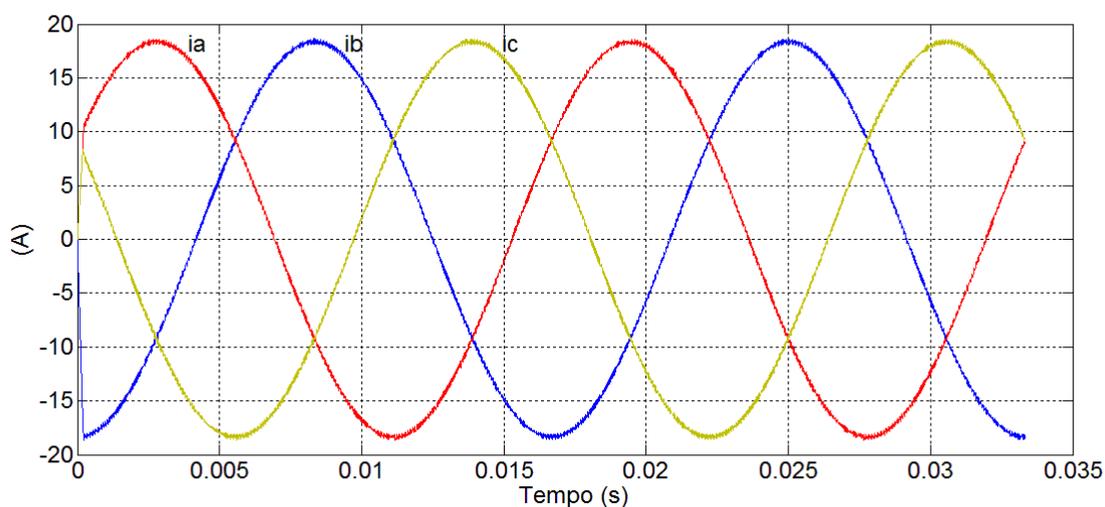


Figura 4.8 - Correntes de linha da MSIP - Caso Trapezoidal – $\alpha = 0^\circ$

Para simulações com ângulos α iguais a 15° e 45° as correntes de linha da máquina obtidas foram 13,14A e 14,29A, respectivamente. A Tabela 4.3 apresenta um resumo com os valores das correntes obtidas com as simulações realizadas utilizando como referência de potência ativa a potência nominal da máquina (6,3kW).

Tabela 4.3 - Grandezas da MSIP medidas – Caso Trapezoidal – $\alpha = 0^\circ, 15^\circ$ e 45°

Grandezas Medidas	Trapezoidal $\alpha = 0^\circ$
Potência Ativa (W)	6300
Tensão (V)	280,10
Corrente (A)	12,99

Grandezas Medidas	Trapezoidal $\alpha = 15^\circ$
Potência Ativa (W)	6300
Tensão (V)	276,91
Corrente (A)	13,14

Grandezas Medidas	Trapezoidal $\alpha = 15^\circ$
Potência Ativa (W)	6300
Tensão (V)	252,19
Corrente (A)	14,29

Nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 são apresentadas as tensões internas da máquina para as simulações realizadas com ângulos de inclinação do trapézio (α) iguais a 0° , 15° e 45° , respectivamente.

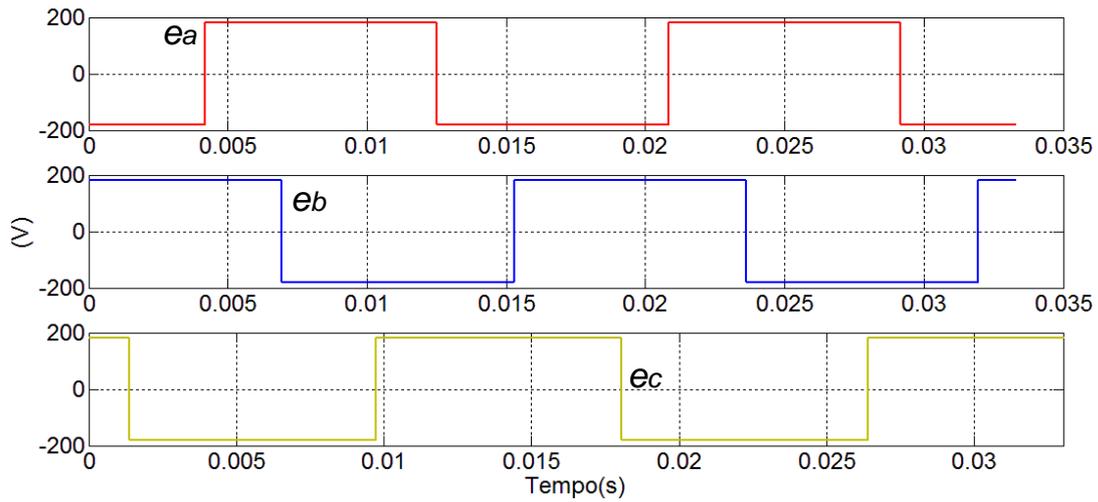


Figura 4.9 - Tensões geradas pela MSIP com tensão trapezoidal – $\alpha = 0^\circ$

As tensões com α igual a 0° são o caso extremo da onda trapezoidal com maior valor eficaz (onda quadrada).

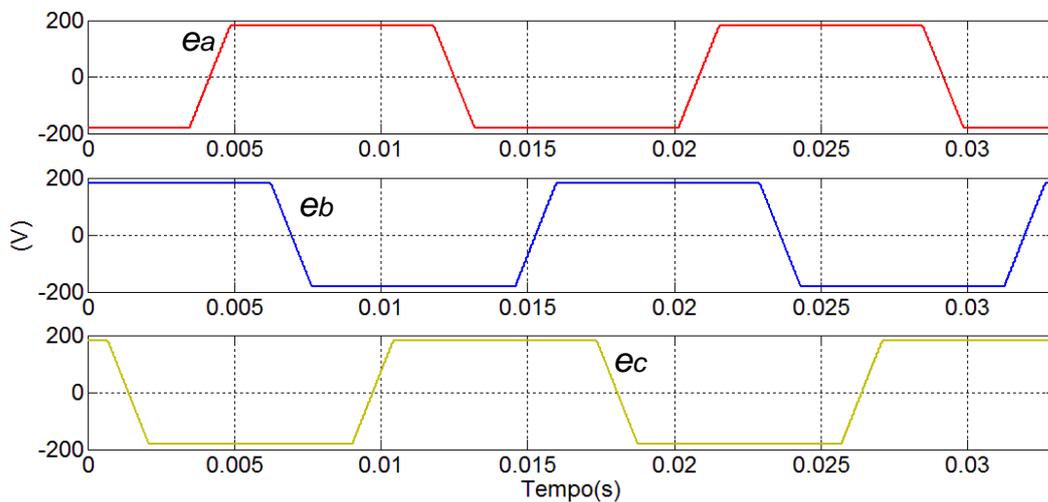


Figura 4.10 - Tensões geradas pela MSIP com tensão trapezoidal - $\alpha = 15^\circ$

