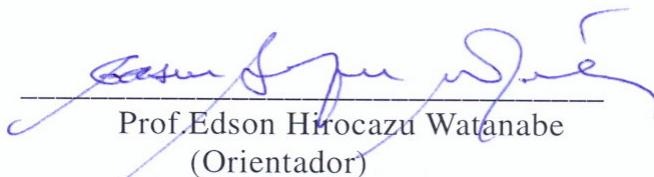


ANÁLISE DE GERADOR DE INDUÇÃO PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DAS ONDAS DO MAR

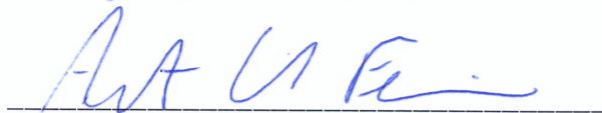
Thiago Machado Monteiro

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

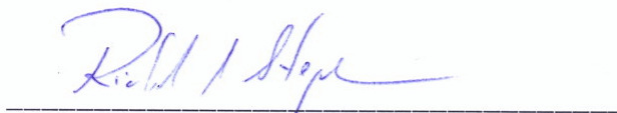
Aprovada por:



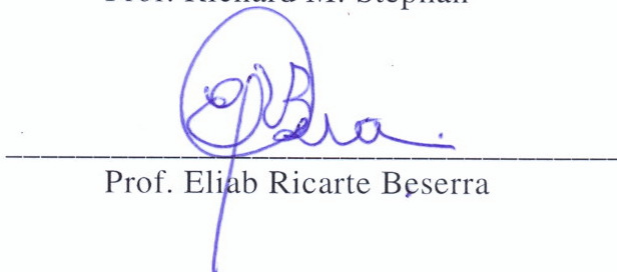
Prof. Edson Hirocazu Watanabe
(Orientador)



Prof. Antônio Carlos Ferreira



Prof. Richard M. Stephan



Prof. Eliab Ricarte Beserra

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
AGOSTO DE 2009

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 ainda à todos que colaboram com meu trabalho, aos colegas do ELEPOT e aos Professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRJ.

Resumo do Projeto apresentado ao corpo docente do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

ANÁLISE DE GERADORES PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DAS ONDAS DO MAR

Thiago Machado Monteiro

Agosto de 2009

Orientadores: Edson Hirokazu Watanabe
Isaac Rocha Machado

Programa de Engenharia Elétrica

Este projeto consiste em um estudo sobre uma fonte renovável de energia pouco explorada em nosso país, apesar do seu largo potencial energético. Como forma de produzir energia elétrica partir das ondas do mar, estão sendo realizadas pesquisas no Laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE/UFRJ em relação aos aspectos de conversão da energia das ondas em movimentos de rotação. No Laboratório de Eletrônica de Potência (ELEPOT) da COPPE/UFRJ estão sendo desenvolvidos estudos para verificar a melhor forma de transformar a energia mecânica rotacional em energia elétrica.

Este projeto tem o objetivo de verificar a implementação deste sistema de produção de energia na realidade, em situações de interligação dos geradores de energia das ondas com a rede local.

A estrutura mecânica instalada no mar, desenvolvida pelo grupo de pesquisas do Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS), em conjunto com uma câmara hiperbárica e uma turbina Pelton são responsáveis pela transformação do movimento das ondas em

movimentos de rotação. A estrutura mecânica é composta de um flutuador, que é acoplado a uma viga. O movimento desta é usado para acionar uma bomba hidráulica que injeta água na câmara hiperbárica, responsável por equalizar a energia variável das ondas. Por sua vez, a câmara hiperbárica emite um jato de água com pressão e vazão suficientes para girar a turbina Pelton, que é acoplada ao eixo do gerador, produzindo assim energia elétrica.

Sumário

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Apresentação do Problema.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Estrutura do Projeto.....	5
Capítulo 2 – Revisão dos Fundamentos da Geração de Energia Elétrica a partir das Ondas do Mar.....	6
2.1 Conceitos Básicos sobre Energia das Ondas.....	6
2.2 Conversores de Energia das Ondas.....	12
2.3 Conversor Utilizado neste Projeto.....	19
2.4 Geração Utilizando um Gerador de Indução Gaiola de Esquilo.....	21
Capítulo 3 – Análise do Gerador de Indução Conectado Diretamente à Rede.....	22
3.1 Aspectos Construtivos.....	23
3.2 Princípio de Funcionamento.....	24
3.3 Modelo Elétrico do Gerador de Indução.....	34
3.4 Modelo Elétrico da Rede de Energia Elétrica.....	43
3.5 Conexão do Gerador à Rede.....	43
Capítulo 4 – Análise no Tempo do Sistema por Simulações em PSCAD/EMTDC..	50
4.1 Simulações do Sistema em PSCAD/EMTDC sob Condições de Torque Oscilante..	52
4.2 Simulações do Sistema Através das Equações Desenvolvidas a Partir do Modelo em Regime Permanente.....	64
4.3 Análise das Tensões a Partir de Séries de Fourier.....	68
4.4 Simulação do Sistema sem a Câmara Hiperbárica.....	73
4.5 Flutuação de Tensão e Efeito <i>Flicker</i>	76
Capítulo 5 Conclusão e Trabalhos Futuros.....	80
Referências Bibliográficas.....	83

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Motivação

A crescente demanda de energia elétrica aliada à crise do petróleo e 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 de energia. Estas fontes são aquelas que possibilitam a geração de energia elétrica através de meios não agressivos à natureza. Energia eólica, energia solar, energia das marés são exemplos de fontes alternativas de energia mais conhecidas.

Há também uma outra fonte de energia alternativa, menos conhecida, mas não menos importante, a energia das ondas do mar. Esta é uma fonte não poluidora, auto-suficiente, renovável e que possui um considerável potencial energético a ser explorado pelo mundo. Esta forma de energia é objeto do presente estudo e será melhor explicada adiante.

Os estudos sobre o aproveitamento da energia proveniente das ondas do mar iniciaram-se na década de setenta, com a crise do petróleo, mas só foram realmente

empregados para produção de energia elétrica há alguns anos.

Existem diversas formas de transformar a energia das ondas em energia elétrica. Esta transformação é realizada por conversores mecânicos que podem ser instalados na costa, próximos a costa ou em alto mar.

As principais pesquisas estão sendo desenvolvidas em países como Portugal, Holanda, Reino Unido, Escócia, China, Japão e Brasil. A maioria destes estudos visa à construção de protótipos em escala real para a realização de testes. Existem também aqueles que já estão em funcionamento, como o de Açores, Portugal.

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.

É importante citar que já existe um projeto do governo federal com o objetivo de diversificar a matriz energética do Brasil denominado PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia. 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.

Na Figura 1.1 são representadas a matriz energética e elétrica do Brasil. A matriz energética corresponde ao somatório de todas as formas de energia produzidas pela sociedade. Já a matriz elétrica é composta por todas as fontes de energia elétrica utilizadas.

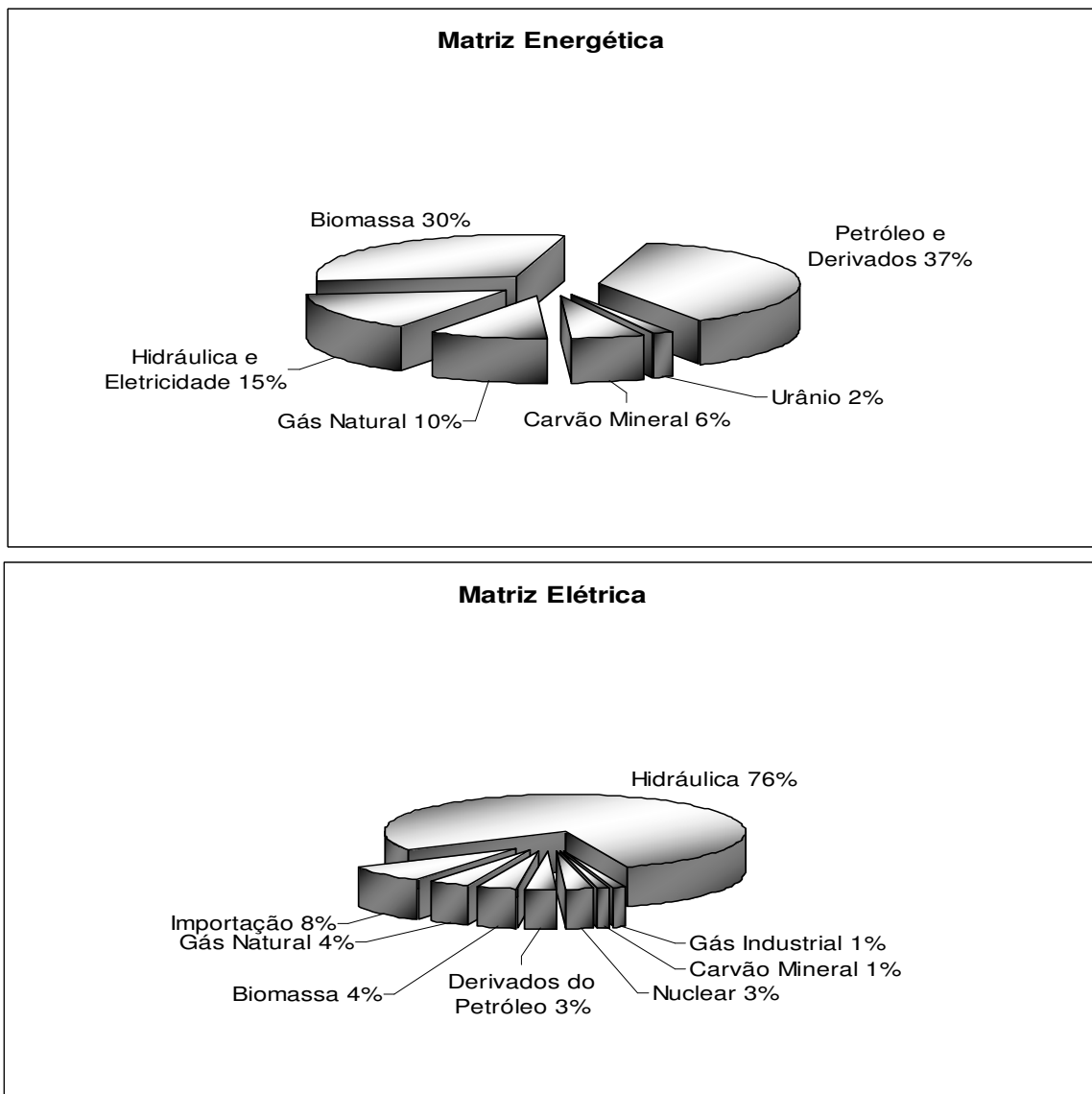


Figura 1.1 – Matriz Energética e Elétrica do Brasil em 2007
(Fonte: Ministério de Minas e Energia)

1.2 Apresentação do Problema

Aqui no Brasil, os estudos sobre o aproveitamento da energia das ondas do mar para produção de energia elétrica estão sendo desenvolvidos no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). No Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS) da COPPE/UFRJ foram realizadas pesquisas sobre as formas de se transformar a energia das ondas em movimentos rotacionais. Já no Laboratório de Eletrônica de Potência (ELEPOT) da COPPE/UFRJ estão sendo desenvolvidos estudos com o intuito de obter

a melhor forma de transformar a energia mecânica rotacional em elétrica.

O sistema de geração desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia Submarina consiste em um equipamento mecânico instalado na costa. A conversão da energia é feita em duas etapas: a primeira consiste em converter a energia potencial das ondas em movimentos de rotação, já a segunda utiliza os movimentos rotacionais para produzir energia elétrica.

A proposta de geração consiste em utilizar o conversor de energia desenvolvido pelo LTS acoplado a um gerador de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo. O motivo de se utilizar este gerador de indução, para produzir energia elétrica a partir das ondas do mar, é que ele apresenta um custo muito baixo e praticamente não necessita de manutenção. Seu valor chega a ser 8 vezes mais barato que outros tipos de geradores de corrente alternada de mesma potência, como o gerador síncrono.

O sistema proposto, quando conectado diretamente à rede de energia local, pode apresentar alguns problemas de oscilação de tensão e frequência do gerador. A dificuldade de regulação da frequência e tensão são problemas que devem ser estudados, pois podem inviabilizar o projeto. Em certas circunstâncias a variação da tensão pode ser aceitável, mas existem, também, casos em que essa variação não é permitida.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é analisar a geração de energia elétrica a partir das ondas do mar, utilizando o conversor brasileiro desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia Submarina, acoplado a um gerador de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo, conectado diretamente à rede de energia elétrica local. Através deste estudo serão definidas as situações de operação do sistema proposto, como também serão caracterizadas as situações que geram problemas para a rede e para o consumidor, segundo critério estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica.

1.4 Estrutura do Projeto

O presente trabalho será apresentado ao leitor da seguinte forma:

- Capítulo 2 - Revisão dos Fundamentos da Geração de Energia a Partir das Ondas
- Capítulo 3 - Análise do Gerador de Indução Conectado Diretamente à Rede
- Capítulo 4 - Análise no Tempo por Simulações em PSCAD/EMTDC
- Capítulo 5 - Conclusão e Trabalhos Futuros

CAPÍTULO 2

Revisão dos Fundamentos da Geração de Energia a partir das Ondas

Neste capítulo do trabalho será apresentado ao leitor vários conceitos sobre energia das ondas, bem como as formas de utilização desta energia para a geração de energia elétrica.

2.1 – Conceitos Básicos sobre Energia das Ondas

A energia proveniente das ondas é fonte da ação direta dos ventos na superfície da água dos oceanos. Os ventos transferem parte de sua energia para a água através da fricção entre esses dois meios (vento e água), deslocando, assim, as camadas superficiais da água e gerando as ondas. Isto faz com que as partículas da superfície tenham um movimento elíptico através da combinação de ondas longitudinais (para frente e para trás) e transversais (para cima e para baixo).

Estas ondas originadas pelo vento apresentam uma grande quantidade de energia que pode ser convertida em eletricidade através da utilização de conversores mecânicos instalados no mar.

- Elementos de uma Onda

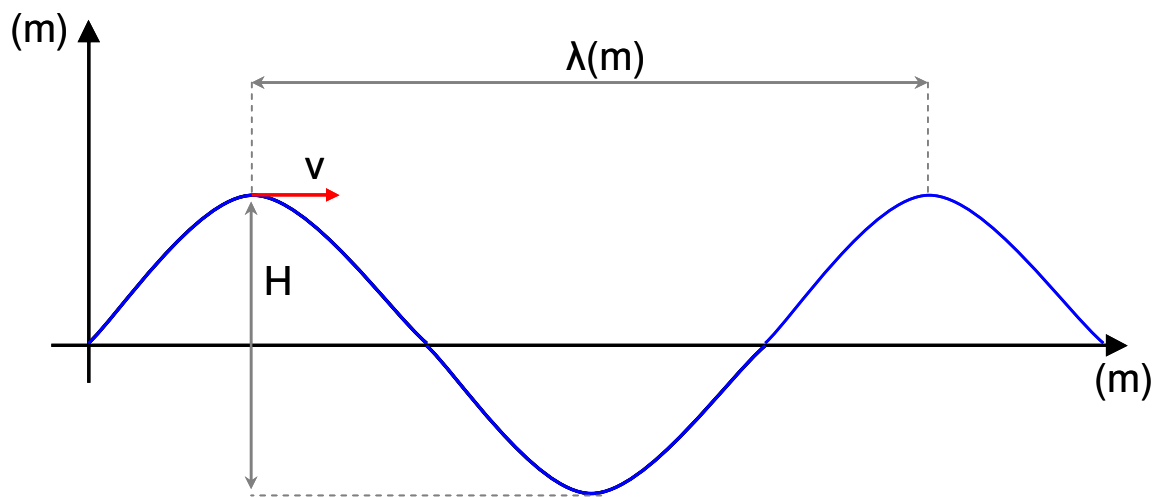
Uma onda é uma perturbação oscilante da superfície da água do mar e que varia

com o tempo. É caracterizada por ser periódica, isto é, se repetir ao longo do tempo.

A amplitude (H) é a distância da superfície da água até o ponto mais alto da onda. Este ponto pode ser chamado de crista da onda.

A distância entre duas cristas sucessivas no espaço é uma grandeza típica e bem conhecida chamada de comprimento de onda (λ). O tempo que a onda leva para percorrer um comprimento de onda é chamado de período (T).

Abaixo, segue a figura de uma onda no espaço com suas grandezas características.



Amplitude da onda - H

Comprimento de onda - λ

Velocidade de propagação - v

Período - T

Frequência - $f = 1/T$

$v = \lambda \times f$

Figura 2.1 – Elementos de uma Onda do Mar

O lugar geométrico contínuo dos pontos do meio que oscilam em fase é chamado superfície ondulatória. A superfície ondulatória que vai mais adiante, ou seja, que está mais afastada da fonte das ondas, é chamada frente de onda.

A potência por frente de onda (P_{onda}), ou seja, a energia que a frente de onda carrega num determinado espaço de tempo, segundo *Estefen et al. 2007* [3] é diretamente proporcional ao quadrado da sua amplitude (H) e ao seu período (T):

$$P_{\text{onda}} \propto H^2 \times T$$

Cerca de 95% de toda a energia da onda está localizada entre o valor médio da altura da onda e uma profundidade de $\lambda/4$ abaixo da linha de valor médio. O comportamento das partículas de água abaixo da superfície da onda é circular (formam uma elipse).

A energia proveniente das ondas do mar tem inúmeras vantagens em relação às demais fontes de energia alternativas. Abaixo segue uma tabela comparando os diversos tipos de energia existentes.

Fonte	Fonte Renovável	Baixo Custo de Capital	Baixo Custo de Operação	Mínimo Impacto Ambiental	Mínimo Impacto visual	Previsível	Modular
Fóssil	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗
Nuclear	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗
Hidráulica	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
Solar	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✓
Ventos	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✓
Marés	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗
Ondas	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Correntes	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓

Figura 2.2 - Comparação Entre os Diversos Tipos de Energia
 Fonte: *Estefen et al. 2007* [3]

Pode-se notar que a energia extraída das ondas possui baixo custo operacional, mínimo impacto ambiental, é modular e previsível. Essas características se tornam vantajosas para a aplicação em geração remota. Além disso, este tipo de energia é muito consistente, não existindo grandes períodos de abstinência energética. Pode ser aplicada com tecnologias costeiras ou de alto mar.



Região	GW
Norte + Maranhão ¹	27
Nordeste ²	22
Sudeste ²	30
Sul ²	35
Potencial Brasileiro	114

Figura 2.3 - Potencial Brasileiro. (1: Maré apenas; 2: Ondas).

O litoral brasileiro possui uma extensão aproximada de 7.500 km. A potência de um módulo de geração pode chegar a 100 kW, tendo um comprimento de 24 m, segundo estudos feitos pelo LTS.

Extensão eleita – 2400 km.

Comprimento do módulo – 24m = 0,024 km.

A quantidade de módulos necessária para cobrir a área de 2400 km é igual a:

$$\frac{2400km}{0,024km} = 100.000módulos$$

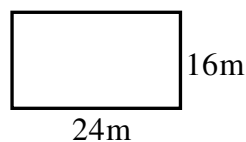
Supondo que cada módulo tenha a capacidade de geração de 100kW, a potência gerada é igual a:

$$100kW \times 100.000módulos = 10.000.000.000W = 10 \times 10^9 W = 10GW$$

Logo, utilizando-se uma extensão efetiva de 2.400 km, aproximadamente 32% do litoral brasileiro, pode-se gerar uma potência de 10 GW. A título de comparação, a Usina de Itaipu, que é a maior hidrelétrica do mundo, possui uma potência instalada de 14 GW.

Para fazer uma comparação melhor pode-se utilizar o conceito de densidade superficial de potência. Esta densidade pode ser obtida dividindo-se a potência instalada pela área ocupada pela usina de geração.

Um módulo de geração de energia das ondas tem as seguintes dimensões:



A área ocupada por cada módulo é igual a $24 \times 16 = 384m^2$.

A área total ocupada pelos 100.000 módulos vale $38,4km^2$.

A densidade superficial de potência (σ_{LTS}) do mecanismo de geração desenvolvido pelo LTS é:

$$\sigma_{LTS} = \frac{P_{inst}}{Área}$$

$$\sigma_{LTS} = \frac{10GW}{38,4km^2}$$

$$\sigma_{LTS} = 0,26042 \frac{GW}{km^2} = 260,42 \frac{kW}{m^2}$$

$$\sigma_{LTS} = 260,42 kW/m^2$$

Realizando-se os mesmos cálculos para a Usina Hidrelétrica de Itaipu obtém-se:

Potência instalada = 14GW

Área ocupada = 1350km²

$$\sigma_{Itaipu} = \frac{14GW}{1350km^2}$$

$$\sigma_{Itaipu} = 0,01037 \frac{GW}{km^2} = 10,37 \frac{kW}{m^2}$$

$$\sigma_{Itaipu} = 10,37 kW/m^2$$

Pode-se concluir, que de acordo com as densidades superficiais de potência de Itaipu (10,37kW/m²) e do equipamento de geração do LTS (260,42kW/m²), a geração de energia das ondas apresenta uma melhor utilização da área ocupada, pois sua densidade, neste caso, é aproximadamente 25 vezes maior que a densidade de Itaipu.

- Impactos Ambientais (Ref. Estefen et al. 2007 [3])

- Ruído audível – não maior que o próprio som das ondas;
- Perturbação da vida marinha – somente durante o período de construção;
- Impacto visual – como se trata de estrutura parcialmente submersa, sua visualização só será possível se desejada pelo projeto;
- Risco à navegação – devido a sua flexibilidade de localização pode ser facilmente desviada das rotas das linhas marítimas. As demais possibilidades são tratadas com sinalização adequada;
- Área de recreação – com a instalação da usina tanto poderiam ser criadas áreas abrigadas para recreação como áreas mais adequadas à prática do surfe.

- Vantagens Estratégicas (Estefen et al. 2007 [3])

- Recurso renovável e auto-sustentável – inexaurível;
- Recurso bem caracterizado – fácil estimativa do potencial;
- Abundante – apesar de sua variação nas estações climáticas;
- Nativa – produção pontual;
- Limpa – totalmente livre de poluição;
- Localização flexível – próximo à costa ou em alto mar;
- Harmônica à vida marinha – se desejado pode funcionar como recife artificial;
- Independência energética local e/ou regional – aplicação local eliminando a dependência de combustível fóssil;
- Mercados remotos e pontos isolados – povoados, ilhas, bases militares...

2.2 – Conversores de Energia das Ondas

A conversão da energia mecânica das ondas em movimentos de rotação, necessários para fazer girar uma turbina hidráulica, pode ser feita de diversas formas.

Os equipamentos utilizados para realizar tal tarefa são chamados de conversores de energia das ondas. Esses conversores podem ser classificados de acordo com suas características de instalação. Eles podem ser instalados na costa, próximos a costa ou em águas mais profundas, distantes da costa. De acordo com esta localização, eles podem ser classificados em:

- Dispositivos Costeiros (*shoreline*);
- Dispositivos Próximos da Costa (*nearshore*);
- Dispositivos Afastados da Costa (*offshore*).

2.2.1 Dispositivos *Shoreline*

Os dispositivos shoreline são equipamentos fixos instalados na costa. Devido à sua localização, estes dispositivos apresentam vantagens como a facilidade de instalação e manutenção. Entretanto, por serem instalados na costa, estes dispositivos não aproveitam as ondas que possuem mais energia, localizadas em zonas de grande profundidade.

Em relação ao princípio de funcionamento, os dispositivos mais utilizados para este tipo de aplicação são os dispositivos de Coluna de Água Oscilante. Estes consistem em estruturas ocas, parcialmente mergulhadas na água e que possuem uma abertura na parte inferior para a entrada de água. Na presença de ondas, o ar localizado no interior da estrutura é deslocado, passando por uma turbina de vento. O fluxo de ar faz girar a turbina, que por sua vez gira o eixo do gerador, produzindo, desta forma, eletricidade. As turbinas utilizadas para este tipo de utilização são as *turbinas Wells*, pois estas apresentam um único sentido de rotação para qualquer que seja o sentido do fluxo de ar.

Os dispositivos atuais que melhor representam esta forma de conversão são as centrais de energia das ondas OWC localizada em Portugal e LIMPET localizada na Escócia.

Central OWC – Portugal



Figura 2.4: OWC – Portugal (400kW)
Ref.: Cruz & Sarmento 2004

A Central OWC fica localizada na Ilha do Pico, em Açores, Portugal – Figura 2.4. Esta central de energia das ondas possui uma *turbina Wells* de velocidade variável

acoplada diretamente a um gerador de energia elétrica. A capacidade de geração é de 400 kW. Foi construída durante os anos de 1995 a 1999 por uma equipe do Instituto Superior Técnico de Portugal e com o auxílio de duas universidades estrangeiras: *Queen's University of Belfast*, do Reino Unido e *University College Cork*, da Irlanda.

Esta foi a central pioneira no mundo a introduzir energia elétrica gerada a partir das ondas do mar num sistema de energia elétrica. Este fato, apesar de ter acontecido apenas pontualmente e na fase de testes, foi de grande importância para o desenvolvimento de outras centrais de energia das ondas em Portugal.

Central LIMPET – Escócia

A Central LIMPET (*Land Installed Marine Power Energy Transmitter*) fica localizada na Escócia, Reino Unido – Figura 2.5. Esta central está equipada com duas *turbinas Wells*, cada uma acoplada a um gerador. Cada grupo turbogerador (turbina+gerador) tem capacidade de gerar 250kW de potência ativa. Logo, a capacidade de produção desta central é de 500kW.



Figura 2.5: LIMPET – Escócia (500kW)

Esta central foi a primeira a explorar comercialmente o potencial de energia das ondas para produzir energia elétrica no Reino Unido. Foi projetada pela empresa escocesa *Wavegen* com colaboração da universidade *Queen's University of Belfast*, do Reino Unido, do Instituto Superior Técnico de Portugal e da Comunidade Européia.

2.2.2 Dispositivos *Nearshore*

Os dispositivos de conversão de energia das ondas são classificados como *nearshore* (próximos à costa) quando estão localizados em águas rasas (8 a 20m de profundidade), normalmente a uma distância de 10 a 15 km da costa.

Um exemplo de dispositivo *nearshore* é a *Central Energetech*.

Central Energetech

Esta central de energia das ondas foi construída pela empresa australiana *Energetech Pty Ltd* e é um dispositivo com princípio de funcionamento do tipo coluna de água oscilante. Apresenta algumas diferenças em relação às centrais europeias, como a localização próxima a costa e o controle eletrônico do passo da hélice da turbina. Este controle foi introduzido com o objetivo de aumentar o rendimento da turbina.

As obras de construção da central foram concluídas em Dezembro de 2006. Ela está localizada no quebra-mar de *Port Kembla Harbour*, na Austrália – Figura 2.6.



Figura 2.6: Central *Energetech* – Austrália
Ref.:Rudge 2005

2.2.3 Dispositivos *Offshore*

Os dispositivos de conversão de energia das ondas chamados de *offshore* são

aqueles que se localizam afastados da costa, em zonas de grande profundidade. Por estarem localizados nestas zonas de profundidade elevada eles dispõem de regimes de onda mais energéticos que os dispositivos *onshore* e *nearshore*. Entretanto, estes regimes de onda requerem sistemas mecânicos mais sofisticados em relação à forma de fixação dos dispositivos e à transmissão de energia elétrica. Como estes dispositivos devem ficar na superfície da água, ou próximos a ela, eles necessitam de mecanismos de amarração ao fundo do mar e também utilizam cabos submarinos para levar a energia produzida pela central de energia das ondas até o continente. Desta forma os projetos de centrais *offshore* apresentam custos e perdas de energia associados mais elevados.

Dois exemplos que melhor representam os dispositivos *offshore* e que serão descritos a seguir são: PELAMIS – Reino Unido e AWS – Holanda. Estes dispositivos são baseados no princípio de funcionamento chamado de **corpos oscilantes**, onde o princípio de conversão de energia está relacionado ao movimento de um corpo em relação a outro corpo ou a um referencial fixo no espaço.

PELAMIS

O sistema PELAMIS foi desenvolvido pela empresa *Ocean Power Delivery Ltd* da Escócia. Este dispositivo pertence à classe dos corpos oscilante progressivos. Estes corpos são sistemas com dimensão longitudinal da ordem do comprimento de onda e estão dispostos no sentido de propagação das ondas da localidade.

O sistema é constituído por quatro segmentos que ficam parcialmente imersos na água. Estes segmentos são interligados por articulações do tipo juntas universais. No interior das juntas estão instaladas bombas hidráulicas, acumuladores, motores hidráulicos e geradores elétricos.

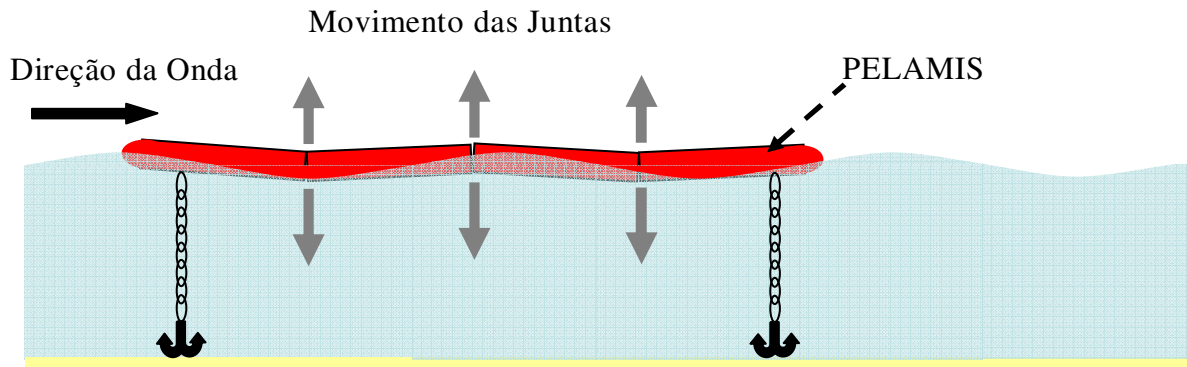


Figura 2.7: PELAMIS - Princípio de Funcionamento

O funcionamento do sistema dá-se da seguinte forma: a presença de ondas provoca o movimento vertical das juntas universais. Este movimento aciona as bombas hidráulicas localizadas no interior de cada junta. As bombas, por sua vez, pressionam um fluido no acumulador. Este fluido é liberado do acumulador em alta pressão e faz girar os motores que acionam os geradores de energia elétrica.

O protótipo do PELAMIS, Figura 2.8, foi construído no Reino Unido e concluído no ano de 2004. Este protótipo possui capacidade de geração de 750kW e tem um comprimento longitudinal de 120m.



Figura 2.8: Protótipo PELAMIS – Reino Unido (750kW)

Ref.: Cruz & Sarmiento 2004

AWS – Holanda

O dispositivo de energia das ondas chamado *Archimedes Wave Swing* (AWS) foi desenvolvido na Holanda e também utiliza o princípio de funcionamento de corpos oscilantes, mas possui uma ligeira peculiaridade – sua absorção é pontual, e não progressiva como o PELAMIS.

Os dispositivos que utilizam o princípio de funcionamento de corpos oscilantes de absorção pontual possuem comprimento longitudinal muito menor que o comprimento de onda do local onde será instalado.

O AWS é formado por duas estruturas cilíndricas ocas acopladas, contendo ar pressurizado em seu interior. A base permanece fixa e a parte superior pode realizar movimentos verticais em relação à base. Esta estrutura pode ser observada na Figura 2.9.

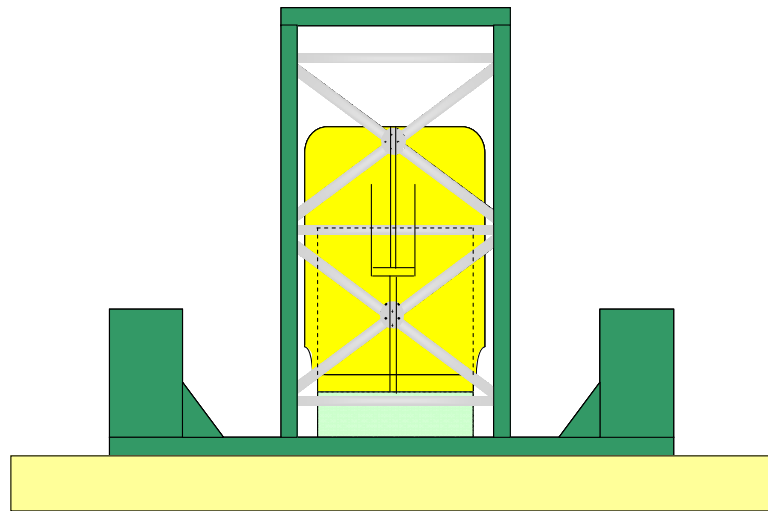


Figura 2.9: Archimedes Wave Swing (AWS)

A presença de ondas varia a pressão exterior à estrutura o que resulta em movimentos oscilatórios verticais do cilindro superior em relação à base. A parte inferior permanece fixada ao fundo do mar e a parte superior (flutuador) realiza movimentos para cima e para baixo. Quando a onda está no topo o flutuador desce (variação de pressão positiva) e quando a onda está no vale o flutuador sobe (variação de pressão negativa) – Figura 2.10.

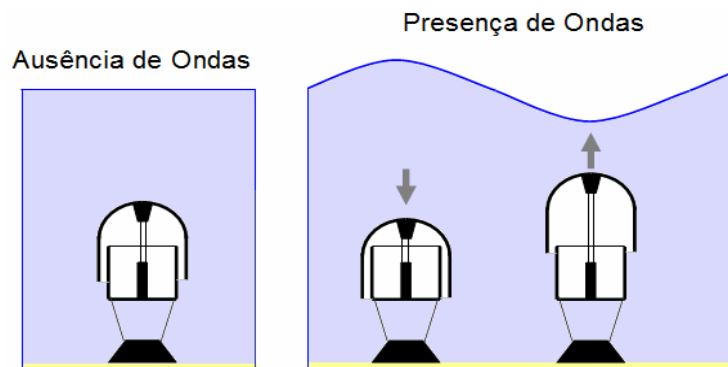


Figura 2.10: AWS - Princípio de Funcionamento

Estes movimentos são utilizados para acionar um gerador linear de energia elétrica, produzindo assim eletricidade.

A energia elétrica gerada é transmitida para o continente através de cabos submarinos que interligam o AWS à uma central de energia terrestre.



Figura 2.11: AWS – Construído no Largo da Póvoa do Varzim, Portugal (2MW)
Ref.: Cruz & Sarmiento 2004

2.3 – Conversor Utilizado neste Projeto

O mecanismo de conversão de energia das ondas em movimentos rotacionais a ser utilizado neste projeto, foi desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia submarina (LTS) – COPPE/UFRJ.

Primeiro, transforma-se a energia proveniente das ondas do mar em movimentos rotacionais. Em seguida, utiliza-se esses movimentos para gerar energia elétrica.

Uma estrutura mecânica instalada no mar, em conjunto com uma câmara hiperbárica e uma turbina Pelton são responsáveis pela transformação do movimento das ondas em movimentos de rotação. Este mecanismo pode ser observado na Figura 2.12.

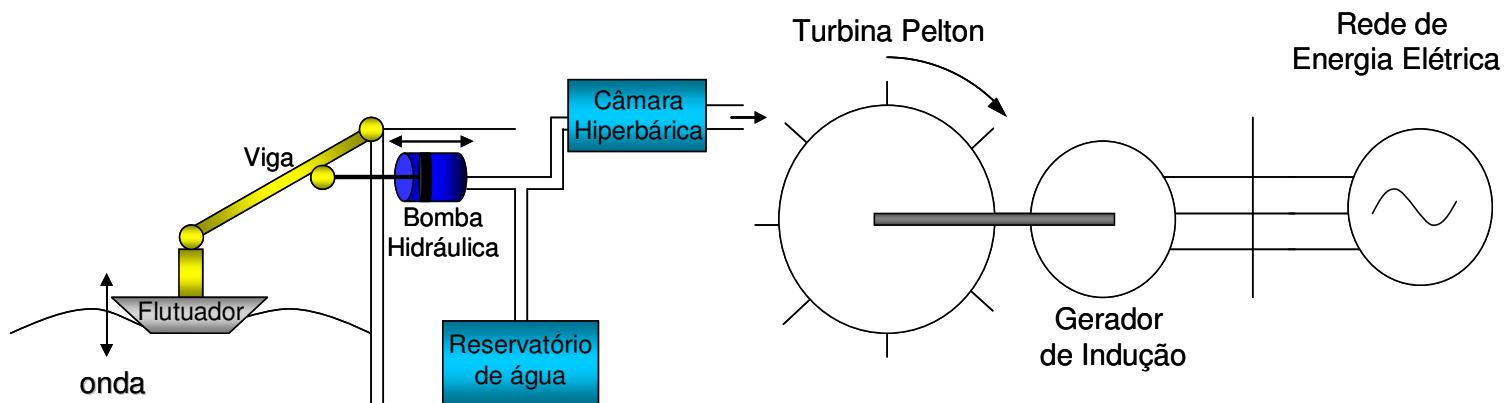


Figura 2.12 - Conversor de Energia das Ondas Desenvolvido pelo LTS

Esta estrutura é composta de um flutuador, que é acoplado a uma viga. O flutuador fica em contato com a superfície da água. Na presença de ondas o flutuador realiza movimentos verticais. Este movimento é usado para acionar uma bomba hidráulica que injeta água na câmara hiperbárica, responsável por equalizar a energia variável das ondas. Por sua vez, a câmara hiperbárica emite um jato de água com pressão equivalente a uma queda d'água de 500m, suficientes para girar a turbina Pelton. Esta é acoplada ao eixo do gerador, produzindo assim energia elétrica.

O sistema descrito pode ser observado na Figura 2.13.



Figura 2.13 - Protótipo do Sistema Montado pelo LTS no Tanque Oceânico da COPPE

Fonte: <http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=833>

2.4 – Geração Utilizando um Gerador de Indução Gaiola de Esquilo

O esquema de produção de energia elétrica a partir das ondas desenvolvido pelo LTS pode ser dividido em duas partes: a primeira, responsável pela transformação da energia das ondas em movimentos rotacionais, é puramente mecânica; e a segunda, responsável por transformar a energia mecânica rotacional em energia elétrica, é eletromecânica.

A proposta deste trabalho é utilizar um gerador de indução do tipo gaiola de esquilo acoplado a uma turbina Pelton para gerar energia elétrica. Estes tipos de máquinas estão sendo cada vez mais utilizados na indústria devido à sua simplicidade de construção e ao seu preço baixo. Este gerador será melhor estudado no capítulo seguinte.

A razão por escolher este tipo de gerador é ligada diretamente ao custo do projeto, o que torna a proposta mais atrativa economicamente e mais atrativa para os investidores, pois apresenta um investimento baixo e um custo de manutenção quase nulo. Entretanto, este gerador possui desvantagens como a alta corrente de partida e a dificuldade de regulação da tensão e frequência geradas.

Além disso, o sistema pode apresentar problemas de oscilação de tensão se submetido a perfis de torque oscilantes com o tempo. Dependendo do nível de potência gerada e dos tipos de redes que serão conectadas ao gerador, este problema pode ser relevante ou imperceptível.

Ao longo deste trabalho serão definidas e caracterizadas as faixas de operação e níveis de geração de energia de forma a não provocar ou minimizar perturbações ao sistema, rede ou consumidor.

A utilização do gerador de indução gaiola possibilita a geração de energia elétrica com um custo muito menor em relação aos outros geradores, custo esse que pode ser até oito vezes menor se comparado a um gerador síncrono, por exemplo.

CAPÍTULO 3

Análise do Gerador de Indução Conectado Diretamente à Rede

O sistema de geração de energia proposto utiliza um gerador de indução conectado diretamente à rede de energia elétrica local. Esta máquina elétrica de corrente alternada tem sido usada amplamente na indústria devido à sua simplicidade de construção e seu baixo custo.

O objetivo de utilizar esta máquina diretamente conectada à rede é simplificar o sistema de geração de energia e evitar a necessidade de utilização de conversores elétricos no sistema, pois estes possuem custo mais elevado e necessitam de mão-de-obra especializada para sua operação.

Nas seções 3.1 e 3.2 deste capítulo serão apresentados alguns princípios fundamentais da máquina de indução já conhecidos na literatura, tais como: aspectos construtivos e princípio de funcionamento.