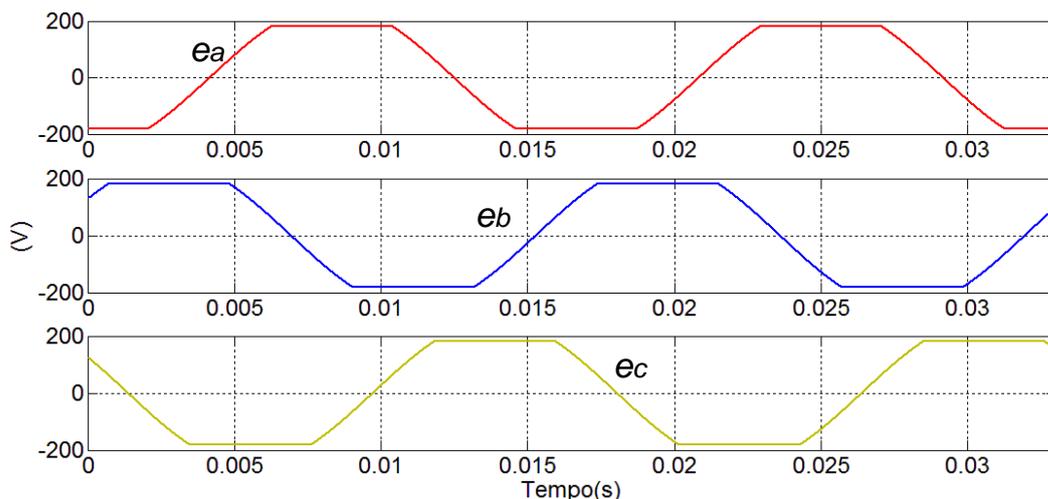


Figura 4.11 - Tensões geradas pela MSIP com tensão trapezoidal - $\alpha = 45^\circ$

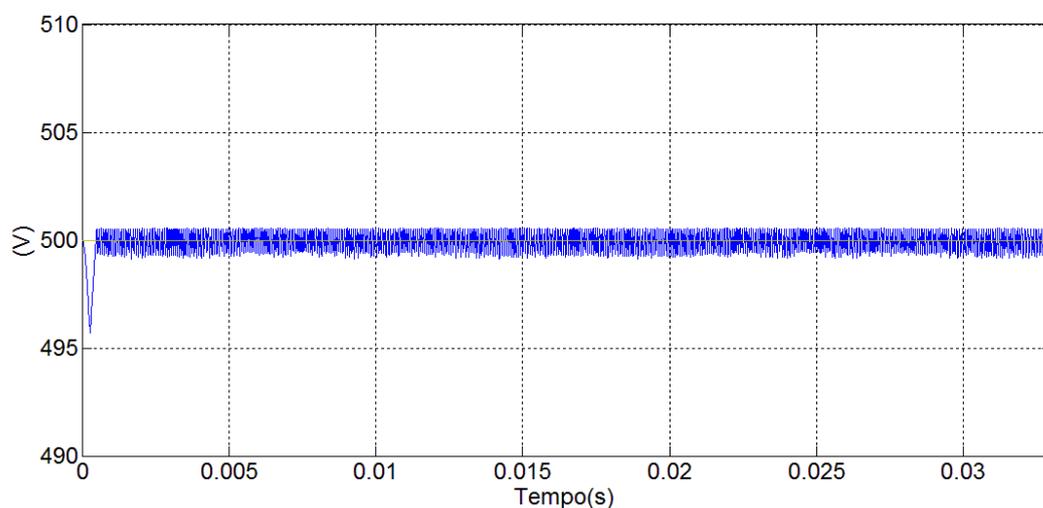


Figura 4.12 - Tensão do elo de corrente contínua - Caso Trapezoidal

Com o objetivo de extrair maior potência da MSIP no caso de tensão trapezoidal, modificou-se a referência de potência ativa elevando-a até que a corrente eficaz de linha da máquina fosse igual à corrente no caso de tensão senoidal, ou seja, até que a corrente atingisse o valor de 16,55A. Esta modificação é factível uma vez que os enrolamentos da máquina suportam correntes com valor eficaz de 16,55^a

Na prática a corrente para o caso de geração trapezoidal deve ter de ser limitada a valores menores que para o caso de tensão senoidal. Esse fato é explicado pelo fato de

que a corrente para o caso trapezoidal tem significativo conteúdo harmônico e isso faz aumentar as perdas por efeito pelicular nos condutores, assim como pode aumentar as perdas no núcleo magnético da máquina. Porém, de toda maneira é óbvio que a potência que pode ser gerada com tensão trapezoidal é claramente maior que no caso de tensão senoidal.

As correntes obtidas de 13A, 13,14A e 14,29A para as simulações com α igual a 0° , 15° e 45° , respectivamente, foram aumentadas para 16,55A.

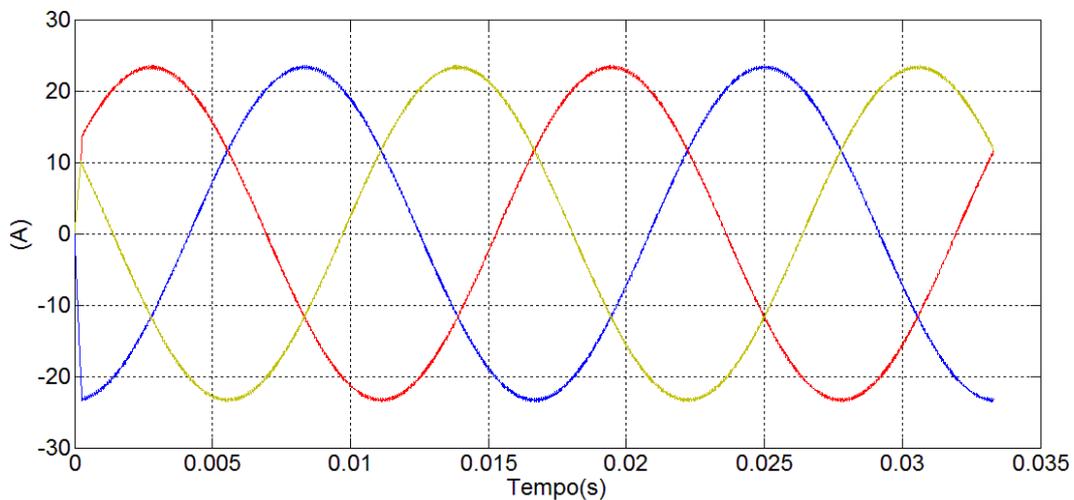


Figura 4.13 - Correntes de linha máximas da MSIP - Caso Trapezoidal – $\alpha = 0^\circ$, 15

O gráfico com a potência real instantânea obtida para o caso trapezoidal com α igual a 0° é mostrado na Figura 4.14 abaixo.