Os textos apresentados nas seções 3.1 e 3.2 são um breve resumo de diversos livros da literatura técnica como: Fitzgerald, A.E. - Máquinas Elétricas; Del Toro – Máquinas Elétricas; e outros. Para maiores detalhes, consultar estes livros e outros que são citados na bibliografia.

Nas seções 3.3 e 3.4 são apresentados os modelos elétricos do gerador de

indução e da rede de energia elétrica utilizados, respectivamente.

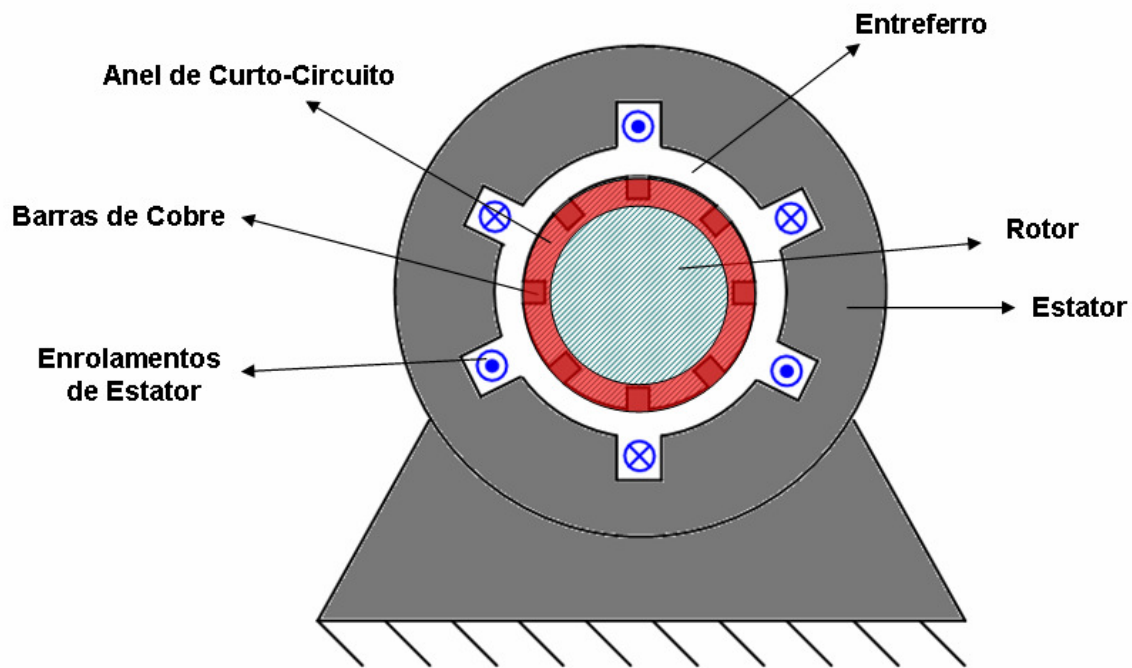
Na seção 3.5 será apresentado o modelo elétrico do gerador de indução diretamente conectado à rede de energia elétrica, bem como as equações que descrevem o funcionamento deste sistema em regime permanente.

3.1 – Aspectos Construtivos

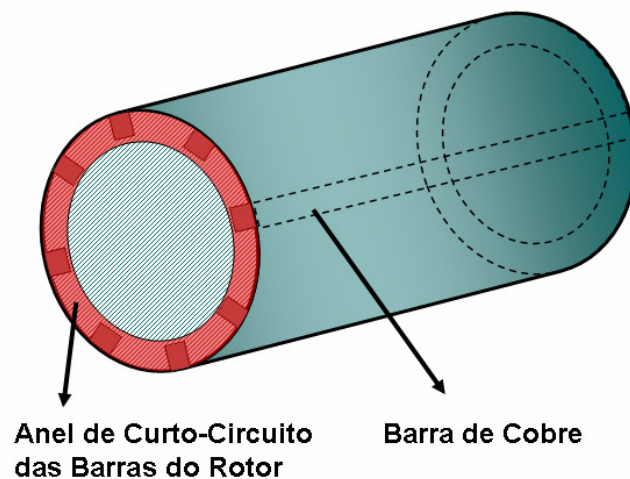
As máquinas de indução são compostas de duas partes: o estator e o rotor. O espaço entre estator e rotor é chamado de entreferro. O estator é a parte estacionária da máquina e o rotor é a parte móvel. Ambos são formados por chapas de aço magnético de alta qualidade e tratados termicamente. Isto é feito para reduzir as perdas de energia por histerese e correntes de Foucault.

Quanto aos aspectos construtivos, o estator é formado por chapas de aço em formato de anéis. Em seu interior existem ranhuras, nas quais são colocados os enrolamentos de armadura, que darão origem ao fluxo magnético do estator. Numa máquina trifásica são colocados três grupos de enrolamentos ou bobinas distanciados de 120° elétricos no espaço. A estes enrolamentos são conectadas três tensões defasadas de 120° elétricos entre si.

O rotor da máquina de indução gaiola também é feito de chapas de aço magnético de alta qualidade tratadas termicamente e apresenta ranhuras em seu interior. Nestas são colocadas barras de ligas de cobre que vão de uma extremidade à outra do rotor, no sentido longitudinal. As barras são curto-circuitadas através de anéis, também de ligas de cobre, nas extremidades. Estes enrolamentos podem ser observados na Figura 3.1.



Vista Frontal da Máquina de Indução



Vista em Perspectiva do Rotor

Figura 3.1 – Rotor e Estator de uma Máquina de Indução Gaiola

3.2 – Princípio de Funcionamento

3.2.1 – Força Magnetomotriz em Máquinas de Indução Gaiola Monofásicas

Considerando-se um enrolamento monofásico distribuído, Figura 3.2, alimentado por uma corrente i_a , obtém-se uma força magnetomotriz (FMM) distribuída espacialmente sob um pólo na forma de degraus. Esta forma de onda é representada pela linha cheia na Figura 3.2.

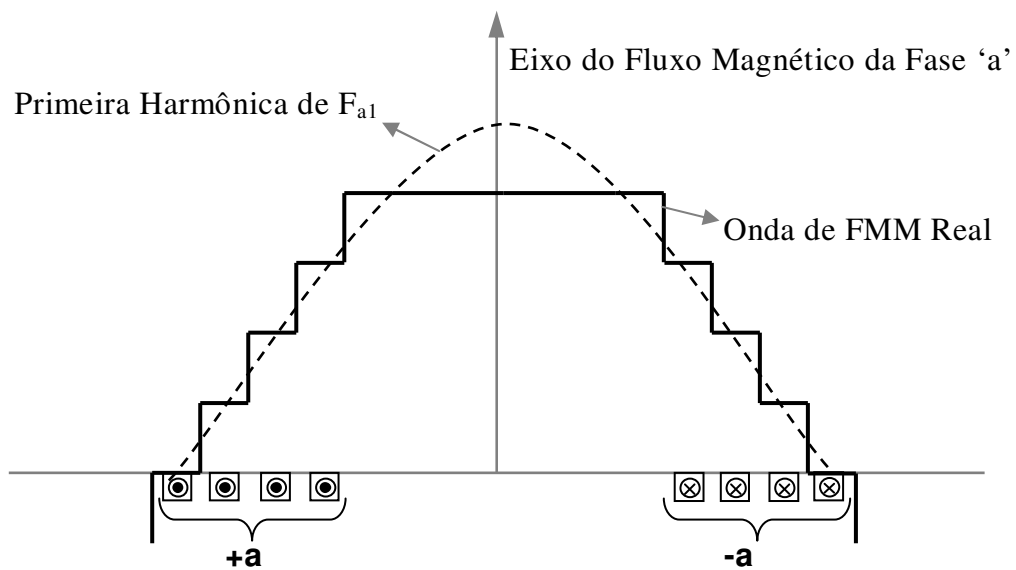


Figura 3.2 - Força Magnetomotriz de um Enrolamento Monofásico

A mesma curva se repete para outros pólos, porém alternando o sentido do campo magnético, ou seja, pólos positivos se alternam com pólos negativos.

Devido à forma construtiva das máquinas de corrente alternada, os processos de conversão eletromecânica de energia estão relacionados praticamente com a componente fundamental da força magnetomotriz (F_{a1}) representada na Figura 3.2 com linha pontilhada. Esta força é matematicamente expressa como:

$$F_{a1}(\theta) = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N}{p} i_a \cos(\theta) \quad (1)$$

onde:

k_w – é o fator que leva em conta a distribuição do enrolamento;

N – é o número de espiras em série por fase;

p – é o número de pólos da máquina;

i_a – é a corrente que percorre o enrolamento da fase 'a';

θ – é o ângulo elétrico medido a partir do eixo magnético do enrolamento. Este ângulo é igual ao número de pares de pólos ($p/2$) vezes o ângulo mecânico; $\theta = \theta_{elet} = \frac{p}{2} \theta_{mec}$.

No caso da máquina de indução a corrente que circula no enrolamento de estator é do tipo alternada e pode ser expressa matematicamente por:

$$i_a(t) = I_m \cos \omega t \quad (2)$$

onde:

I_m – corrente máxima que circula no enrolamento;

ω – velocidade angular em rad/s.

Substituindo esta corrente na equação da força magnetomotriz tem-se:

$$F_{a1}(\theta, t) = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N}{P} I_m \cos(\theta) \cos \omega t \quad (3)$$

O valor máximo de $F_{a1}(\theta, t)$ pode ser expresso por:

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N}{P} I_m \quad (4)$$

Analisando a equação (3) pode-se perceber que a força magnetomotriz apresenta uma distribuição fixa no espaço e sua amplitude varia senoidalmente ao longo do tempo na frequência ω . A Figura 3.3 representa a força magnetomotriz fundamental para instantes de tempo diferentes.

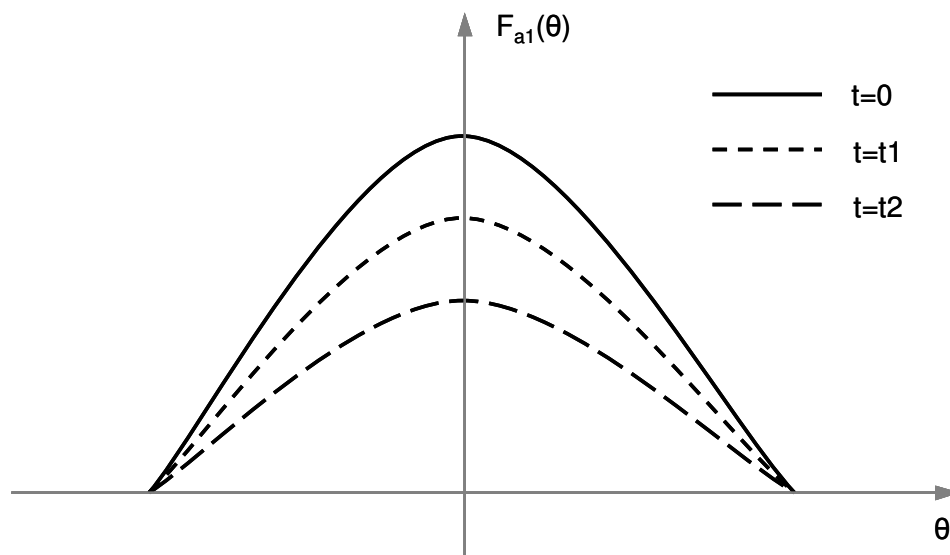


Figura 3.3 – Força Magnetomotriz Pulsante

A expressão (3) é idêntica à de uma onda pulsante, por este motivo o campo produzido por um enrolamento monofásico é chamado de *campo magnético pulsante*.

Utilizando decomposições trigonométricas pode-se representar $F_{a1}(\theta, t)$ da

seguinte forma:

$$F_{a1}(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta) \cos \omega t$$

$$\cos(a) \cos(b) = \frac{1}{2} [\cos(a-b) + \cos(a+b)]$$

$$F_{a1}(\theta, t) = \frac{F_{\max}}{2} [\cos(\theta - \omega t) + \cos(\theta + \omega t)]$$

$$F_{a1}(\theta, t) = F_{a1}^+ + F_{a1}^-$$

Esta decomposição mostra que a FMM pulsante de um enrolamento monofásico pode ser decomposta em duas ondas que se deslocam no espaço com a velocidade ω , mas em sentidos contrários. Isto significa que o campo pulsante produzido por este enrolamento pode ser decomposto em dois campos girantes, uma vez que descrevem um movimento circular. A amplitude de cada um dos campos é metade da amplitude do campo pulsante. A FMM produzida pelo campo que gira no sentido definido como positivo é chamada de FMM de campo direto (F_{a1}^+) e a que gira no sentido contrário é chamada de FMM de campo inverso (F_{a1}^-). Estas forças magnetomotrizes são expressas matematicamente como:

$$F_{a1}^+ = \frac{F_{\max}}{2} \cos(\theta - \omega t)$$

$$F_{a1}^- = \frac{F_{\max}}{2} \cos(\theta + \omega t)$$

A decomposição destes campos é mostrada graficamente na Figura 3.4 (a), (b) e (c). Na Figura 3.4 (a) é mostrado o campo pulsante. Já na Figura 3.4 (b) e (c) são mostrados os dois campos girantes equivalentes.

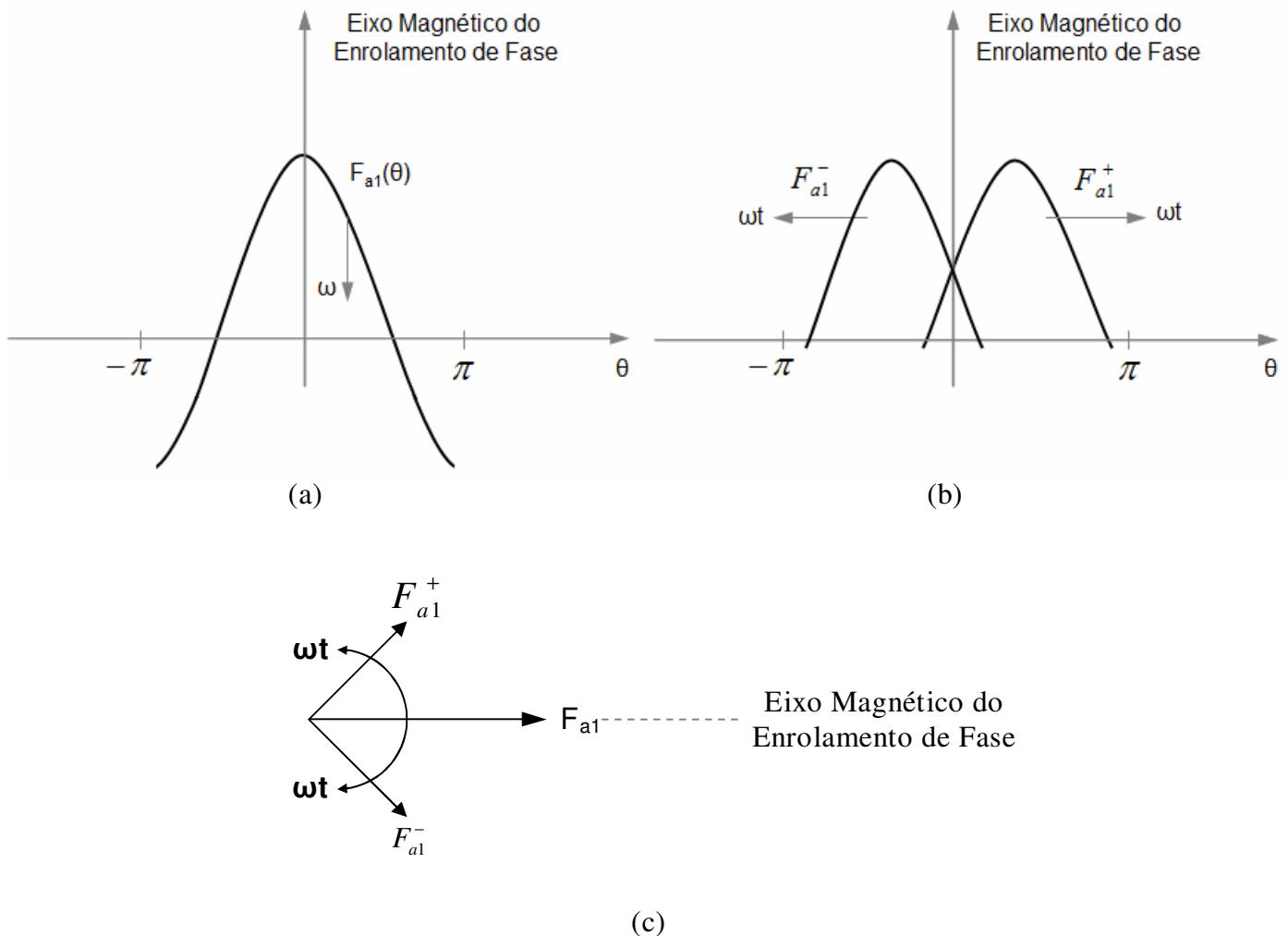


Figura 3.4 – (a) FMM total F_{a1} ; (b) FMM decomposta em duas ondas progressivas F^+ e F^- ; (c) decomposição fasorial de F_{a1} .

No caso das máquinas de indução monofásicas somente o campo direto produz torque útil, o campo inverso produz torque frenante.

3.2.2 – Forças Magnetomotrizas em Máquinas de Indução Gaiola Trifásicas

Conforme dito anteriormente, no caso de uma máquina de indução trifásica são conectadas tensões trifásicas balanceadas aos enrolamentos de estator. Estes enrolamentos estão defasados de 120° elétricos no espaço, ao redor da circunferência

do entreferro. Neste caso, os eixos magnéticos dos enrolamentos também estão defasados de 120° elétricos no espaço. Ver Figura 3.5.

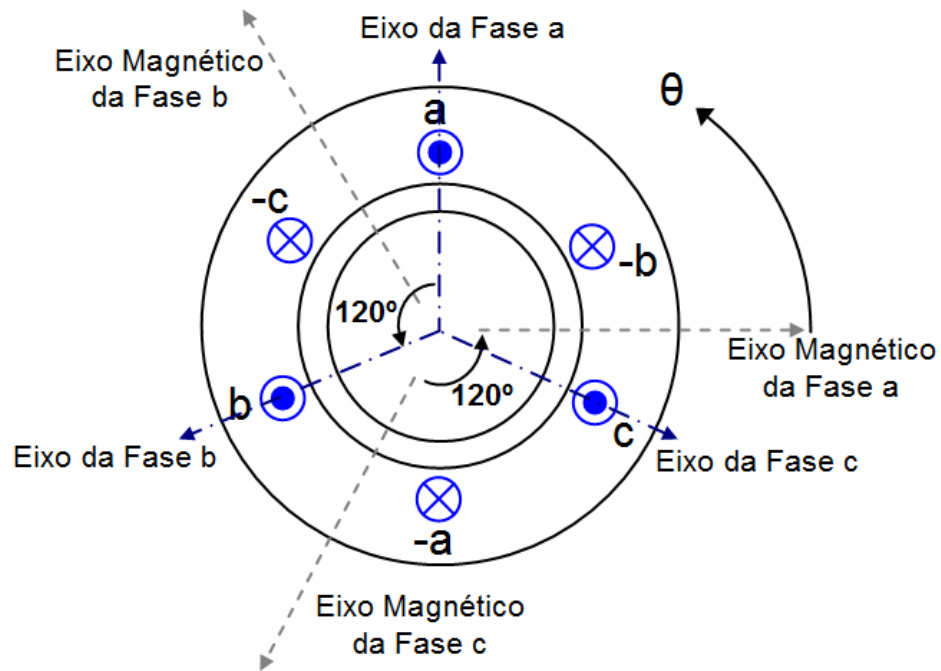


Figura 3.5 – Enrolamentos de Estator Trifásico – 2 Pólos

As correntes instantâneas que circulam nas bobinas do estator são:

$$i_a = I_m \cos \omega t$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t - 240^\circ)$$

I_m – é o valor máximo das correntes de fase dos enrolamentos de cada fase.