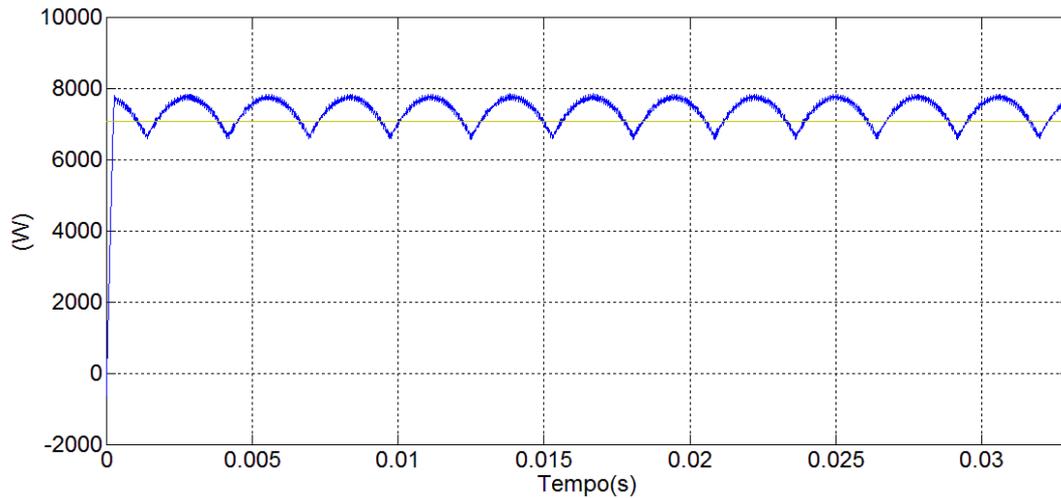


Figura 4.14 - Potência real instantânea - Caso Trapezoidal - $\alpha=0^\circ$

O valor médio da potência real instantânea para o caso de tensão trapezoidal e corrente senoidal foi de aproximadamente 7,3kW, ou seja, cerca de 17% maior que a potência gerada no caso de tensão senoidal com corrente senoidal.

Nota-se, portanto, que a potência extraída da máquina foi aumentada nos casos trapezoidais. Os valores obtidos para diferentes ângulos α são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Potências ativas geradas - comparações Esquema 1

α (°)	p(W)	p(w)/P
0°	7374	117,05%
15°	7181	113,98%
45°	6653	105,60%
Tensão Senoidal	6300	100,00%

onde P=potência para geração senoidal.

4.4 Controle sem harmônicos múltiplos de 3

Nesta seção são apresentados os resultados de simulações considerando como referência para o controle do conversor do lado do gerador as tensões trapezoidais sem as componentes de sequência zero, já que o circuito elétrico deste esquema não permite a circulação de correntes dessa natureza, conforme explicado no item 3.6 do capítulo 3.

Da mesma forma que na seção 4.3, a referência de potência foi modificada para que as correntes da máquina fossem elevadas até o valor máximo de 16,55A (valor eficaz do caso senoidal).

As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam uma comparação das tensões de referência para o controle do lado do gerador com as tensões trapezoidais geradas pela máquina.

As tensões utilizadas no controle (ea^*) foram obtidas excluindo-se das tensões trapezoidais as harmônicas múltiplas de 3 (sequência zero).

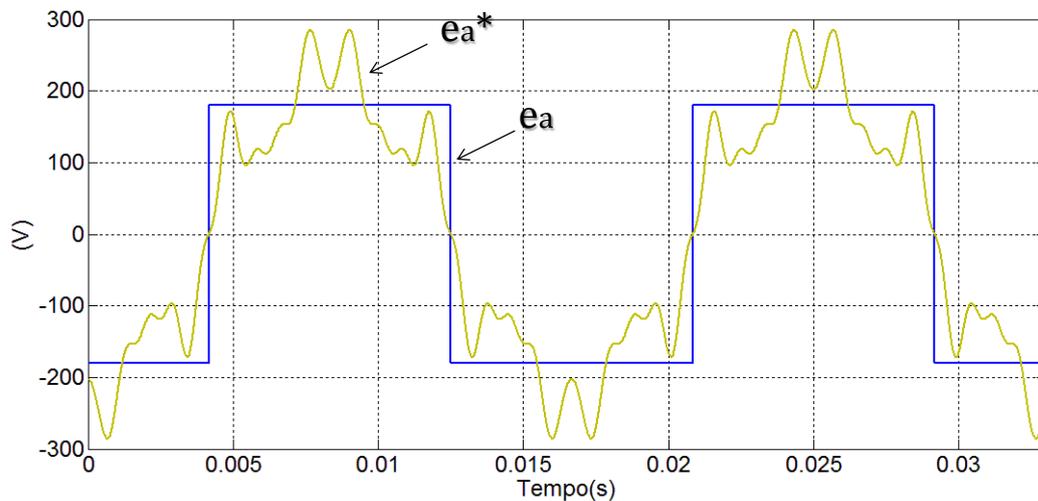


Figura 4.15 - Tensão trapezoidal (quadrada) e tensão de controle do gerador – $\alpha=0^\circ$

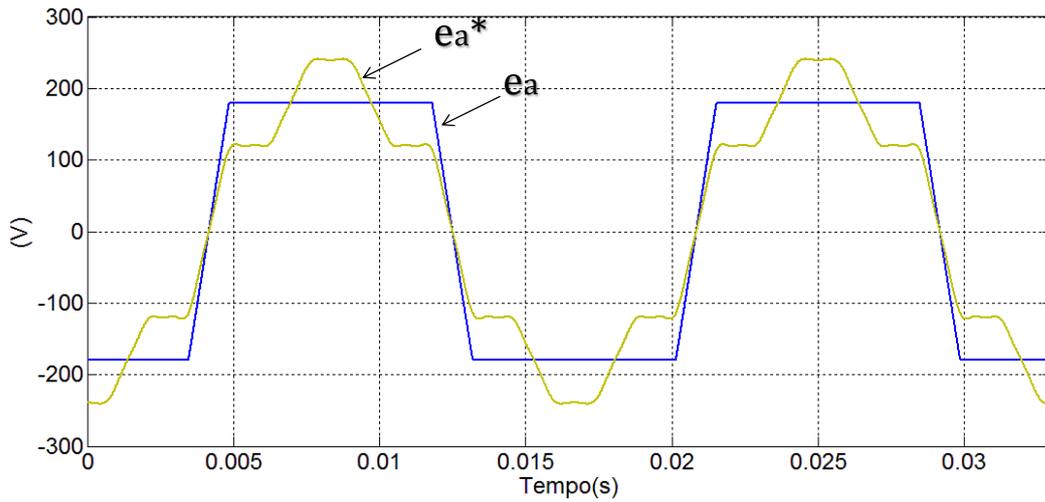


Figura 4.16 - Tensão trapezoidal e tensão de controle do gerador $-\alpha=15^\circ$