Da mesma forma descrita anteriormente, a corrente que circula na fase ‘a’ produzirá uma FMM que pode ser expressa por:

$$F_{a1}(\theta, t) = F_{a1}^+ + F_{a1}^-$$

$$F_{a1}^+ = \frac{F_{\max}}{2} \cos(\theta - \omega t)$$

$$F_{a1}^- = \frac{F_{\max}}{2} \cos(\theta + \omega t)$$

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N}{p} I_m$$

Utilizando o mesmo raciocínio, a força magnetomotriz produzida pela corrente da fase 'b' é expressa por:

$$F_{b1}(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$F_{b1}(\theta, t) = \frac{F_{\max}}{2} [\cos(\theta - 120^\circ - \omega t + 120^\circ) + \cos(\theta - 120^\circ + \omega t - 120^\circ)]$$

$$F_{b1}(\theta, t) = \frac{F_{\max}}{2} [\cos(\theta - \omega t) + \cos(\theta + \omega t + 120^\circ)]$$

$$F_{b1}(\theta, t) = F_{b1}^+ + F_{b1}^-$$

$$F_{b1}^+ = \frac{F_{\max}}{2} \cos(\theta - \omega t)$$

$$F_{b1}^- = \frac{F_{\max}}{2} \cos(\theta + \omega t + 120^\circ)$$

Da mesma forma, a força magnetomotriz produzida pela corrente da fase 'c' pode ser calculada por:

$$F_{c1}(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta + 120^\circ) \cos(\omega t + 120^\circ)$$

$$F_{c1}(\theta, t) = \frac{F_{\max}}{2} [\cos(\theta + 120^\circ - \omega t - 120^\circ) + \cos(\theta + 120^\circ + \omega t + 120^\circ)]$$

$$F_{c1}(\theta, t) = \frac{F_{\max}}{2} [\cos(\theta - \omega t) + \cos(\theta + \omega t - 120^\circ)]$$

$$F_{c1}(\theta, t) = F_{c1}^+ + F_{c1}^-$$

$$F_{c1}^+ = \frac{F_{\max}}{2} \cos(\theta - \omega t)$$

$$F_{c1}^- = \frac{F_{\max}}{2} \cos(\theta + \omega t - 120)$$

O somatório das contribuições das três fases é:

$$F_{a1}(\theta, t) = F_{a1} + F_{b1} + F_{c1}$$

Este somatório pode ser expresso em função da soma das componentes de campo direto e inverso. A soma das ondas progressivas de campo inverso vale zero e é dada por:

$$F_{a1}^-(\theta, t) = F_{a1}^- + F_{b1}^- + F_{c1}^-$$

$$F_{a1}^-(\theta, t) = \frac{F_{\max}}{2} [\cos(\theta + \omega t) + \cos(\theta + \omega t - 120) + \cos(\theta + \omega t + 120)] = 0$$

Já as ondas progressivas de campo direto não somam zero. Esta soma pode ser calculada por:

$$F_{a1}^+(\theta, t) = F_{a1}^+ + F_{b1}^+ + F_{c1}^+ = \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t)$$

3.2.1 – Funcionamento do Gerador de Indução Gaiola Trifásico

Através da análise feita sobre uma máquina de indução trifásica excitada por correntes trifásicas equilibradas pode-se constatar que estas correntes dão origem a uma onda de força magnetomotriz girante. Esta onda de FMM e o campo magnético correspondente são os pontos principais que permitem entender como as máquinas de indução polifásicas funcionam. É essa interação da onda de fluxo magnético do estator com o fluxo do rotor que produz o conjugado.

Para entender o funcionamento da máquina de indução como gerador deve-se conhecer os fenômenos eletromagnéticos que são descritos a seguir.

1º Fenômeno Eletromagnético:

Todo condutor percorrido por uma corrente i e imerso num campo magnético B fica sujeito a ação de uma força.

Este fenômeno é conhecido como a Força de Lorentz e é expresso matematicamente pela seguinte equação:

$$d\vec{F} = i \cdot d\vec{l} \times \vec{B}$$

onde,

i – é a corrente que circula pelo condutor;

l – é o comprimento do condutor e

B – é a densidade de campo magnético.

2º Fenômeno Eletromagnético

Todo condutor percorrido por uma corrente i dá origem a um campo magnético.

Este fenômeno é descrito matematicamente pela Lei de Ampère.

$$\sum i = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

onde,

H – é a intensidade de campo magnético.

3º Fenômeno Eletromagnético:

Um campo magnético variável no tempo induz uma tensão em um condutor concatenado pelo fluxo magnético do campo. Esta tensão tem o sentido de gerar uma corrente que produz um fluxo magnético cujo sentido é contrário ao sentido do fluxo magnético que lhe deu origem.

Este fenômeno eletromagnético é conhecido como Lei de Faraday-Lenz. Esta lei

é expressa por:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} + \oint_{l(S)} (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

onde,

ε - é a tensão induzida no condutor;

ϕ - é o fluxo magnético que pode ser calculado por: $\phi = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$;

v - é a velocidade do condutor;

S - é a superfície do condutor e

l - é uma curva que delimita da superfície.

A tensão induzida expressa pela Lei de Faraday-Lenz apresenta duas componentes. A primeira representa a variação temporal do campo magnético B . Já a segunda componente, também chamada de tensão de velocidade, é a tensão induzida devido a um condutor deslocando-se com velocidade v num campo magnético.

Ao impor uma velocidade ao eixo do gerador o rotor deslocar-se-á com velocidade ω . Caso a máquina esteja isolada, supondo que exista uma campo magnético remanescente nos enrolamentos do estator, ao girar o rotor, surgirá uma tensão de velocidade Eq, conforme a segunda componente da Lei de Faraday $\varepsilon = \oint_{l(S)} (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$. Como os enrolamentos do rotor estão curto-circuitados, esta tensão induzida dará origem a uma corrente induzida no rotor I_q .

A corrente induzida I_q , por sua vez, dá origem à um campo magnético, de acordo com a Lei de Ampère. Este campo magnético induzido tem sentido determinado pela Lei de Lenz, ou seja, o campo induzido tem sentido tal que produz um efeito contrário ao movimento que lhe deu origem. Logo este campo tenderá a se alinhar com o campo magnético do estator, mas em sentido contrário à ω . Este fato resulta num torque elétrico contrário ao torque mecânico.

É importante notar que os efeitos estão interligados. Primeiramente o campo magnético remanescente é pequeno, o que induzirá no rotor uma corrente também pequena. Esta corrente I_q dá origem à um campo magnético do rotor que se desloca em sentido contrário à ω tendendo à se alinhar com o campo magnético do estator.

O campo do rotor induzirá nos enrolamentos de estator uma tensão, de acordo com a Lei de Faraday. Caso a máquina esteja conectada à uma carga, circulará uma corrente nos enrolamentos do estator. Esta corrente fará com que o campo magnético do estator aumente. Em consequência disto, a corrente induzida no rotor também aumentará, elevando, assim, a tensão induzida no estator.

Nota-se uma dificuldade em estabelecer um valor constante (regulado) de tensão no estator, neste caso de geração isolada, em virtude dos efeitos serem dependentes uns dos outros. Desta forma, caso mantenha-se a velocidade constante do rotor, a tensão gerada dependerá diretamente da carga, o que não é desejável.

Ao criar um gerador tem-se o objetivo de gerar uma tensão regulada (de valor constante) e a corrente que o gerador pode fornecer deve variar de zero até um valor limite, determinado pelas características físicas da máquina, tais como saturação do núcleo, isolamento, etc.

No caso de geração conectada com a rede, a tensão de estator é determinada pela rede de energia elétrica a qual o gerador será conectado. A tensão será mais ou menos sensível à oscilações devido ao gerador de indução caso a rede seja mais forte ou fraca. Redes fracas podem ter tensões oscilando dependendo da carga e da geração.

3.3 – Modelo Elétrico do Gerador de Indução

3.3.1 – Operação em Regime Permanente

Nesta seção será apresentada uma análise sobre a operação em regime permanente do gerador de indução gaiola de esquilo. Para maiores detalhes sobre os assuntos contidos nesta seção consultar o livro Máquinas Elétricas do autor Fitzgerald A.E.

A diferença percentual entre as velocidades do campo magnético do estator e do

rotor é definida como escorregamento (s) e é dada pela seguinte expressão:

$$s = \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s}$$

onde,

ω_s – velocidade angular do campo magnético do estator;

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{p}.$$

Através da análise física da máquina de indução é possível definir os parâmetros que representam matematicamente os fenômenos eletromecânicos existentes. Com isso pode-se obter um modelo elétrico do gerador.

Tensões trifásicas equilibradas aplicadas ao estator da máquina dão origem a correntes que circulam pelos enrolamentos de estator. Ao circularem, essas correntes produzem perdas por efeito Joule nestes enrolamentos. Esta perda pode ser representada como uma resistência de estator.

As correntes de estator, conforme visto anteriormente, dão origem a um fluxo magnético. Uma parte deste fluxo magnético é dispersa nas bobinas e isto também gera uma perda de energia. Esse fenômeno é representado pela indutância de dispersão do fluxo de estator.

A equação fasorial para o estator da máquina fica:

$$\dot{V}_s = \dot{E}_s + \dot{I}_s (r_s + jx_s),$$

onde

V_s é tensão nominal do estator;

E_s é a força contraeletromotriz (fcem) gerada pelo fluxo de entreferro resultante;

I_s é a corrente de estator;

r_s é a resistência dos enrolamentos do estator e

x_s é a reatância de dispersão do fluxo do estator.

O circuito equivalente do estator é mostrado na Figura 3.6.

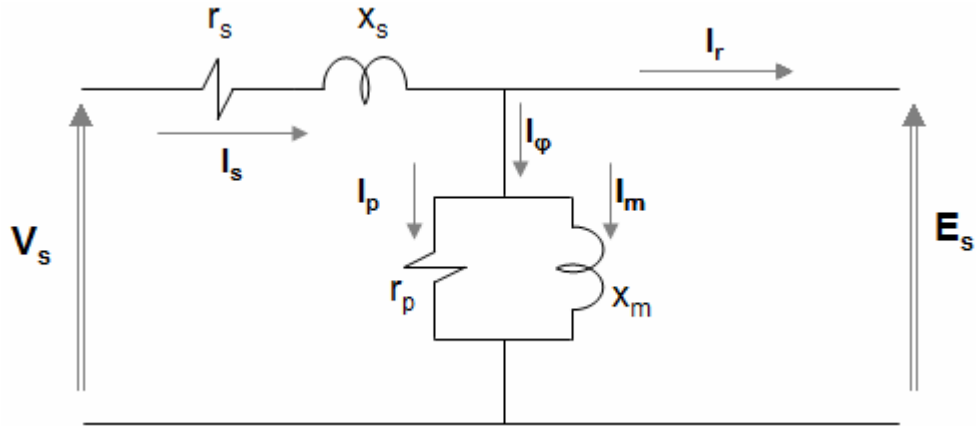


Figura 3.6 – Equivalente Elétrico do Estator da Máquina de Indução

A corrente de excitação I_ϕ é a aquela necessária para gerar fluxo de entreferro resultante na máquina. Ela pode ser decomposta em duas correntes: a corrente de perdas no ferro (I_p) e a componente de magnetização (I_m). Na Figura 3.6 os efeitos destas correntes foram representados através do ramo paralelo formado pela resistência de perdas (r_p) e pela reatância de magnetização (x_m).

Até momento foram representados, através de um circuito elétrico equivalente, os fenômenos que ocorrem no estator. Pode-se notar que este circuito é idêntico ao circuito equivalente de um transformador.

Para completar o circuito elétrico equivalente da máquina de indução trifásica de rotor gaiola de esquilo falta representar os fenômenos que acontecem no rotor. Este circuito é desenvolvido levando-se em conta as tensões e correntes do rotor em termos de grandezas referidas ao estator. Isto é representado matematicamente por:

$$E_{re} = aE_{rotor}$$

$$I_{re} = \frac{I_{rotor}}{a}$$

onde,

a - é a relação entre o número de espiras efetivo por fase do estator e o número de espiras efetivo do rotor.

O estator enxerga uma onda de fluxo e uma FMM girando à velocidade síncrona (ω_s). O fluxo magnético do estator induz uma tensão (E_{re}) no rotor, na frequência de escorregamento e induz também uma fcm no estator (E_s). A velocidade relativa entre o fluxo magnético de estator e o rotor é:

$$\omega_s - \omega_r = s\omega_s$$

Logo, a relação entre as tensões do estator e rotor é expressa matematicamente por:

$$E_{re} = sE_s$$

Por sua vez a corrente do rotor (I_{re}) na frequência de escorregamento cria uma FMM que se opõe à FMM criada pela corrente de carga (I_r). Portanto, pode-se escrever:

$$I_{re} = I_r$$

Dividindo as duas equações, tem-se:

$$\frac{E_{re}}{I_{re}} = s \frac{E_s}{I_r} = r_r + jsx_r$$

Dividindo a equação anterior por (s), tem-se:

$$\frac{E_s}{I_r} = \frac{r_r}{s} + jx_r$$

Isto significa que o estator enxerga condições magnéticas no entreferro que

relacionam a força contraeletromotriz (E_s) e a corrente de carga do estator (I_r). Pela equação anterior, pode-se representar este efeito incluindo-se a impedância $(r_r/s)+jx_r$ aos terminais do circuito equivalente do estator.

Com isso o circuito equivalente da máquina de indução referido ao estator pode ser representado conforme mostra a Figura 3.7.

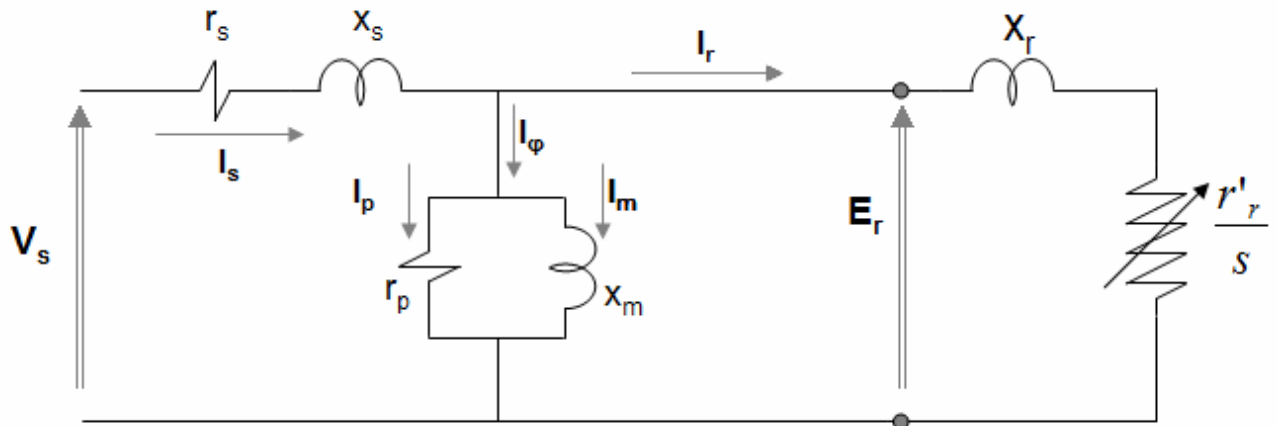


Figura 3.7 – Circuito Equivalente da Máquina de Indução Referido ao Estator

3.3.2 – Operação em Regime Transitório

Quando se deseja fazer uma análise em regime transitório de uma máquina elétrica é necessário a utilização de um modelo que leve em conta as variações das grandezas da máquina com o tempo através de equações diferenciais.

De acordo com a teoria geral de máquinas elétricas é possível representar os fenômenos eletromagnéticos que ocorrem numa máquina assíncrona através de equações de balanço de tensão derivadas das Leis de Ohm, Ampère e Faraday.

A máquina a ser analisada é representada com enrolamentos trifásicos no estator e no rotor, conforme Figura 3.8.

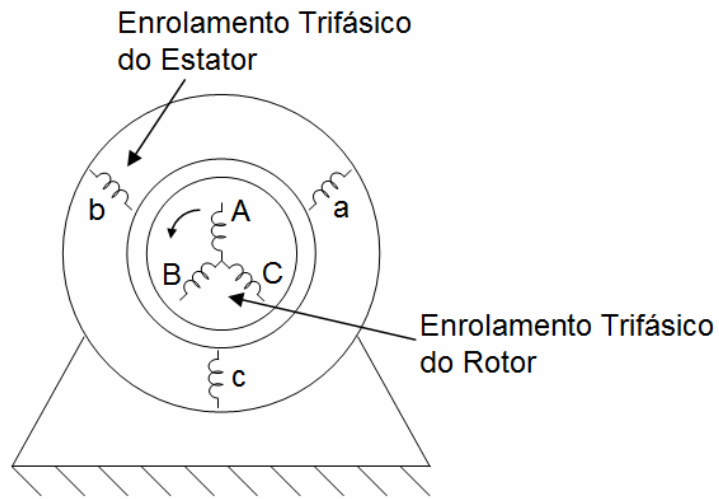


Figura 3.8 - Máquina a ser Analisada

A convenção adotada para a análise do estator e do rotor foi a convenção de carga.

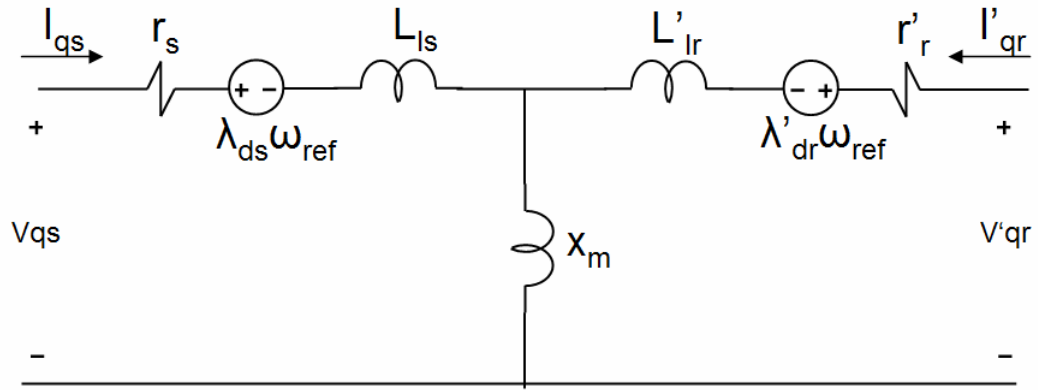
Adotaram-se, também, as seguintes hipóteses simplificadoras:

- enrolamentos balanceados;
- será considerada apenas a componente fundamental da força magnetomotriz produzida pelos enrolamentos do rotor e do estator;
- o efeito das ranhuras é desprezado, ou seja, as indutâncias próprias do estator e do rotor não variam com a posição deste;
- desconsideram-se a histerese e a saturação do núcleo.

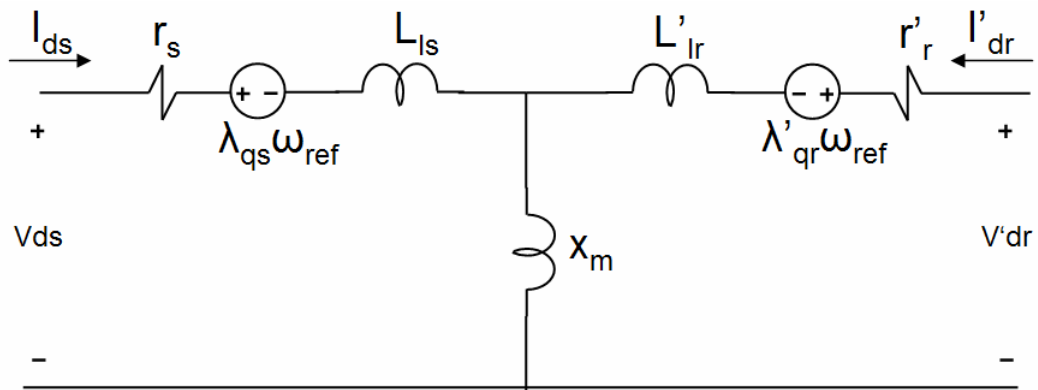
As equações de balanço de tensão são escritas em termos das coordenadas $dq0$, aplicando-se a transformada de Park nas grandezas do estator e do rotor. Isto é feito, pois nas coordenadas ABC os fluxos magnéticos concatenados pelos enrolamentos do rotor e do estator são variáveis.

Realizando uma mudança de coordenadas, ou seja, passando de ABC para $dq0$ e considerando-se que o eixo dq está girando com a velocidade de referência ω_{ref} , os fluxos concatenados se tornam constantes.

As equações que descrevem o regime transitório do gerador de indução são mencionadas a seguir e podem ser representadas através dos circuitos elétricos apresentados na Figura 3.9.



Eixo q



Eixo d

Figura 3.9 – Circuito Equivalente da Máquina de Indução em coordenadas dq0

Transformação de Park – Estator

$$\begin{bmatrix} d_s \\ q_s \\ 0_s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_s & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

Transformação de Park – Rotor

$$\begin{bmatrix} d_r \\ q_r \\ 0_r \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_r & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix}$$

Sistema Elétrico

Estatore

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_{ref} \lambda_{qs} ; \lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}$$

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_{ref} \lambda_{ds} ; \text{onde } \lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}$$

Rotor

$$V'_{dr} = r_r i'_{dr} + \frac{d\lambda'_{dr}}{dt} - (\omega_{ref} - \omega_r) \lambda'_{qr} ; \lambda'_{dr} = L'_s i'_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$V'_{qr} = r_r i'_{qr} + \frac{d\lambda'_{qr}}{dt} + (\omega_{ref} + \omega_r) \lambda'_{dr} ; \lambda'_{qr} = L'_s i'_{qr} + L_m i_{qs}$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds})$$

Sistema Mecânico

$$\frac{d\omega}{dt} = J(T_e - T_m)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m$$

Onde:

V_{ds}, i_{ds} – tensão e corrente do estator do eixo direto (d);

V_{qs}, i_{qs} – tensão e corrente do estator do eixo em quadratura (q);

V'_{dr}, i'_{dr} – tensão e corrente do rotor do eixo direto (d) referidos ao estator;

V'_{qr}, i'_{qr} – tensão e corrente do rotor do eixo em quadratura (q) referidos ao estator;

r_s – resistência do estator;

r'_r – resistência do rotor referida ao estator;

$L_s = L_{ls} + L_m$ indutância do estator;

$L'_r = L'_{lr} + L_m$ indutância do rotor referida ao estator;

L_{ls} - indutância de dispersão do estator;

L'_{lr} - indutância de dispersão do rotor referida ao estator;

L_m - indutância mútua;

p – número de pares de pólos;

H – constante de inércia em segundos;

$J = 1/(2H)$ – coeficiente de inércia [kg.m^2];

$\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$ – fluxos magnéticos concatenados do estator de eixo direto d e eixo em quadratura q ;

$\lambda'_{dr}, \lambda'_{qr}$ – fluxos magnéticos concatenados do rotor referidos ao estator de eixo direto d e eixo em quadratura q ;

ω_{ref} – velocidade angular do eixo de referência girante dq ;

$\omega_r = p\omega_m$ – velocidade elétrica angular do rotor;

θ_s – posição angular do fluxo magnético do estator em relação ao eixo dq ;

θ_m – posição mecânica angular do rotor;

$\theta_r = p \theta_m$ – posição elétrica angular do rotor;

T_e – torque elétrico;

T_m – torque mecânico no eixo da máquina.

Utilizou-se o modelo elétrico do gerador de indução do software de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC para analisar a resposta transitória do gerador perante perfis de velocidade fornecidos pelo sistema de geração de energia através das ondas do mar. Este modelo é similar ao modelo descrito na seção 3.3.2 para análise de regime transitório.

Os resultados das simulações são apresentados no Capítulo 4 deste trabalho.

3.4 – Modelo Elétrico da Rede de Energia Elétrica

O modelo elétrico da rede de energia elétrica a ser utilizado neste projeto é o de fonte de tensão atrás de impedância. Este modelo se mostra bem adequado para representar diferentes tipos de redes, desde as redes fortes até as redes fracas, mas de frequência constante. Isto é possível variando-se a impedância da rede. Quanto menor é a impedância da rede, mais forte ela é, ou seja, menos sensível será a tensão da rede perante as oscilações do que estiver conectado à ela.

O circuito elétrico equivalente da rede é representado na Figura 3.10.

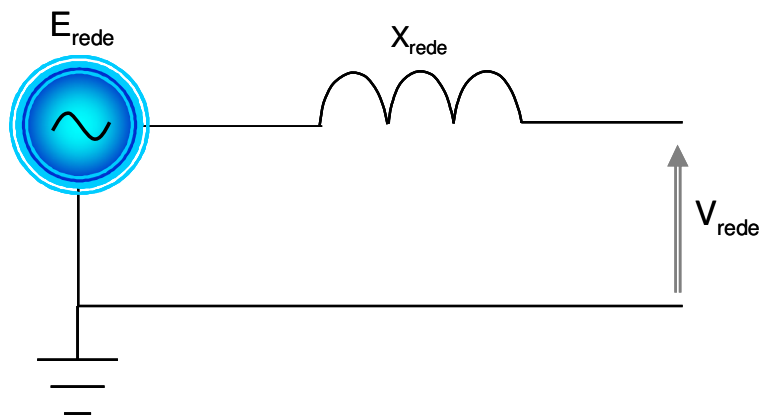


Figura 3.10 – Circuito Equivalente da Rede de Energia Elétrica

3.5 – Conexão do Gerador à Rede

Após descrever o modelo elétrico da máquina de indução e da rede de energia

elétrica a qual o gerador será conectado, será apresentado o modelo completo do sistema de geração de energia elétrica através das ondas do mar.

O gerador utilizado tem as seguintes características:

- Gerador de indução trifásico do tipo rotor gaiola de esquilo;
- Potência elétrica – 3,7kW (5cv);
- Tensão de Linha - 220V;
- Escorregamento nominal - 4%.

O gerador será conectado a rede de energia elétrica cujo nível de tensão é 220V.

O modelo elétrico do sistema de geração com o transformador é representado na Figura 3.11.

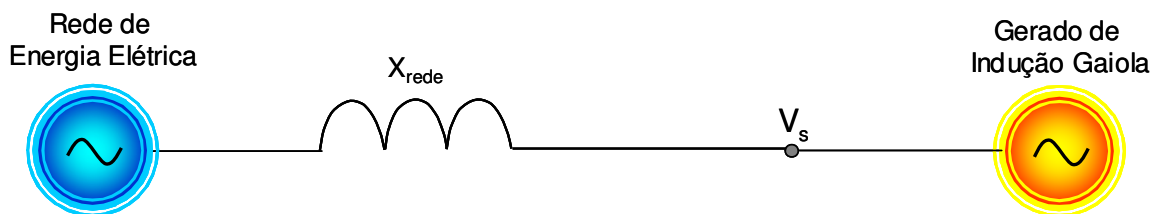


Figura 3.11 – Diagrama Unifilar do Sistema de Geração de Energia Elétrica a Partir das Ondas do Mar

Em condições normais de operação, ou seja, na presença de torque mecânico constante no eixo do gerador e supondo que o sistema esteja em regime permanente a tensão por fase do gerador pode ser expressa da seguinte forma:

$$\dot{V}_s = \dot{I}_s (r_s + jx_s) + \dot{E}_r$$

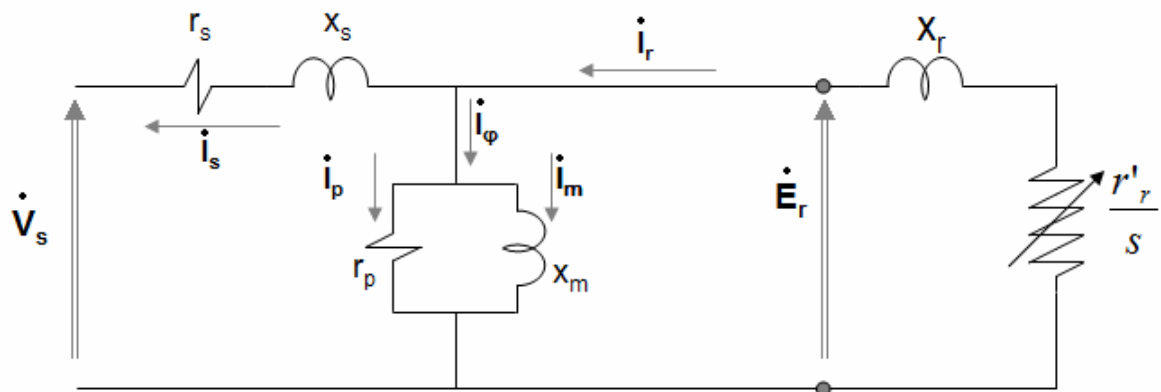


Figura 3.12 – Circuito Elétrico do Gerador de Indução Gaiola

A potência transferida através do entreferro é dada por:

$$P_{g1} = q_1 \dot{I}_r^2 \frac{r'_r}{s}$$

q_1 - é o número de fases do estator.

A potência de perdas no cobre do rotor é:

$$P_{cu} = q_1 \dot{I}_r^2 r'_r$$

A potência mecânica interna (P) no eixo do gerador é igual à potência de entreferro mais as perdas de energia por efeito Joule rotor e pode ser expressa matematicamente por:

$$P = P_{g1} + P_{cu} = q_1 \dot{I}_r^2 \frac{r'_r}{s} + q_1 \dot{I}_r^2 r'_r$$

$$P = q_1 \dot{I}_r^2 \frac{r'_r}{s} (1 - s)$$

$$P = P_{g1} (1 - s)$$

Levando-se em conta as perdas por atrito e ventilação do gerador, a potência

mecânica externa (P_{ext}) no eixo do gerador é igual a:

$$P_{ext} = P_{g1} - P_{atrito} - P_{vent}$$

É sabido que no caso de funcionamento como gerador a velocidade do rotor é maior que a velocidade síncrona, ou seja, o escorregamento (s), nestes casos, é negativo.

Percebe-se, portanto, que geradores de indução com elevado escorregamento são dispositivos de baixo rendimento, pois a potência de entreferro será muito menor que a potência mecânica interna.

A potência mecânica é igual ao conjugado multiplicado pela velocidade angular. Com isto pode-se obter uma relação entre a potência mecânica interna e o conjugado interno, expressa por:

$$P = \omega_r T = (1 - s)\omega_s T$$

T – é o conjugado interno

Analisando o circuito elétrico equivalente por fase, pode-se encontrar uma expressão para a tensão no ponto de conexão do gerador com a rede em função do torque aplicado ao eixo da máquina e do escorregamento nominal. Este equivalente por fase é mostrado da Figura 3.13.

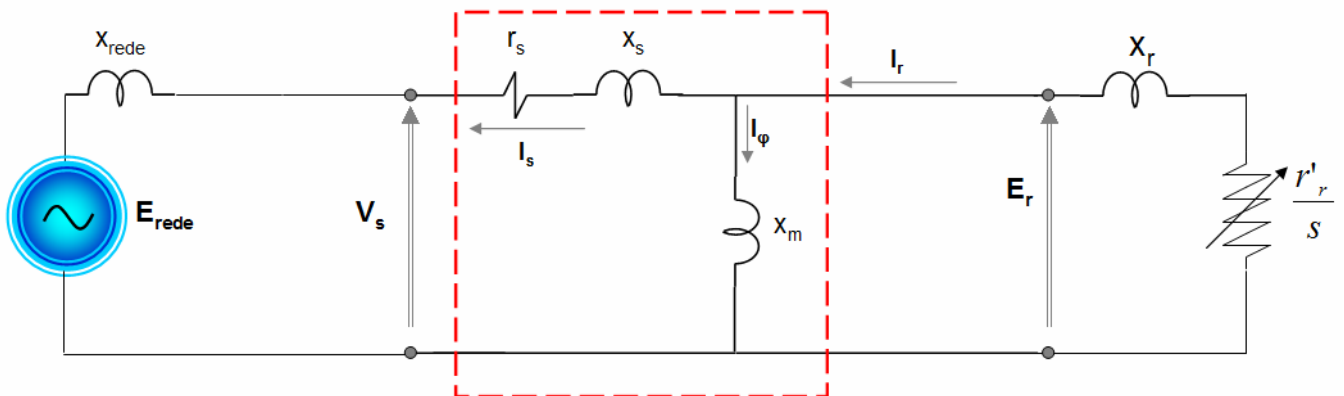


Figura 3.13 – Equivalente por Fase do Sistema de Geração

Para obter uma expressão mais simples relacionando a tensão por fase com o torque e o escorregamento, pode-se redesenhar parte do modelo da máquina utilizando o Teorema de Thévenin. O Teorema é aplicado na região do circuito delimitada pela linha pontilhada da Figura 3.14.

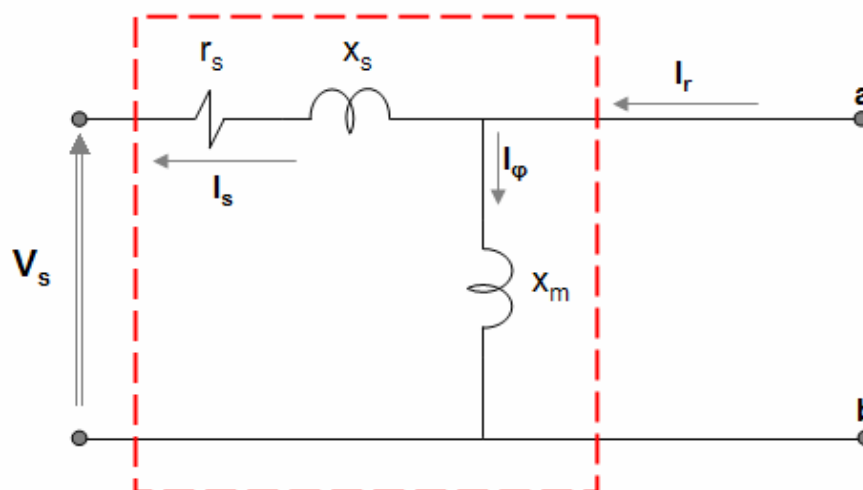


Figura 3.14 – Trecho do Circuito a ser redesenhado pelo Teorema de Thévenin

$$Z_{th} = R_s + jX_s = (r_s + jx_s) // jx_m$$

$$\dot{V}_{th} = \dot{V}_{ab} = \dot{V}_s \frac{jx_m}{(r_1 + jx_1 + jx_m)}$$

O circuito redesenhado é representado na Figura 3.15.

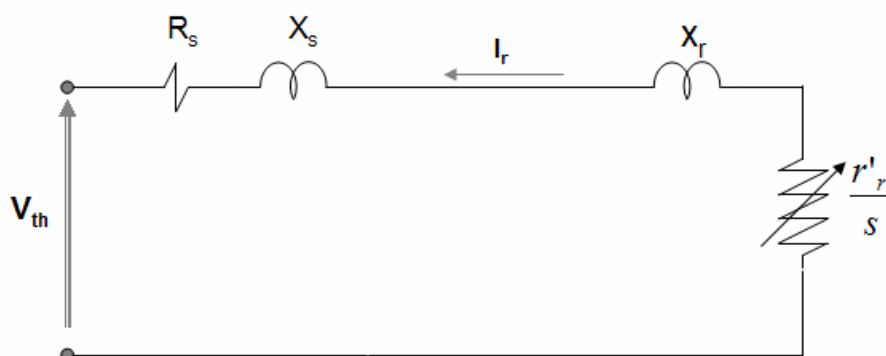


Figura 3.15 – Circuito Redesenhado utilizando o Teorema de Thévenin

$$P = (1 - s)\omega_s T$$

$$T = \frac{P}{(1 - s)\omega_s} = \frac{P_{g1}}{\omega_s}$$

$$T = \frac{1}{\omega_s} q_1 |\dot{I}_r|^2 \frac{r'_r}{s}$$

$$\dot{I}_r = \frac{\dot{V}_{th}}{(R_s + \frac{r'_r}{s}) + j(X_s + x_r)}$$

$$I_r = |\dot{I}_r| = \frac{V_{th}}{\sqrt{(R_s + \frac{r'_r}{s})^2 + (X_s + x_r)^2}}$$

$$T = \frac{1}{\omega_s} q_1 \frac{V_{th}^2}{(R_s + \frac{r'_r}{s})^2 + (X_s + x_r)^2} \frac{r'_r}{s}$$

Reescrevendo a equação acima para obter a tensão de Thévenin em função do Torque tem-se:

$$V_{th} = \sqrt{\frac{[(R_s + \frac{r'_r}{s})^2 + (X_s + x_r)^2] \omega_s T}{q_1 \frac{r'_r}{s}}}$$

A equação acima mostra que a tensão de Thévenin do circuito pode ser calculada em termos dos parâmetros da máquina, da velocidade síncrona, do escorregamento e do Torque aplicado ao eixo do gerador.

É importante ressaltar que o modelo desenvolvido aplica-se a situações de regime permanente senoidal. Logo, para calcular a tensão em situações de transitórios

da rede o modelo desenvolvido não é adequado.

Com a equação da tensão de Thévenin pode-se calcular a tensão de fase gerada pela máquina. Esta pode ser expressa matematicamente como:

$$V_s = \left| \frac{r_s + j(x_s + x_\varphi)}{jx_\varphi} \right| V_{th} = \left| \frac{r_s + j(x_s + x_\varphi)}{jx_\varphi} \right| \sqrt{\frac{[(R_s + \frac{r'_r}{s})^2 + (X_s + x_r)^2] \omega_s T}{q_1 \frac{r'_r}{s}}}$$

$$V_s = \left| \frac{r_s + j(x_s + x_\varphi)}{jx_\varphi} \right| \sqrt{\frac{[(R_s + \frac{r'_r}{s})^2 + (X_s + x_r)^2] \omega_s T}{q_1 \frac{r'_r}{s}}}$$

A equação calcula o valor eficaz ou RMS (do inglês *Root Mean Square*) da tensão de fase gerada pela máquina de indução conectada à rede de energia elétrica. O valor instantâneo da tensão gerada ($v_s(t)$) é expresso por:

$$v_s(t) = \sqrt{2} V_s \sin(\omega_s t)$$

Sob condições nominais de operação da máquina e supondo que a rede de energia elétrica cujo gerador está conectado seja forte, ou seja, pouco sensível a variações de tensão, o gerador se comporta conforme previsto, gerando uma tensão de linha de 220V RMS constantes ao longo do tempo. A potência entregue à rede dependerá do ângulo de defasagem entre as tensões da rede e do gerador, sendo expressa matematicamente por:

$$P_{gr} = \frac{V_s V_{rede} \sin(\phi_{gr})}{(x_{rede})}$$

P_{gr} – potência que flui do gerador para a rede;

ϕ - ângulo de defasagem entre as tensões do gerador e da rede;

No capítulo seguinte foram feitas simulações no tempo utilizando o programa de simulação de transitórios PSCAD/EMTDC. Simulou-se o sistema de geração energia para situações de velocidade e torque oscilantes, pois estas são as características típicas de resposta do conversor de energia das ondas do mar em estudo, segundo Paula *et al.*

Utilizando as equações desenvolvidas através do modelo elétrico em regime permanente descrito neste capítulo foram feitas simulações no programa Matlab a fim de se obter as formas de onda das tensões geradas, do escorregamento, da velocidade do rotor e do torque no eixo da máquina com o objetivo de comparar os resultados do modelo encontrado com os resultados das simulações em PSCAD/EMTDC.

CAPÍTULO 4

Análise no Tempo do Sistema por Simulações em PSCAD/EMTDC

Este capítulo apresenta uma série de simulações no tempo do sistema de geração de energia elétrica a partir das ondas do mar proposto. Para realizar estas simulações foram utilizados os modelos elétricos apresentados no capítulo 3 deste projeto.

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.

O modelo para análise em regime permanente do gerador de indução conectado diretamente à rede descrito na seção 3.5 foi implementado em Matlab através de uma rotina criada para resolver as equações do modelo. Esta rotina tem como dados de entrada os parâmetros da máquina e o torque imposto ao eixo do gerador. A rotina fornece como saída a forma de onda das tensões geradas.

Para a análise do sistema de geração através de equações diferenciais, modelo de regime transitório, foi utilizado o modelo de gerador de indução existente no PSCAD/EMTDC.

Após serem apresentadas as simulações para diferentes condições de operação do sistema, será realizada uma análise das formas de onda através das séries de Fourier

dos sinais encontrados.