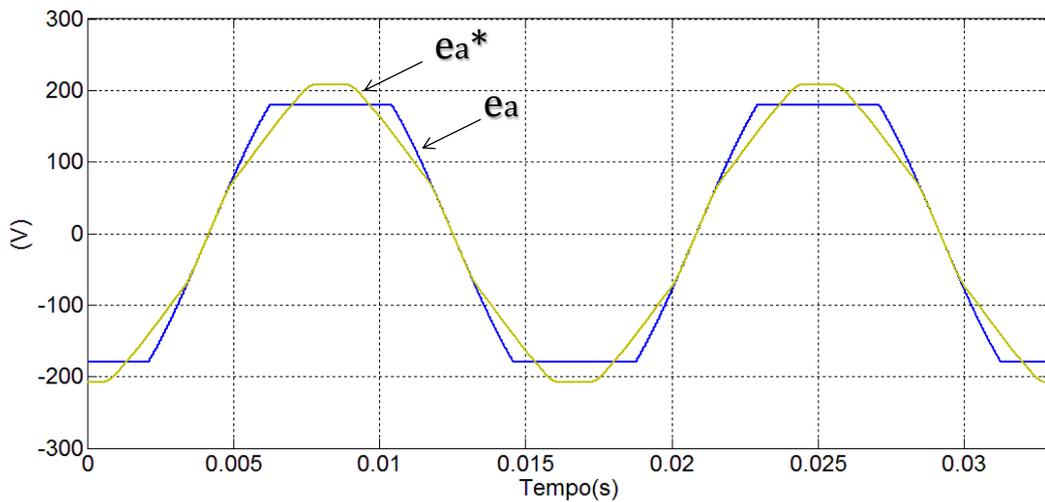


Figura 4.17- Tensão trapezoidal e tensão de controle do gerador $-\alpha=45^\circ$

As formas de onda das correntes de linha da máquina síncrona de ímãs permanentes obtidas para as simulações com α igual a 0° , 15° e 45° são apresentadas nas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20, respectivamente. É importante ressaltar que estas possuem valor eficaz igual a 16,55A.

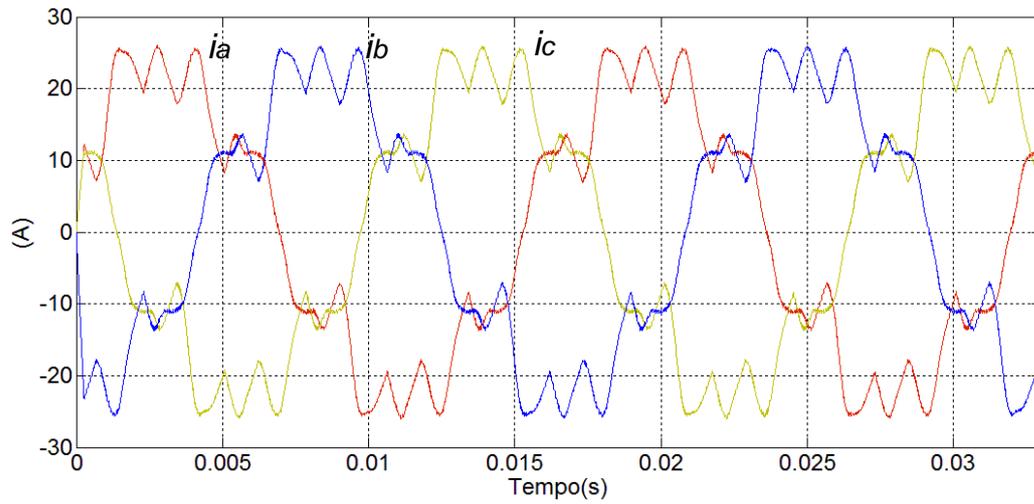


Figura 4.18 - Correntes de linha máximas da MSIP - Caso Trapezoidal – $\alpha=0^\circ$

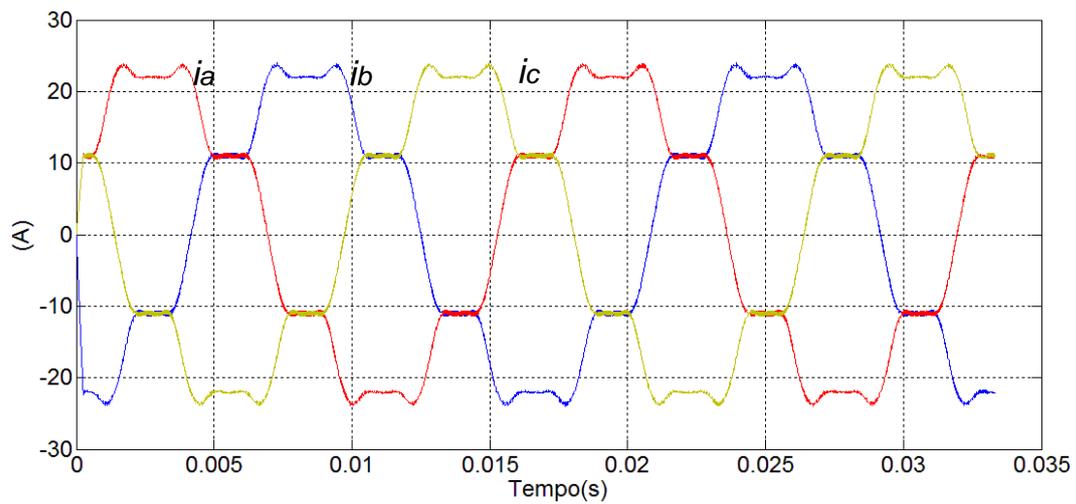


Figura 4.19 - Correntes de linha máximas da MSIP - Caso Trapezoidal – $\alpha=15^\circ$

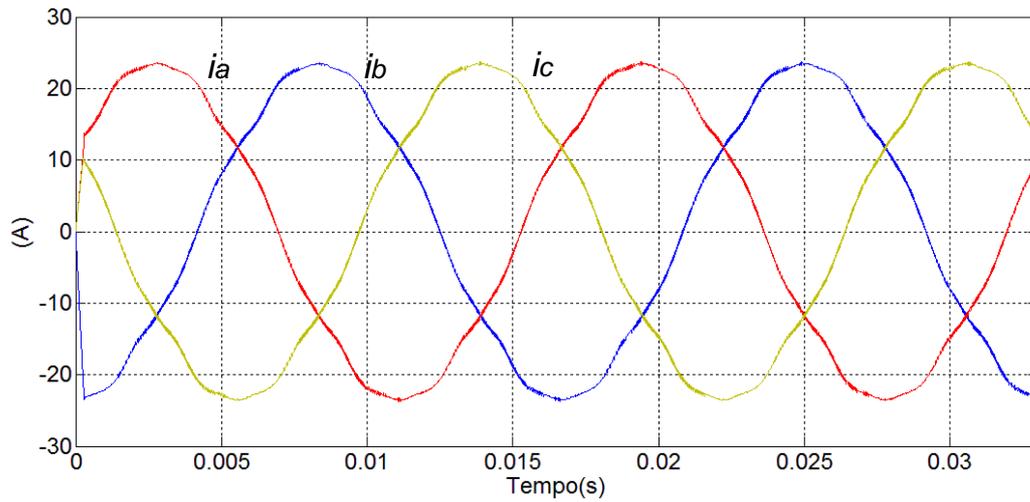


Figura 4.20 - Correntes de linha máximas da MSIP - Caso Trapezoidal – $\alpha=45^\circ$

Os gráficos com as potências reais instantâneas obtidas para o Esquema 2 (sem sequência zero) do caso trapezoidal com α igual a 0° , 15° e 45° são mostrados nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23.