Em seguida analisar-se-ão as condições de operação do sistema de geração de energia em relação ao efeito *flicker* e serão determinadas as condições possíveis de operação do sistema proposto baseado nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST) do Sistema Elétrico Nacional estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

4.1 – Simulações do Sistema em PSCAD/EMTDC sob Condições de Torque Oscilante

Sabe-se que uma onda marítima pode ser expressa matematicamente como uma onda senoidal. A equação geral de uma onda que se propaga sobre um eixo x , no mesmo sentido considerado positivo para este eixo, pode ser expressa por:

$$y(x, t) = A_{\max} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \omega t + \delta\right), \quad (4.1)$$

onde:

$y(x, t)$ – posição vertical da onda;

A_{\max} – amplitude máxima da onda;

λ – comprimento de onda;

x -eixo de propagação longitudinal da onda;

t - tempo;

ω – velocidade angular;

δ – fase inicial da onda.

O funcionamento do sistema mecânico depende da onda. Ondas marítimas possuem períodos da ordem de 1 a 20 segundos. Isto representa frequências da ordem de 0,05 a 1 Hz. O movimento vertical da onda desloca, também verticalmente, o flutuador. Este movimento acionará a bomba hidráulica localizada na haste que sustenta o flutuador. Este sistema foi exposto na Figura 2.12 que será novamente mostrada aqui para melhor compreensão do texto.

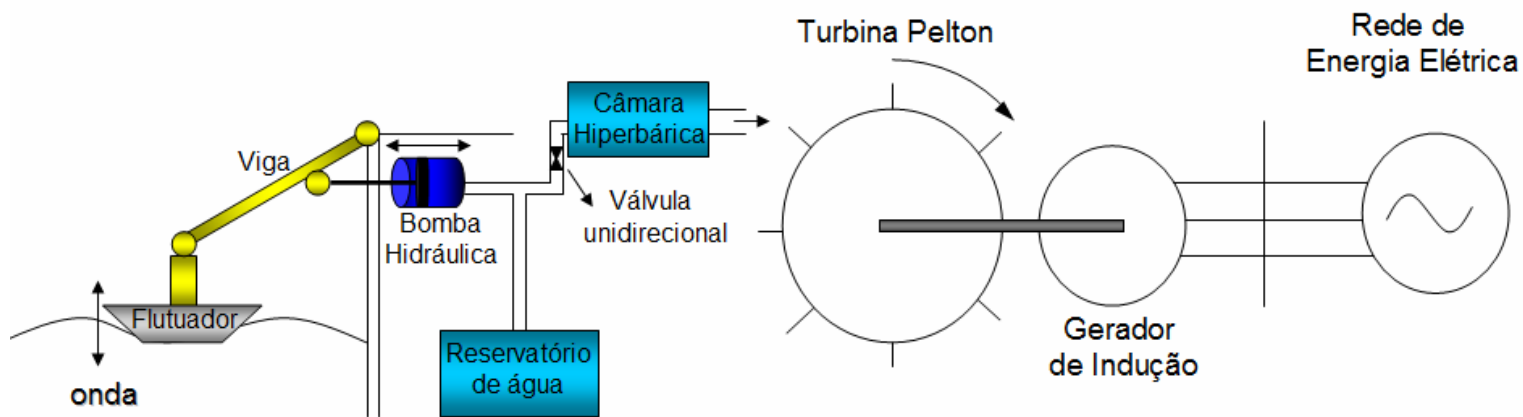


Figura 4.1: Sistema de Geração de Energia através das Ondas do Mar Proposto

O acionamento da bomba hidráulica injeta água do reservatório na câmara hiperbárica. Note que o flutuador está em contato com a superfície da água, logo, na presença de ondas, ele realiza movimentos verticais oscilantes descritos por uma função senoidal.

Com isso pode-se intuir que tanto o movimento da bomba, como o jato de água que sai da câmara hiperbárica podem ser descritos por uma função oscilante, do tipo senoidal. Essas oscilações são, em parte, filtradas pela câmara de alta pressão, mas não é possível uma filtragem completa, visto que para isso seria necessária a utilização de uma câmara ideal, ou seja, de dimensões ou pressões infinitas, pois quanto maior é a câmara, melhor é a equalização da energia potencial das ondas.

Conclui-se, portanto, que o movimento da turbina estará sujeito a um jato de água com oscilação. Logo a velocidade angular da turbina irá variar, e com isso o torque aplicado ao eixo do gerador também apresentará oscilações. Como a frequência só depende da fonte de produção da onda, pode-se assumir que a frequência das oscilações do torque e da velocidade angular do gerador serão iguais à frequência da onda marítima, ou seja, entre 0,05 e 1,0 Hertz.

Segundo *Rosa et al.* [10], a série de Fourier da velocidade do jato de água que aciona a turbina apresenta um valor médio, uma senóide de frequência fundamental igual a frequência da onda e uma série de harmônicos de ordem superior que dependem das dimensões da câmara hiperbárica, formas geométricas do flutuador, etc.

Sabendo-se isto pode-se escrever uma expressão matemática para o torque do

gerador de indução que segue:

$$T_m(t) = \bar{T} + \Delta T_m f(t) \quad (4.2)$$

onde,

T_m – é o torque mecânico no eixo do gerador de indução;

ΔT_m – amplitude de oscilação do torque mecânico;

$f(T)$ – função periódica.

A equação 4.2 representa o torque mecânico aplicado ao eixo do gerador de indução gaiola de esquilo utilizado. Sabe-se que $f(t)$ é uma função periódica que depende da velocidade do jato de água na turbina. Esta função pode ser escrita em termos da série de Fourier. Em primeira análise considerou-se apenas a componente fundamental da série de Fourier do sinal da função periódica. Na seção 4.4 serão apresentados resultados da simulação do sistema para a situação específica em que a câmara hiperbárica é retirada do sistema. Com isto o jato de água assume uma forma pulsada, isto é, quando o flutuador realiza um período de oscilação (sobe e desce), um jato de água unidirecional é lançado na turbina. As formas de onda do torque simulado podem ser observadas na Figura 4.2.

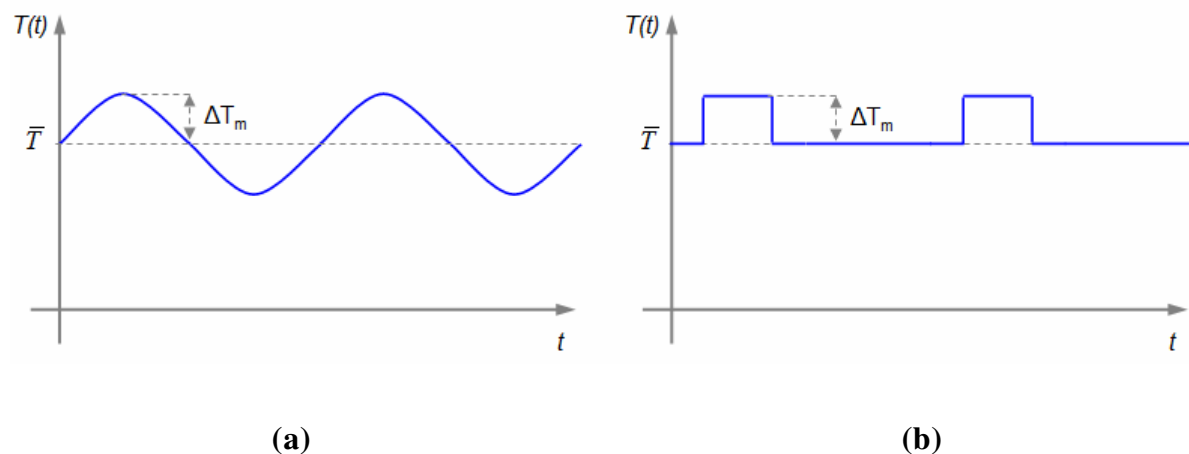


Figura 4.2 – Formas de Onda do Torque Simulado; (a) – Componente fundamental com Câmara Hiperbárica; (b) – Torque Pulsado – sem Câmara Hiperbárica

As simulações em PSCAD/EMTDC foram realizadas utilizando as seguintes aproximações:

- o torque aplicado ao eixo do gerador é dado por (4.2);
- foram desprezados os efeitos de saturação do núcleo magnético da máquina.

Utilizando as premissas supra citadas foram feitas simulações do sistema de geração de energia para redes fortes e redes fracas.

Primeiro simulou-se o sistema com uma rede forte (reatância baixa). Em seguida foram simuladas situações de conexão do gerador à redes moderadas e fracas (reatâncias mais altas). Com isso foi possível analisar a forma de onda da tensão no ponto de conexão com a rede e a potência enviada do gerador para a rede.

O circuito simulado no software PSCAD/EMTDC é representado na Figura 4.3.

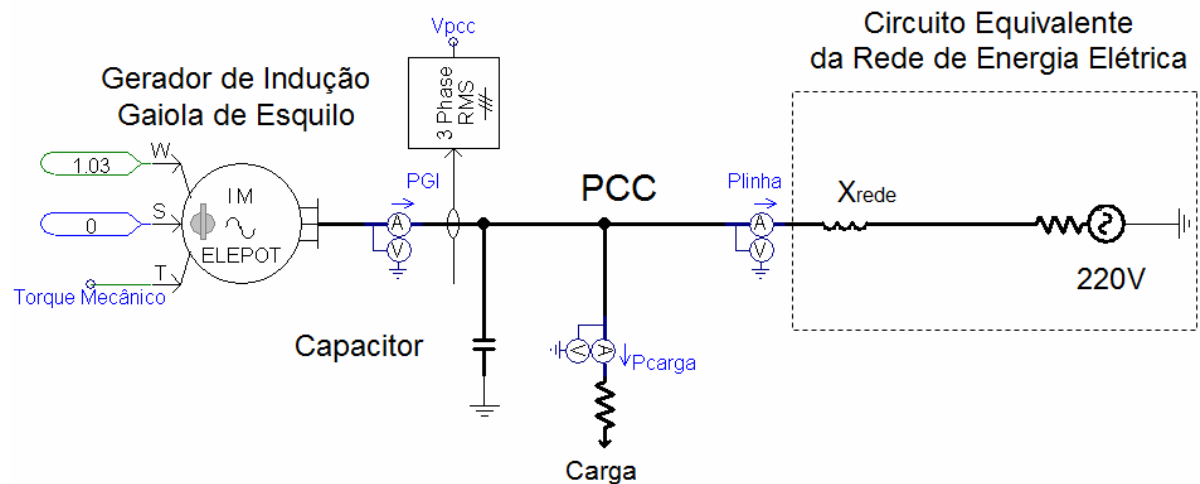


Figura 4.3 – Sistema de Geração de Energia Simulado do PSCAD/EMTDC

Um banco de capacitores foi colocado no circuito para fornecer parte da potência reativa necessária para a operação da máquina de indução. Isto foi feito com o objetivo de anular a queda de tensão no ponto de conexão comum provocada pelo consumo de potência reativa do gerador de indução. Este consumo é devido à magnetização do núcleo da máquina. O banco de capacitores trifásico foi conectado junto ao terminal do gerador e possui capacidade de compensação adotada igual a um terço da potência aparente nominal da máquina, conforme sugerido por *Jenkins et al.*,

2000 [6].

Para a simulação do sistema considerou-se a utilização de uma máquina de indução gaiola com as seguintes especificações:

Potência nominal – 3,7kW (5cv);

Tensão de linha nominal – 220V;

Rendimento – 88%;

Fator de potência – 0,8;

Número de pólos – 2;

Escorregamento nominal – 4%;

Os parâmetros da máquina de indução são os fornecidos pelo fabricante. São eles:

- resistência por fase do estator – 0,012 pu;

- reatância por fase do estator – 0,276 pu;

- reatância de magnetização – 6,61 pu;

- resistência do rotor – 0,11 pu;

- reatância do rotor – 0,3 pu.

As bases utilizadas foram:

$$V_{base} = 220V ;$$

$$S_{base} = \frac{3700}{0,8} = 4625VA ;$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{220^2}{4625} = 10,46\Omega.$$

A potência do banco de capacitores utilizado foi de:

$$Q_{cap} = \frac{S_{nom}}{3} = \frac{P_{nom} \cos \varphi}{3} = \frac{(3700)(0,8)}{3}$$

$$Q_{cap} = \frac{\left(\frac{P_{nom}}{\cos \varphi} \right)}{3}$$

$$Q_{cap} = \frac{(3700/0,8)}{3} = 1541,66 \text{ var}$$

Com o valor da potência reativa a ser compensada foi possível calcular a capacitância por fase a ser inserida no circuito simulado. O cálculo foi feito da seguinte forma:

$$Q_{cap} = 3 \frac{(V_{fh_nom})^2}{X_c} = 1541,66 \text{ var},$$

onde:

V_{fh_nom} – é a tensão de fase nominal da máquina;

X_c – é a reatância por fase do banco de capacitores.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_s C_{cap}},$$

onde:

f_s – é a frequência síncrona (60Hz);

C_{cap} – é a capacitância por fase do banco de capacitores;

$$X_c = 3 \frac{(V_{fn_nom})^2}{Q_{cap}};$$

$$X_c = 3 \frac{127^2}{1541,66} = 31,38\Omega;$$

$$C_{cap} = \frac{1}{2\pi f_s X_c};$$

$$C_{cap} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 31,38} = 84,5\mu F.$$

Resultados Obtidos

A seguir são mostrados os resultados obtidos através das simulações em PSCAD/EMTDC.

Primeiramente simulou-se o sistema de geração de energia considerando-se apenas a componente fundamental da função periódica $f(t)$ do torque mecânico aplicado no eixo do gerador. Com isso o torque pode ser expresso matematicamente por:

$$T_m(t) = \bar{T} + \Delta T_m \cos(\omega_{osc} t) pu \quad (4.3)$$

onde:

$\omega_{osc} = 2\pi f_{onda}$ - velocidade angular do torque;

f_{onda} - frequência da onda.

Nesta simulação considerou-se o torque médio (\bar{T}) igual a 100% do valor nominal de torque para o gerador de indução e a amplitude de oscilação (ΔT_m) igual a 10% do valor nominal. A frequência da onda (f_{onda}) adotada foi de 1Hz. Substituindo estes valores na equação (4.3) tem-se:

$$T_m(t) = 1,0 + 0,1 \cos(2\pi 1t) \text{ pu}, \quad (4.4)$$

A reatância da rede utilizada foi de 5%, nas bases do gerador.

A forma de onda do torque mecânico aplicado ao eixo do gerador está representada na Figura 4.4.

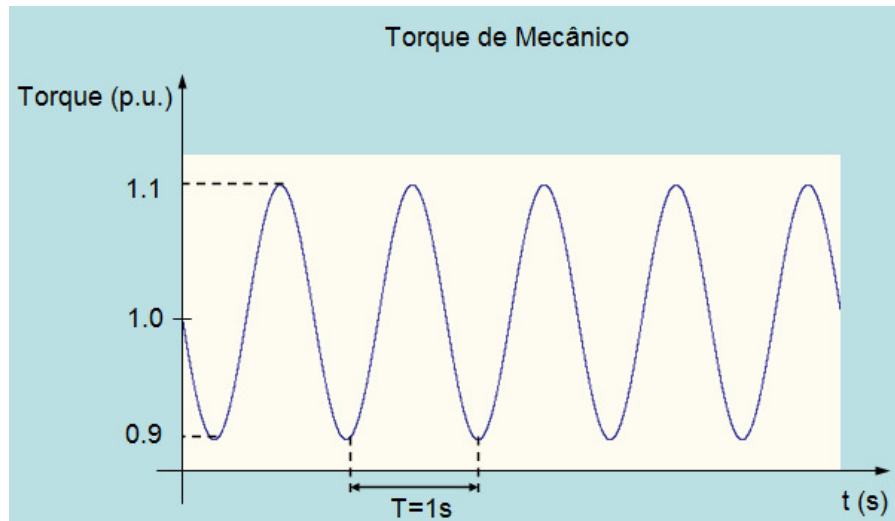
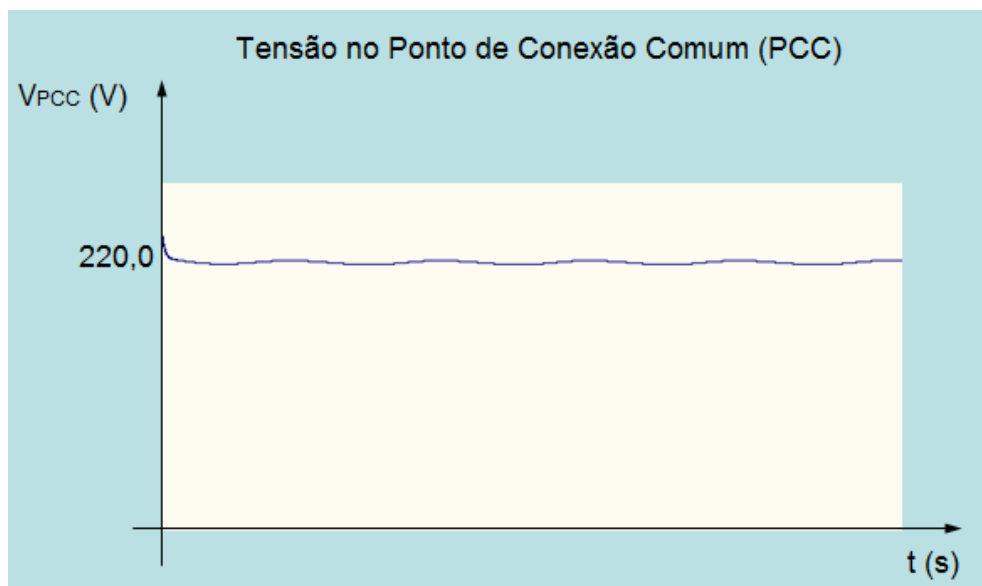


Figura 4.4 – Torque Mecânico Aplicado ao Eixo do Gerador de Indução

A forma de onda da tensão RMS ('Root Mean Square') no ponto de conexão com a rede obtida com a simulação para o caso de rede forte é apresentada na figura 4.5.



(a)

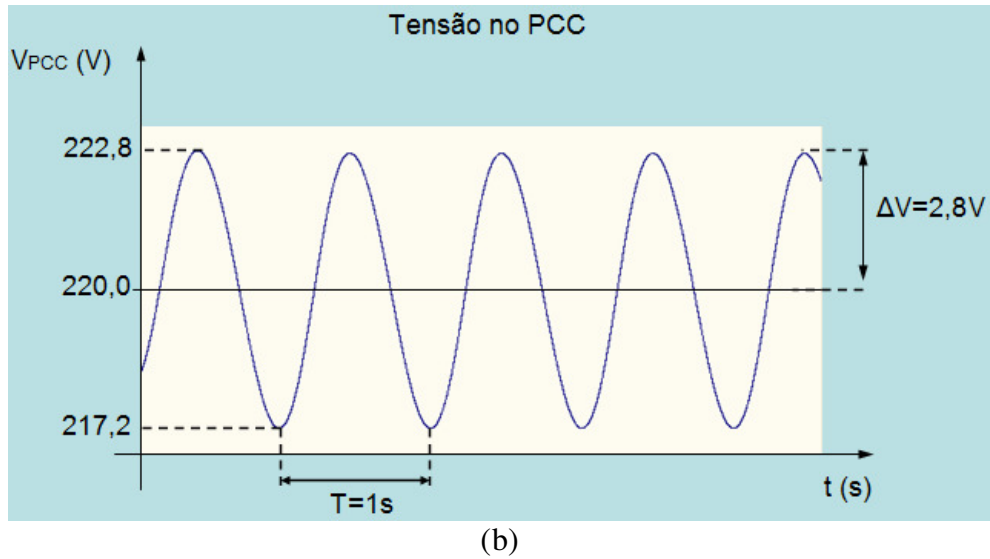


Figura 4.5 – (a) Tensão no PCC para rede forte ($X_{rede}=5\%$), (b) zoom na forma de onda da tensão no PCC

Através da observação do gráfico da Figura 4.5 (a) pode-se perceber que o valor médio quadrático da tensão do ponto de conexão comum apresenta uma oscilação de aproximadamente 1,3%. Esta oscilação é melhor visualizada na Figura 4.5 (b), onde pode-se observar que o período de oscilação é de um segundo e que a forma de onda escursiona senoidalmente entre 217,2 V e 222,8 V, tendo como valor médio 220V.

As potências ativas que fluem no circuito simulado com rede forte podem ser observadas na Figura 4.6.

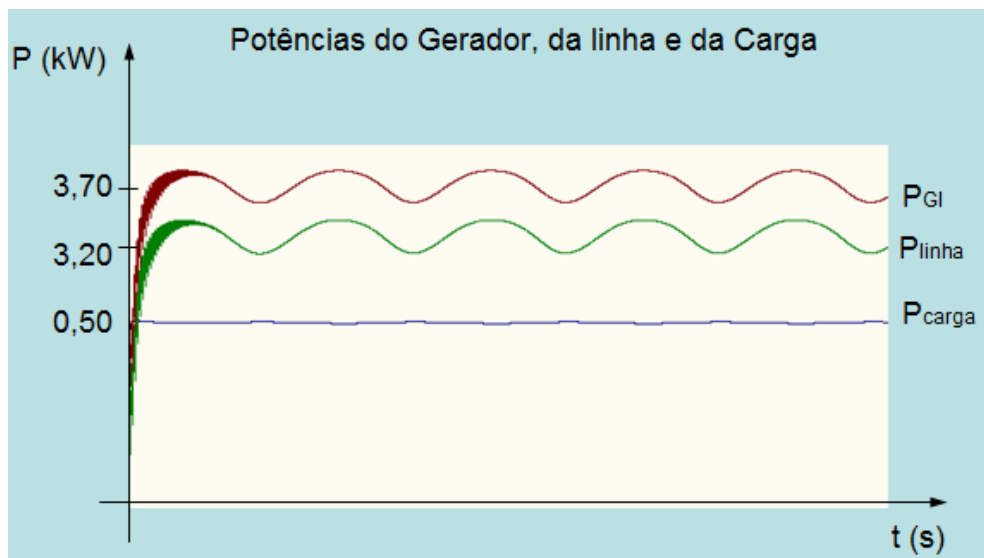


Figura 4.6 – Formas de Onda das Potências que fluem no Circuito

Através da análise dos gráficos pode-se perceber uma oscilação em todas as formas de onda na frequência da oscilação do toque mecânico aplicado (1Hz). Observando-se a forma de onda da tensão na fase ‘a’ do circuito, é possível notar que o sinal em 60Hz está sendo modulado em amplitude por um outro sinal, também senoidal, cuja frequência é de 1Hz. Esta modulação está representada na Figura 4.7.

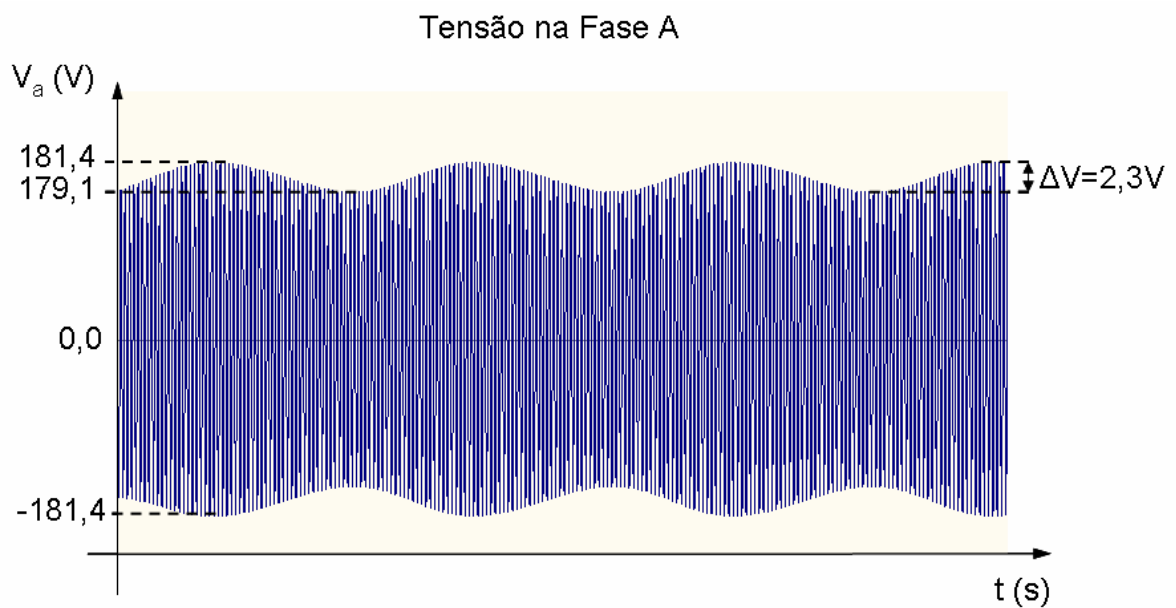


Figura 4.7 – Tensão na Fase ‘a’ do Circuito

Segundo *Grzegorz Wiczynski et al.*, um sinal $v(t)$ modulado em amplitude pode ser escrito como:

$$v(t) = v_s(t)[1 + v_{\text{mod}}(t)], \quad (4.2)$$

onde:

$v(t)$ – sinal modulado em amplitude;

$v_s(t) = v_m \cos(\omega_s t)$ – sinal da portadora ;

$\omega_s = 2\pi f_s$ - é a velocidade angular do sinal portador;

f_s – é a frequência da portadora;

$v_{\text{mod}}(t)$ – sinal modulante.

Um sinal modulante qualquer pode ser escrito como uma Série de Fourier da seguinte forma:

$$v_{\text{mod}}(t) = \sum_{h=1,2,3,\dots} k_h \cos(h\omega't),$$

onde:

- h – é o número do harmônico;
- k_h – é a amplitude da harmônica;
- $\omega' = 2\pi f_m$ - é a velocidade angular do sinal modulante e
- f_m – é a frequência do sinal modulante.

Observando a Figura 4.5 da tensão de fase gerada, pode-se notar que a amplitude da modulação é igual a 2,8V. Escrevendo esta amplitude como porcentagem da tensão de pico do sinal modulado tem-se que $k_1 = 1,27\%v_m$.

Utilizando a equação (4.2) para representar o sinal da tensão modulada e considerando-se apenas a componente fundamental do sinal modulante, tem-se:

$$v(t) = 127\sqrt{2} \cos(2\pi 60t)[1 + 0,0127 \cos(2\pi 1t)] \quad (4.3)$$

Realizando simulações com enfraquecimento da rede foi possível construir dois gráficos em função das reatâncias da rede: um da parcela da potência gerada que flui para a própria rede (P_{linha}) e outro da variação de tensão (ΔV) em função da reatância da rede. Estes gráficos estão representados nas Figuras 4.8 e 4.9, respectivamente.

Observando o gráfico da Potência da Figura 4.8 pode-se notar que com o enfraquecimento da rede a potência enviada do gerador para o sistema diminui, ou seja, com o aumento de X_{rede} , a potência gerada e enviada para a rede de energia elétrica cai.

Analisando o gráfico da variação de tensão da Figura 4.9 observa-se que com o enfraquecimento da rede a oscilação da tensão no ponto de conexão aumenta, ou seja, para um aumento de X_{rede} , a amplitude do sinal modulante aumenta.

Tanto a redução na potência enviada para a rede como o aumento da amplitude do sinal modulante são fatores que influenciam negativamente a qualidade da energia

gerada. Na seção 4.4 os efeitos de flutuação de tensão serão melhor explicados.

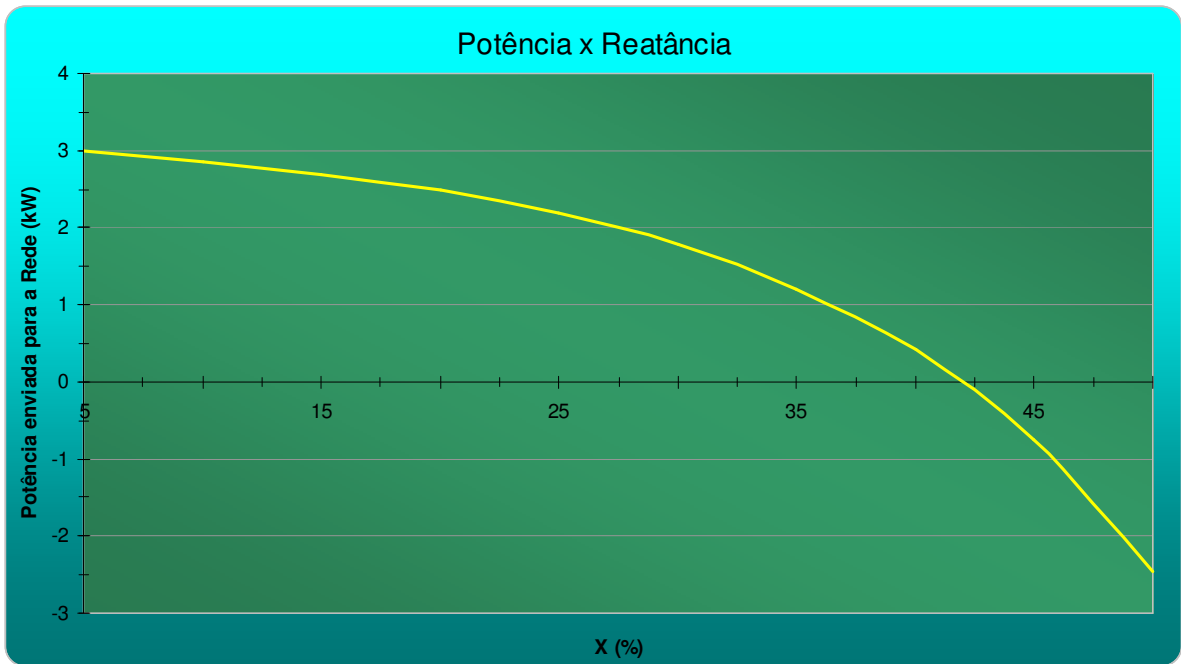


Figura 4.8 – Potência que Flui para a Rede em Função da Reatância

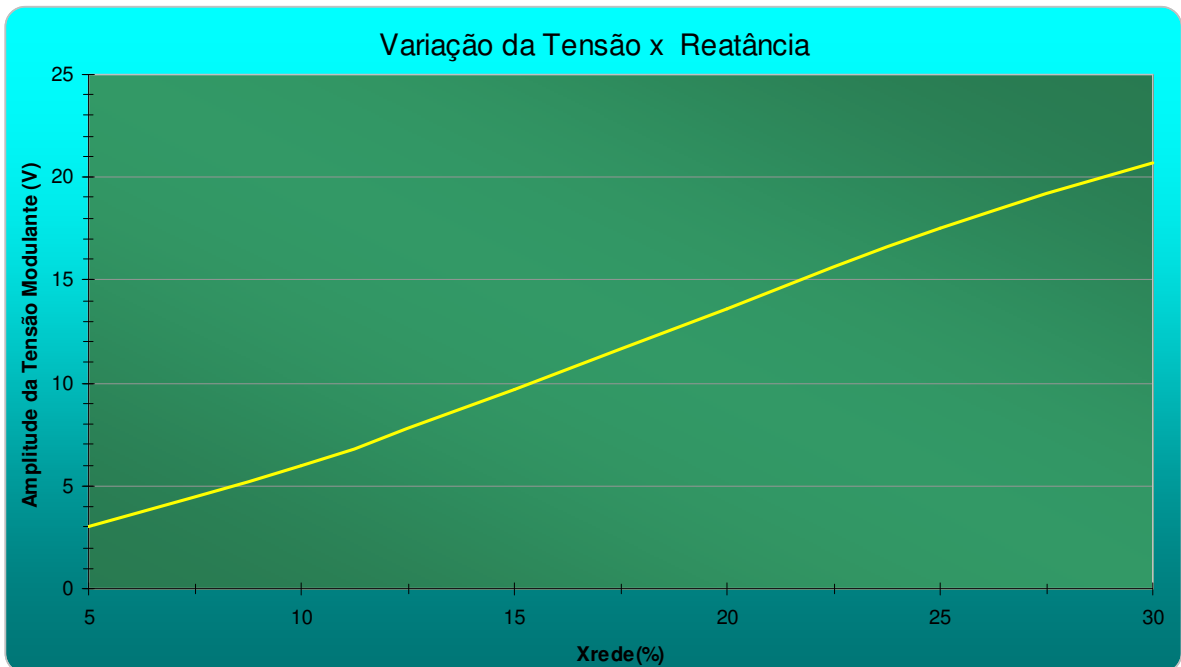


Figura 4.9 – Amplitude da Tensão Modulante em Função da Reatância

4.2 – Simulações do Sistema Através das Equações Desenvolvidas a Partir do Modelo em Regime Permanente

As equações para análise em regime permanente do gerador de indução gaiola apresentadas na seção 3.5 foram utilizadas para comparar a resposta do sistema de geração em relação à resposta transitória, com o objetivo de se obter um modelo mais simples que fosse capaz de analisar o sistema de geração de energia elétrica em estudo, já que, neste caso, não se trata de um regime transitório e sim de um regime permanente cuja tensão possui alguns harmônicos.

A análise das tensões de fase do sistema gerado através das Séries de Fourier serão melhor explicadas na seção 4.3.

As equações de regime permanente foram implementadas através do software Matlab e os resultados obtidos são mencionados a seguir.

O torque e a velocidade oscilantes são fornecidos como dados de entrada para a rotina desenvolvida, assim como os parâmetros da máquina.

Os parâmetros e especificações do gerador de indução gaiola de esquilo utilizados nesta seção são os mesmos utilizados na seção 4.1.

Equações implementadas em Matlab:

$$T_m(t) = \bar{T} + \Delta T_m \cos(\omega' t)$$

$$V_{th} = \sqrt{\frac{[(R_s + \frac{r'_r}{s})^2 + (X_s + x_r)^2] \omega_s T}{q_1 \frac{r'_r}{s}}}$$

$$v_s(t) = \sqrt{2} V_s \cos(\omega_s t)$$

Para esta simulação adotou-se que a velocidade do gerador se comportaria da

seguinte forma:

$$\omega_m(t) = \bar{\omega}_m + \Delta\omega_m \cos(\omega' t),$$

onde:

ω_m - é a velocidade mecânica no eixo do gerador;

$\bar{\omega}_m$ - é o valor médio da velocidade mecânica;

$\Delta\omega_m$ - é a amplitude da oscilação senoidal.

O escorregamento nominal da máquina é de 4%. Como a velocidade para operação como gerador deve ser maior que a velocidade síncrona ω_s e adotando-se que a excursão da velocidade será de $\delta\omega_m$ % em cima do seu valor médio tem-se:

$$\omega_m(t) = 1,04\omega_s [1 + \delta\omega_m \cdot \cos(\omega' t)]$$

Reescrevendo a velocidade mecânica do rotor em pu e tomando como base a velocidade síncrona, tem-se:

$$\omega_m(t)_{pu} = 1,04[1 + \delta\omega_s \cdot \cos(\omega' t)]$$

Com os parâmetros da máquina e utilizando as equações descritas na seção 3.5 criou-se uma rotina em Matlab para analisar a relação torque por velocidade da máquina de indução estudada. Para esta curva adotou-se que a tensão de fase era a tensão nominal de 127V.

Com a curva de torque por velocidade foi possível calcular o torque que corresponde à um escorregamento de 4%.

A curva calculada pela rotina desenvolvida é apresentada na Figura 4.10.

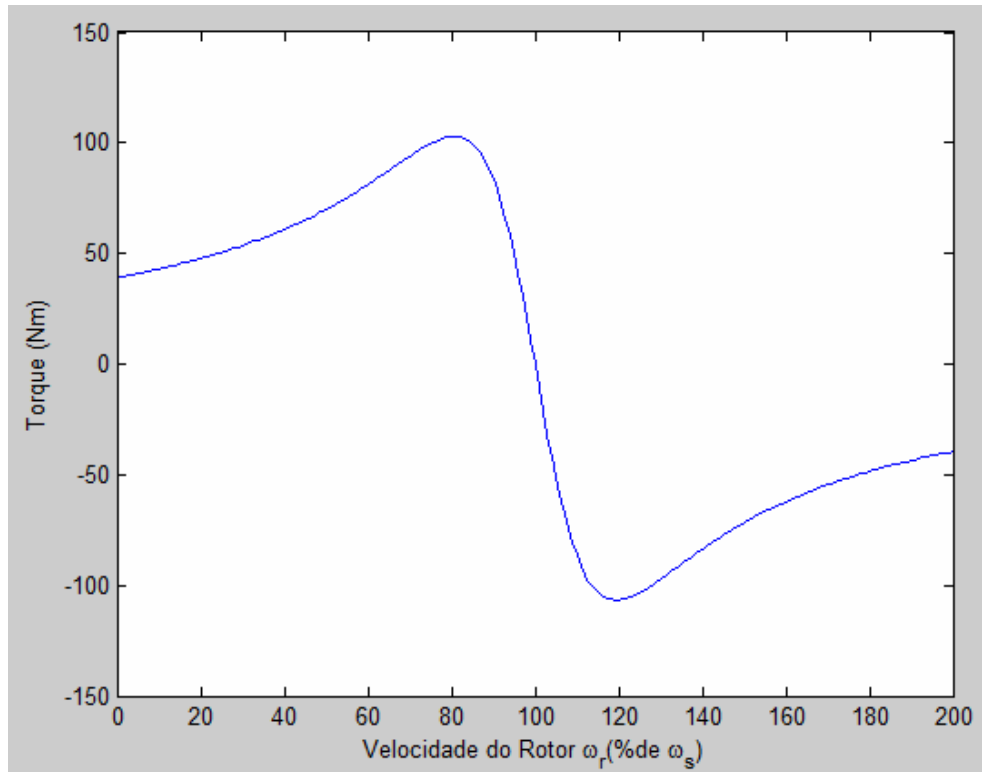


Figura 4.10-Curva Torque x Velocidade da máquina

O valor do torque encontrado para a velocidade de $\omega_m = 1,04\omega_s$ foi de -41,58 Nm.

Conforme mencionado na seção 4.1, o torque oscilante no eixo da turbina pode ser expresso com tendo um valor médio (torque nominal para escorregamento de 4%) mais uma componente senoidal de amplitude igual a ΔT_m do torque nominal.

Nesta simulação adotou-se o valor de ΔT_m igual a 10% do torque nominal.

O torque aplicado pode ser expresso matematicamente da seguinte forma:

$$T_m(t) = -41,58[1 + 0,1 \cdot \cos(2\pi 1t)]$$

Os valores máximo e mínimo do torque mecânico aplicado são respectivamente -37,42 Nm e -45,73 Nm.

Na curva de torque por velocidade, com estes valores de torque a velocidade varia de $1,0357 \omega_s$ a $1,0444 \omega_s$.

A velocidade, então, pode ser expressa como:

$$\omega_m(t) = 1,04\omega_s [1 + (0,44/100) \cdot \cos(\omega' t)]$$

O gráfico da velocidade ao longo do tempo está representado na Figura 4.11.