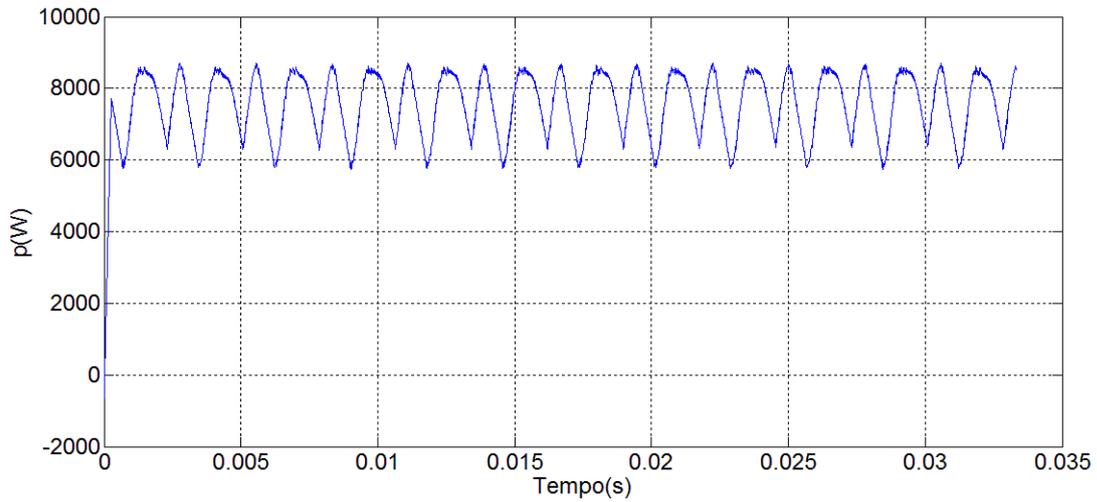


Figura 4.21 - Potência real instantânea - Caso Trapezoidal Sem Sequência Zero - $\alpha= 0^\circ$

O valor médio da potência real instantânea da Figura 4.21 é de aproximadamente 7,5kW, ou seja, cerca de 19% maior que a potência gerada no caso senoidal.

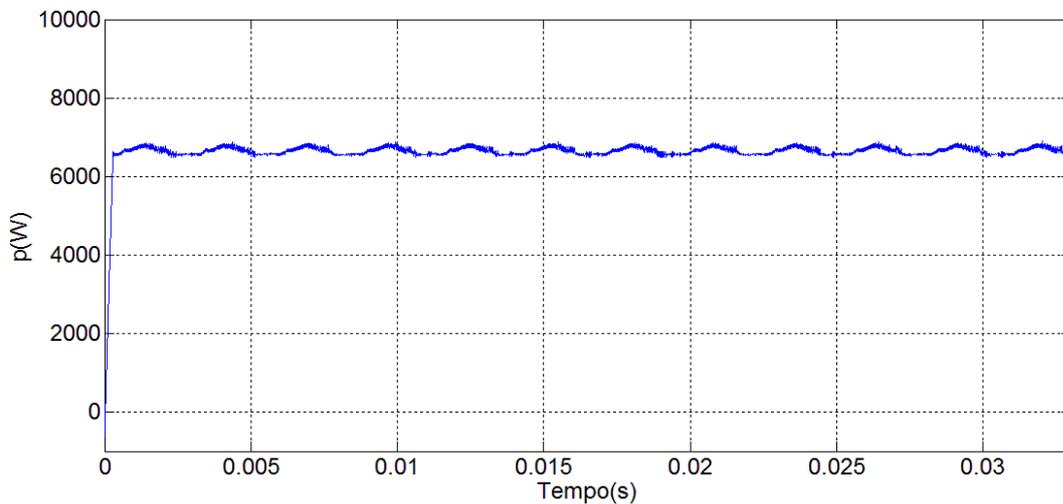


Figura 4.22 - Potência real instantânea - Caso Trapezoidal Sem Sequência Zero - $\alpha= 15^\circ$

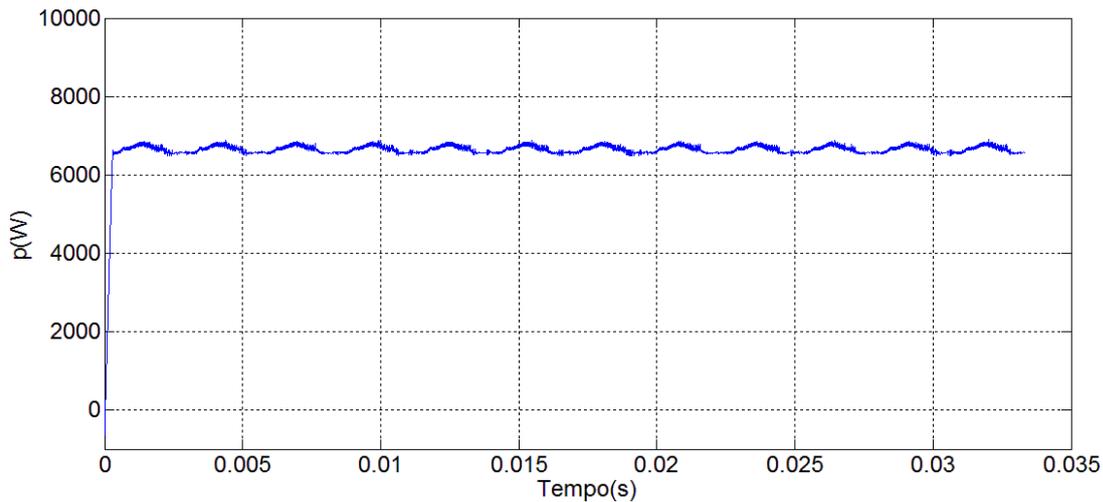


Figura 4.23 - Potência real instantânea - Caso Trapezoidal Sem Sequência Zero - $\alpha = 45^\circ$

Observando os gráficos apresentados percebe-se que a potência extraída da máquina foi aumentada nos casos de tensões trapezoidais para este Esquema 2 (sem sequência zero, porém com harmônicos de sequências positiva e negativa). Nota-se ainda que estes valores são maiores que os apresentados na seção 4.3 (Esquema 1 – somente fundamental), quando comparados os esquemas 1 e 2 com seus respectivos ângulos α . Isto é, para o Esquema 1 e α igual a 0° , por exemplo, obteve-se 7,3kW de potência gerada (17% maior que o caso senoidal) e para o Esquema 2, com o mesmo α (0°), obteve-se 7,5kW (19% maior que o caso senoidal).

Os valores de potência obtidos com as simulações do Esquema 2 para diferentes ângulos α do trapézio são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Potências ativas geradas - comparações do Esquema 2

α ($^\circ$)	p(W)	p(w)/P
0°	7509	119,19%
15°	7301	115,89%
45°	6636	105,33%
Tensão Senoidal	6300	100,00%

4.5 Trapézio Completo

Nesta seção são apresentados os resultados para simulações considerando como referência para o controle do conversor do lado do gerador as tensões trapezoidais completas, utilizando as componentes de sequência positiva, negativa e zero, pois o circuito elétrico trifásico a 4 fios deste esquema possibilita a circulação de correntes de sequência zero, conforme explicado na seção 3.7 do capítulo 3.

Da mesma forma que nas seções 4.3 e 4.4, a referência de potência foi modificada. Neste caso, porém, uma referência de potência de sequência zero foi inserida no controle apresentado na Figura 3.11 - Diagrama de blocos - controle do conversor do lado do gerador (Retificador) a 4 Fios. Este valor foi calculado de forma que a corrente resultante ($i+i_0$) fosse igual à corrente nominal da máquina no caso senoidal (16,55A).

As tensões geradas pela máquina são idênticas às apresentadas nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 da seção 4.3. As correntes de linha são bastante diferentes devido à presença dos harmônicos múltiplos de $3n$.

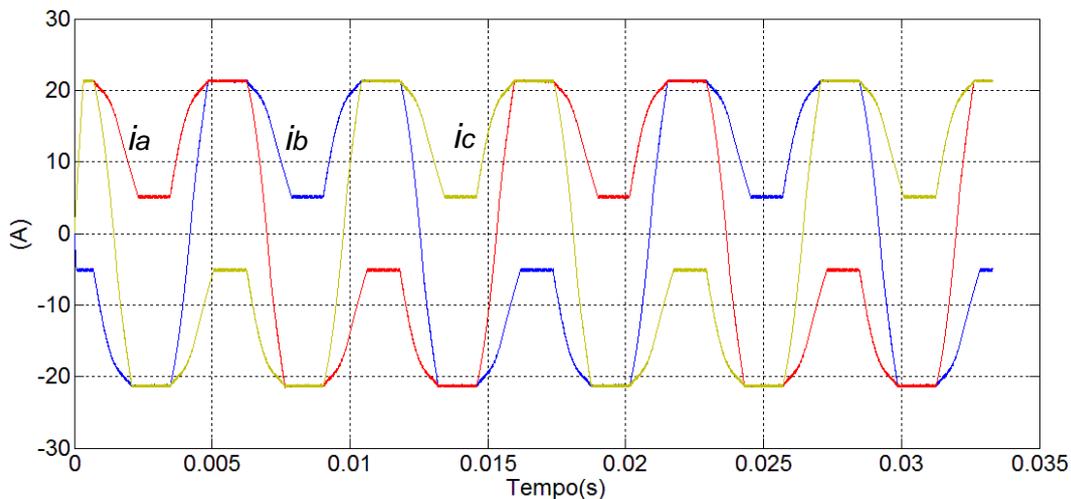


Figura 4.24 - Correntes de linha máximas da MSIP - Caso Trapezoidal, Esquema 3
– $\alpha=15^\circ$

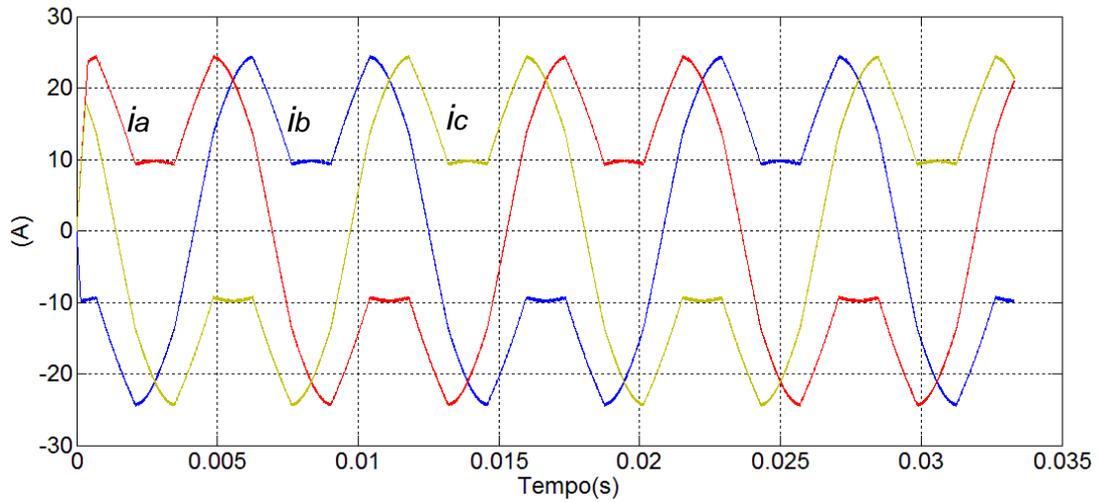


Figura 4.25 - Correntes de linha máximas da MSIP - Caso Trapezoidal, Esquema 3
 – $\alpha=45^\circ$

Apesar das correntes geradas apresentarem elevado conteúdo harmônico, as correntes de linha que são enviadas para a rede elétrica são praticamente senoidais. Isto é possível graças a utilização do conversor VSC *back-to-back* com controle independente para os lados do gerador e da rede.

Na Figura 4.26 abaixo são apresentadas as correntes sintetizadas pelo conversor do lado da rede de energia elétrica.

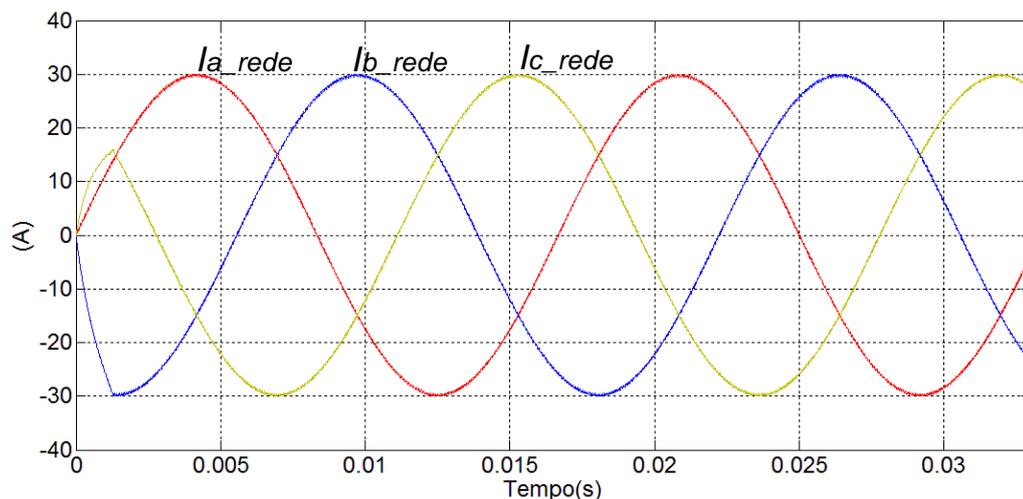


Figura 4.26 - Correntes sintetizadas pelo conversor da Rede - Caso Trapezoidal, Esquema 3, $\alpha=0^\circ$

Os gráficos com as potências reais instantâneas obtidas para o esquema 3 (sequências positiva, negativa e zero) do caso trapezoidal com α igual a 0° , 15° e 45° são mostrados nas Figuras 4.27, 4.28 e 4.29.

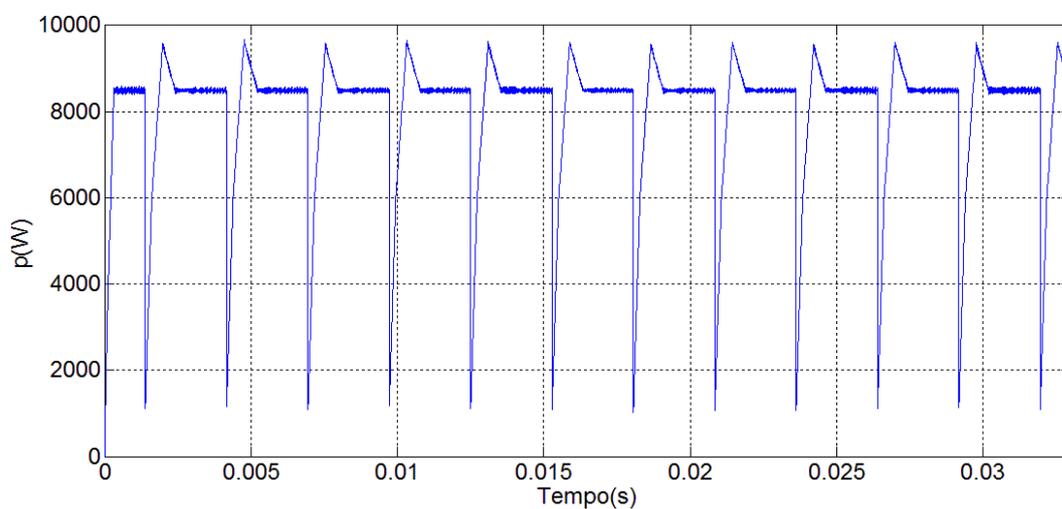


Figura 4.27 - Potência real instantânea - Caso Trapezoidal, Esquema 3 - $\alpha=0^\circ$

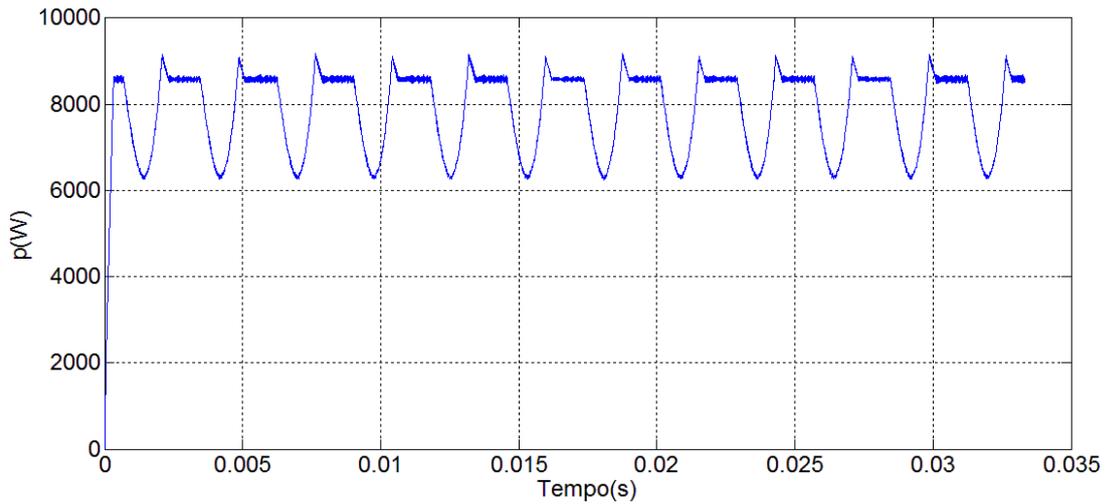


Figura 4.28 - Potência real instantânea - Caso Trapezoidal, Esquema 3 - $\alpha = 15^\circ$

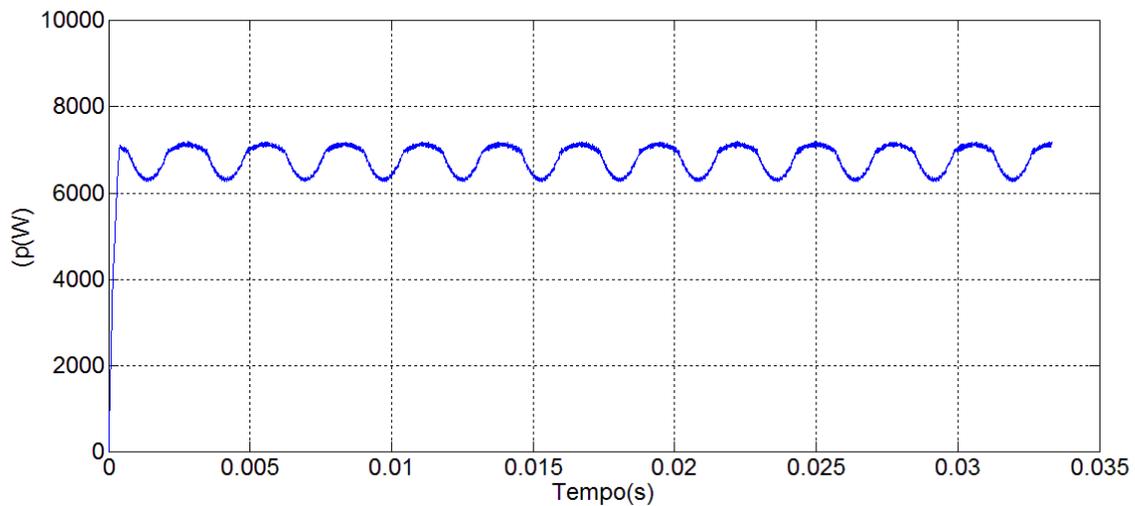


Figura 4.29 - Potência real instantânea - Caso Trapezoidal, Esquema 3 - $\alpha = 45^\circ$

Como pode ser observado nas Figuras 4.27, 4.28 e 4.29, a potência extraída da máquina utilizando um circuito trifásico a quatro fios, em conjunto com um conversor também a quatro fios, apresenta valores maiores que às obtidas nos casos das seções 4.2, 4.3 e 4.4. Por exemplo, para o Esquema 1 e α igual a 0° obteve-se 7,3kW de potência gerada (17% maior que o caso senoidal), para o Esquema 2, com o mesmo α

(0°), obteve-se 7,5kW (19% maior que o caso senoidal) e para o esquema 3 obteve-se aproximadamente 8,1kW (28% maior que o caso senoidal).

Os valores de potência obtidos com as simulações do Esquema 3 para diferentes ângulos α do trapézio são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Potências ativas geradas - Comparações Esquema 3

α (°)	p(W)	p(w)/P
0°	8089	128,40%
15°	7931	125,89%
45°	6802	107,97%
Tensão Senoidal	6300	100,00%

Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros

Apresenta-se neste capítulo algumas conclusões dos resultados obtidos com as simulações do capítulo 4.

5.1 Potências Geradas com Tensões Senoidais e Trapezoidais

Abaixo seguem os resultados apresentados nas simulações do capítulo 4:

Esquema 1 - Seção 4.3		
α (°)	p(W)	p(w)/P
0°	7374	117,05%
15°	7181	113,98%
45°	6653	105,60%
Tensão Senoidal	6300	100,00%

Esquema 2 - Seção 4.4		
α (°)	p(W)	p(w)/P
0°	7509	119,19%
15°	7301	115,89%
45°	6636	105,33%
Tensão Senoidal	6300	100,00%

Esquema 3 - Seção 4.5		
α (°)	p(W)	p(w)/P
0°	8089	128,40%
15°	7931	125,89%
45°	6802	107,97%
Tensão Senoidal	6300	100,00%

Através da análise dos resultados obtidos pode-se concluir que as correntes no caso de tensão senoidal possuem valores eficazes maiores que as correntes no caso trapezoidal, para ângulos α de inclinação do trapézio menores que 65°. Como os enrolamentos de uma máquina são projetados para suportarem correntes cujo valor

RMS máximo é igual ao caso senoidal, é possível aumentar os valores das correntes que circulam na máquina no caso trapezoidal até este limite, sem, contudo, prejudicar o funcionamento da MSIP ou sua vida útil. Isto foi realizado nas simulações apresentadas nos itens 4.3, 4.4 e 4.5 desta dissertação.

Aumentando-se os valores eficazes das correntes de linha da máquina nos casos trapezoidais, eleva-se a potência fornecida pela máquina ao sistema.

A maior potência instantânea foi obtida no caso da utilização de um conversor trifásico a quatro fios, que permite a circulação das potências p e p_0 e para ângulos α menores que 45° . Por exemplo, para α igual a 0° obteve-se um aumento de 28,4% da potência gerada.

Para $45^\circ < \alpha < 65^\circ$ é indicada a utilização de um conversor trifásico a três fios com sistema de controle que utilize somente a componente fundamental da tensão trapezoidal nos cálculos, pois a complexidade do controle e a utilização de um conversor a 4 fios não foi justificada, já que a potência obtida para ângulos compreendidos neste intervalo foi praticamente igual às obtidas nos Esquemas 1 (só fundamental) e 2 (sem sequência zero).

Para ângulos $\alpha > 65^\circ$ não é vantagem utilizar ondas trapezoidais, pois o valor eficaz destas tensões é inferior ao valor do seno. Neste caso a potência gerada em qualquer caso é menor que a potência gerada no caso senoidal, desde que sejam mantidas as características nominais da máquina (correntes máximas).

Os resultados apresentados podem ser obtidos com quaisquer tipos de máquinas síncronas e não somente no caso da utilização de ímã permanente. O que levou ao aumento na potência para a mesma máquina foi a utilização de tensões trapezoidais ao invés das tensões senoidais. A máquina também pode ser utilizada como motor. Neste caso um aumento da potência resulta em maior eficiência do sistema.

5.2 Aumento do Volume de Ímã no Caso Trapezoidal

Durante os estudos desenvolvidos para utilização neste trabalho foram cogitadas hipóteses de que a utilização de tensões trapezoidais resultaria num aumento do volume

de ímã, quando comparado com o caso senoidal da máquina síncrona de ímãs permanentes. Porém, de acordo com NASAR *et al* [6], a mudança da onda senoidal para a trapezoidal deve-se a uma modificação na distribuição dos enrolamentos de estator. Portanto, o volume do ímã, responsável por originar o campo magnético do rotor, não é aumentado quando se modifica a forma de onda das tensões do estator.

5.3 Trabalhos Futuros

A utilização de tensões trapezoidais resultou em correntes de geração com conteúdo harmônico. As harmônicas mais significantes foram as frequências de 180Hz (3° harmônico), 300Hz (5° harmônico) e 420Hz (7° harmônico).

Sabe-se que correntes com conteúdo harmônico aumentam as perdas do sistema devido ao efeito pelicular. Este é caracterizado pela repulsão entre as linhas de corrente dentro de condutores, resultando numa tendência da corrente elétrica fluir pela superfície do mesmo. Este efeito é proporcional à intensidade da corrente e à frequência. No caso da utilização de correntes cujas harmônicas de frequências mais altas sejam significativas, a resistência do condutor à passagem desta corrente é aumentada devido ao efeito pelicular.

Com o objetivo de dar prosseguimento aos estudos desenvolvidos nesta dissertação é necessário realizar uma estimativa das perdas envolvidas nos casos senoidal e trapezoidal. Acredita-se que a potência máxima obtida com a utilização de tensões trapezoidais será ligeiramente inferior às apresentadas neste trabalho, porém, serão significativamente maiores que a potência nominal da máquina senoidal.

Referências Bibliográficas

- [1] Brasil, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, *Plano Decenal de Expansão de Energia 2020*, 2011.
- [2] Brasil, Eletrobras, *Plano Anual do PROINFA 2012*, 2011.
- [3] Departamento de P&D do Produto, WEG Equipamentos Elétricos S.A., *Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequencia*, 2011.
- [4] GRENIER, D.; LOUIS, J. P., Modeling for control of non-sinewave permanent-magnet synchronous drives by extending Park's transformation, *Mathematics and Computers in Simulation* 38, pp. 445-52, 1995.
- [5] BOFFINO, J.R.A.M., "*Estratégias de Acionamento e Controle em Máquinas CA de Ímã Permanente com Fluxo Não-Senoidal*", Dissertação M.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil, 2006.
- [6] NASAR, S. A . BOLDEA, I.; UNNEWEHR, L. E., *Permanent magnet, reluctance, and self synchronous motors*, CRC Press, Boca Raton, 1993.
- [7] MILLER, T. J. E. *Brushless Permanent-magnet and reluctance motor drives*. Claredon Press, Oxford, 1993.
- [8] BERENDSEN, C.S.; CHAMPENOIS, G.; BOLOPION, A., Commutation Strategies for Brushless DC Motors: Influence on Instant Torque. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 8, No. 2, pp. 231-6, 1993.
- [9] S. Fryze, "Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nicht-sinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung," *ETZ-Arch. Elektrotech.*, vol. 53, 1932, pp. 596-599, 625-627, 700-702.
- [10] H. Akagi, E. H. Watanabe and M. Aredes, "*Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*," IEEE Press / Wiley Interscience, 2007.

- [11] FERREIRA, J.C.C.,” *Aplicação do Controle Vetorial e Teoria pq no Controle de Aerogeradores Conectados a Rede Elétrica*”, Dissertação M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [12] Ogata, Katsuhiko, “*Engenharia de Controle Moderno*”, 5.ed., São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2010.
- [13] LIMA, F.K.A.,” *Aerogerador Baseado em Máquina de Indução Duplamente Alimentada – Suportabilidade para Afundamento de Tensão*”, Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- [14]<http://www.mathworks.com/help/physmod/powersys/ref/permanentmagnetsynchronousmachine.html> - Acesso em: 16 set. 2012, 14:39:00.
- [15] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, *Máquinas Elétricas*, 6. ed. Porto Alegre, Bookman, 2006.
- [16] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Generalized Theory of Instantaneous Reactive Power and Its Applications," Transactions of the IEE-Japan, Part B, vol. 103, no.7, 1983, pp. 483-490.