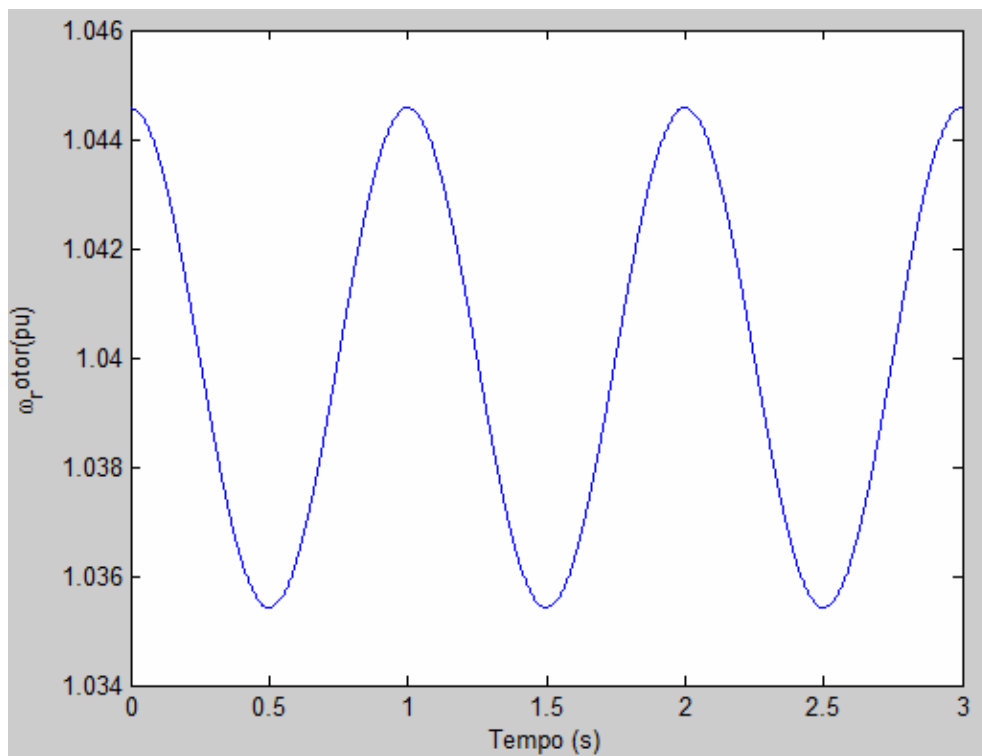


Figura 4.11 – Velocidade do Rotor

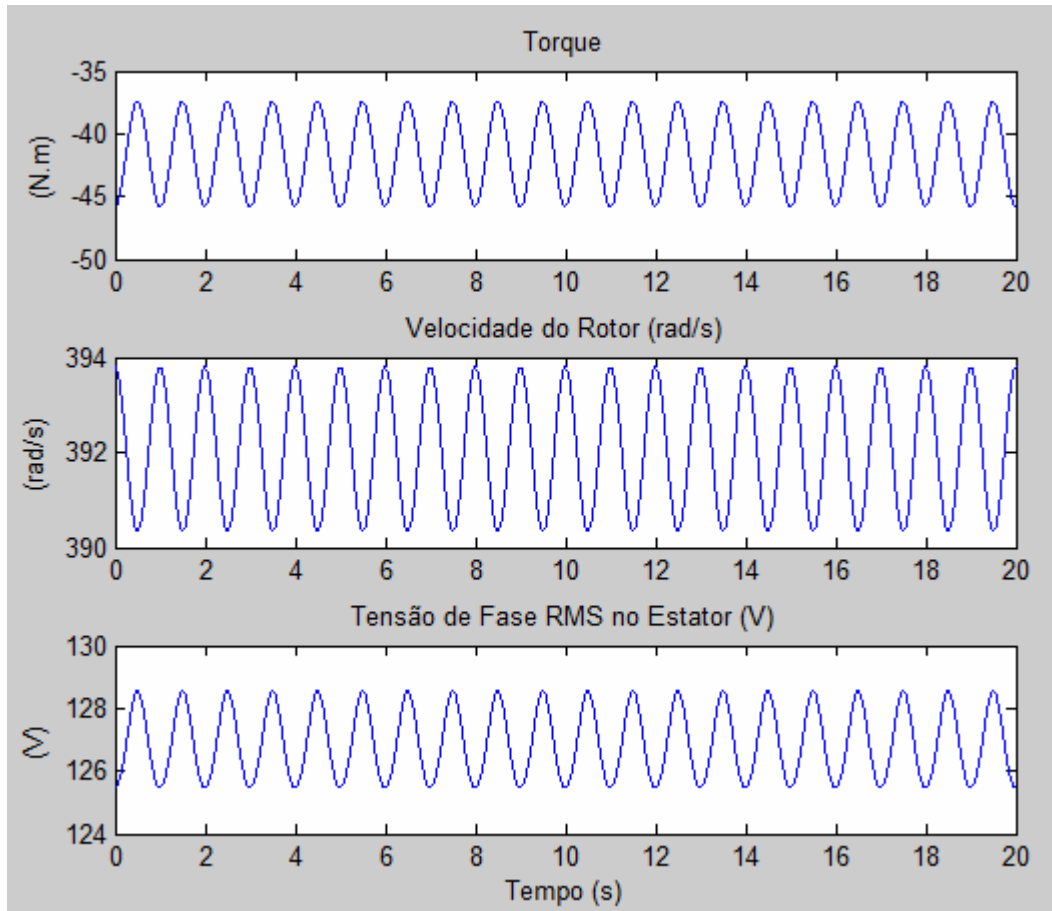


Figura 4.12 – Torque, Velocidade e Tensão do Gerador

4.3 – Análise das Tensões a Partir de Séries de Fourier

As formas de onda das tensões fase-neutro de um sistema trifásico balanceado são dadas por:

$$v_a(t) = V_m \cos(\omega_s t)$$

$$v_b(t) = V_m \cos(\omega_s t - 120^\circ)$$

$$v_c(t) = V_m \cos(\omega_s t - 240^\circ)$$

Ao analisar os resultados das simulações realizadas nas seções 4.1 e 4.2 nota-se que as tensões geradas através do sistema de geração de energia a partir das ondas do mar apresenta tensões que não são puramente senoidais, mas que contém uma modulação em amplitude de suas senóides de frequência 60Hz.

Estas tensões moduladas podem ser expressas em Séries de Fourier contendo a componente fundamental (60Hz), a componente com frequência do sinal modulante e uma série de outras componentes do sinal modulante.

As tensões de fase geradas através do sistema de geração proposto podem ser expressas matematicamente como:

$$v_a(t) = V_m \cos(\omega_s t) [1 + \sum_{h=1,2,3,\dots} k_h \cos[h(\omega' t)]]$$

$$v_b(t) = V_m \cos(\omega_s t - 120^\circ) [1 + \sum_{h=1,2,3,\dots} k_h \cos[h(\omega' t - 120^\circ)]]$$

$$v_c(t) = V_m \cos(\omega_s t - 240^\circ) [1 + \sum_{h=1,2,3,\dots} k_h \cos[h(\omega' t - 240^\circ)]]$$

Expandindo os somatórios, tem-se:

$$v_a(t) = V_m \cos(\omega_s t) [1 + k_1 \cos(1\omega' t) + k_2 \cos(2\omega' t) + k_3 \cos(3\omega' t) + \dots]$$

$$v_b(t) = V_m \cos(\omega_s t - 120) [1 + k_1 \cos(1\omega' t - 120) + k_2 \cos(2\omega' t - 240^\circ) + k_3 \cos(3\omega' t - 360) + \dots]$$

$$v_c(t) = V_m \cos(\omega_s t + 120) [1 + k_1 \cos(1\omega' t + 120) + k_2 \cos(2\omega' t + 240^\circ) + k_3 \cos(3\omega' t + 360) + \dots]$$

Realizando os produtos, tem-se:

$$v_a(t) = V_m [\cos(\omega_s t) + k_1 \cos(\omega_s t) \cos(1\omega' t) + k_2 \cos(\omega_s t) \cos(2\omega' t) + k_3 \cos(\omega_s t) \cos(3\omega' t) + \dots]$$

$$v_b(t) = V_m [\cos(\omega_s t - 120) + k_1 \cos(\omega_s t - 120) \cos(1\omega' t - 120) + k_2 \cos(\omega_s t - 120) \cos(2\omega' t - 240^\circ) + \\ + k_3 \cos(\omega_s t - 120) \cos(3\omega' t) + \dots]$$

$$v_c(t) = V_m [\cos(\omega_s t + 120) + k_1 \cos(\omega_s t + 120) \cos(1\omega' t + 120) + k_2 \cos(\omega_s t + 120) \cos(2\omega' t + 240^\circ) + \\ + k_3 \cos(\omega_s t + 120) \cos(3\omega' t) + \dots]$$

Utilizando decomposições trigonométricas pode-se reescrever as tensões

moduladas da seguinte forma:

$$\cos(a)\cos(b) = \frac{1}{2}[\cos(a+b) + \cos(a-b)]$$

$$v_a(t) = V_m[\cos(\omega_s t) + \frac{k_1}{2}[\cos((\omega_s + \omega')t) + \cos((\omega_s - \omega')t)] + \frac{k_2}{2}[\cos((\omega_s + 2\omega')t) + \cos((\omega_s - 2\omega')t)] + \frac{k_3}{2}[\cos((\omega_s + 3\omega')t) + \cos((\omega_s - 3\omega')t)] + \dots]$$

$$v_b(t) = V_m[\cos(\omega_s t - 120^\circ) + \frac{k_1}{2}[\cos((\omega_s + \omega' - 240^\circ)t) + \cos((\omega_s - \omega')t)] + \frac{k_2}{2}[\cos((\omega_s + 3\omega' - 120^\circ)t) + \cos((\omega_s - 3\omega')t)] + \dots + \frac{k_3}{2}[\cos((\omega_s + 3\omega')t) + \cos((\omega_s - 3\omega')t)] + \dots]$$

$$v_c(t) = V_m[\cos(\omega_s t + 120^\circ) + \frac{k_1}{2}[\cos((\omega_s + \omega' + 240^\circ)t) + \cos((\omega_s - \omega')t)] + \frac{k_2}{2}[\cos((\omega_s + 3\omega' + 120^\circ)t) + \cos((\omega_s - 3\omega')t)] + \dots + \frac{k_3}{2}[\cos((\omega_s + 3\omega')t) + \cos((\omega_s - 3\omega')t)] + \dots]$$

As equações supra citadas são as tensões nas fases geradas com o sistema de geração proposto.

Para fins de comparação, foi criada uma rotina em Matlab para calcular o espectro de frequências da Série de Fourier dos sinais de tensão simulados nas seções 4.1 e 4.2. Estes sinais de tensão são utilizados como dados de entrada da rotina.

As tensões simuladas nas seções 4.1 e 4.2 possuem amplitude do sinal modulante de 1,27% e 1,21%, respectivamente. Esses valores podem ser facilmente

calculados por:

Regime transitório (seção 4.1):

Tensão máxima RMS de linha – 222,8V

Tensão Média de linha – 220V

$$\text{Amplitude da modulação} = \frac{(222,8 - 220)}{220} \sim 1,27\%$$

Regime Permanente (seção 4.2):

Tensão máxima de fase – 128,55V

$$\text{Tensão máxima de linha} = 128,55\sqrt{3} = 222,66V$$

$$\text{Tensão Média de linha} = 127\sqrt{3} = 220V$$

$$\text{Amplitude da modulação} = \frac{(222,66 - 220)}{220} \sim 1,21\%$$

As tensões expressões matemáticas das tensões obtidas com as simulações das seções 4.1 e 4.2 e considerando-se apenas a frequência fundamental do sinal modulante são:

$$v_{trans}(t) = 220\sqrt{2}[\cos(2\pi 60t)[1 + 0,0127 \cos(2\pi 1t)]]$$

$$v_{reg.perm}(t) = 220\sqrt{2}[\cos(2\pi 60t)[1 + 0,0121 \cos(2\pi 1t)]]$$

onde:

$v_{trans}(t)$ - tensão modulada obtida a partir do modelo de regime transitório e

$v_{reg.perm}(t)$ - tensão modulada obtida a partir do modelo de regime permanente.

Os gráficos das Séries de Fourier das tensões obtidas através da rotina implementada em Matlab, simulada na seção 4.1 e 4.2 são mostrados nas Figuras 4.13 e

4.14, respectivamente.

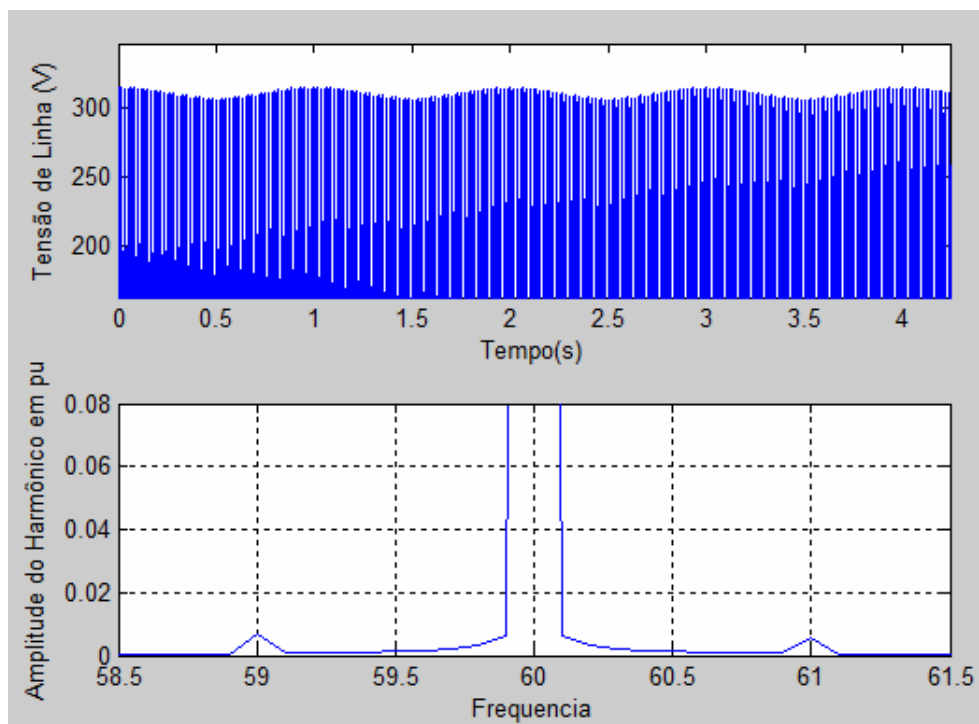


Figura 4.13 – Tensão de Linha – Modelo de Regime Transitório

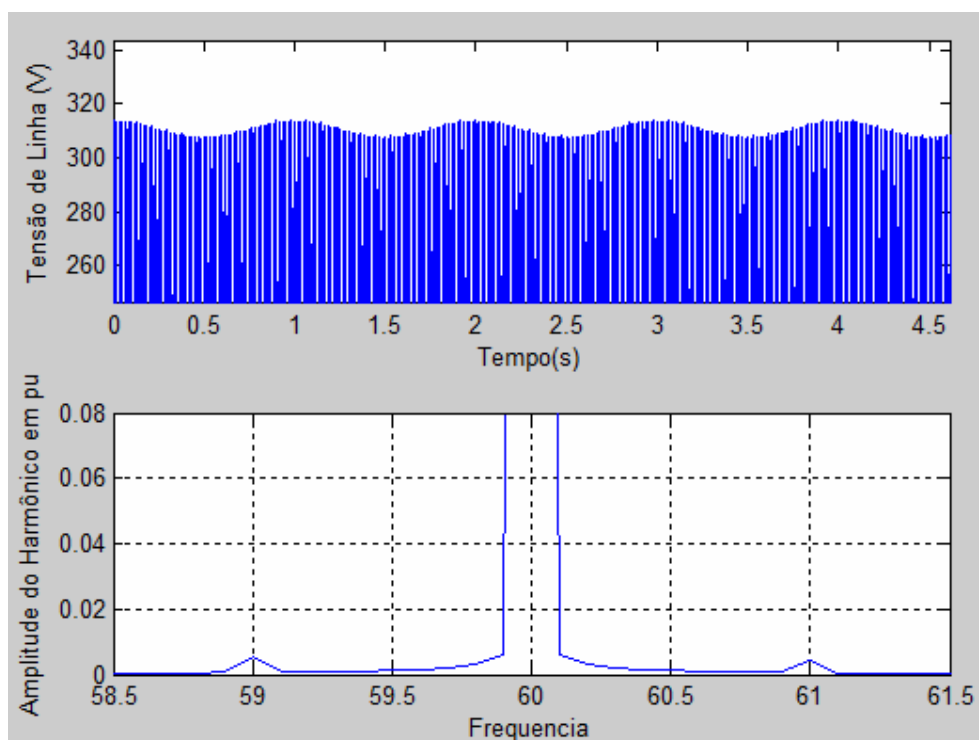


Figura 4.14 – Tensão de Linha – Modelo de Regime Transitório

Os gráficos das tensões estão com zoom para melhor visualização da modulação.

Através da análise dos gráficos das Figuras 4.12 e 4.13 conclui-se que as equações obtidas com as séries de Fourier estão de acordo com os resultados calculados numericamente.

As expressões analíticas das tensões obtidas são:

$$v_{trans}(t) = 220\sqrt{2}[\cos(2\pi 60t) + \left(\frac{0,0127}{2}\right)\cos(2\pi(60+1)t)] + \left(\frac{0,0127}{2}\right)\cos(2\pi(60-1)t)]$$

$$v_{reg.perm}(t) = 220\sqrt{2}[\cos(2\pi 60t) + \left(\frac{0,0121}{2}\right)\cos(2\pi(60+1)t)] + \left(\frac{0,0121}{2}\right)\cos(2\pi(60-1)t)]$$

Estas equações estão de acordo com as equações para as tensões moduladas desenvolvidas nesta seção.

Nota-se uma diferença na amplitude da modulação das tensões obtidas com os modelos da seção 4.1 e 4.2. Esta pode ser calculada percentualmente em relação ao menor valor obtido como segue:

$$\frac{0,0127 - 0,0121}{0,0121} \sim 5\%$$

Esta discrepância entre os valores é resultado das simplificações realizadas no modelo de regime permanente.

4.4 – Simulação do Sistema sem a Câmara Hiperbárica

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através do modelo em regime transitório para o sistema de geração de energia sem a câmara hiperbárica. Desta forma, o torque aplicado ao eixo do gerador terá uma forma pulsada, conforme Figura 4.15.

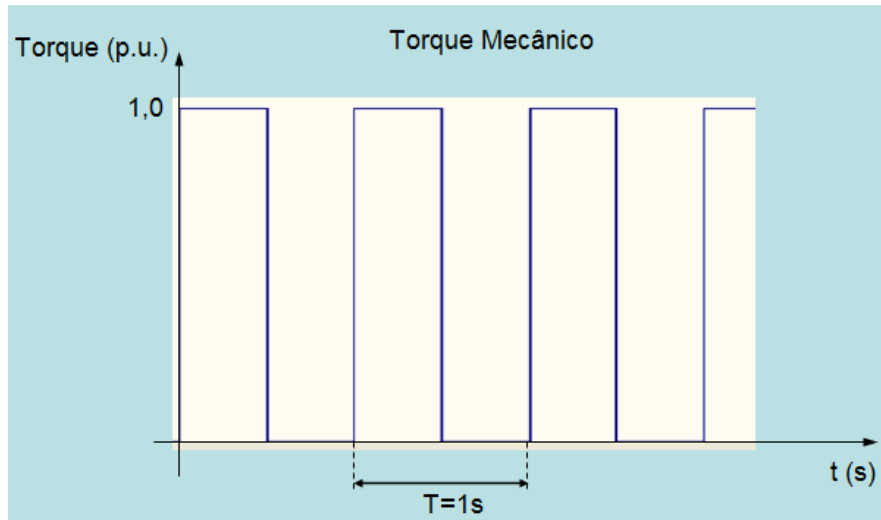


Figura 4.15 – Torque Aplicado ao Eixo do Gerador

A forma de onda da tensão de linha RMS do gerador, obtida através da simulação em PSCAD/EMTDC, resultou em uma onda quadrada de período igual a 1Hz (período da onda), amplitude igual a 7V (~3% do valor nominal) e nível médio de 220V. A tensão RMS no ponto de conexão comum pode ser observada na Figura 4.16.

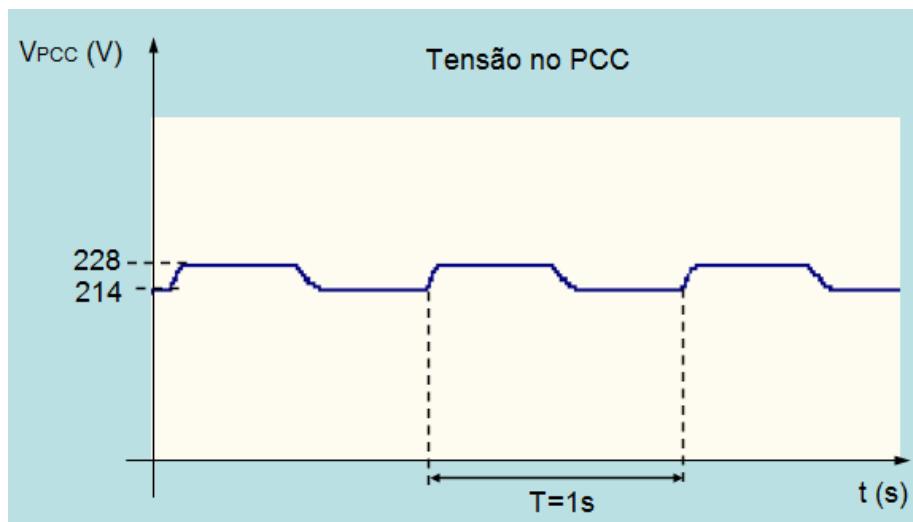


Figura 4.16 – Tensão RMS do Gerador

A potência gerada pela máquina de indução sujeita à este tipo de torque (pulsante) é mostrada na Figura 4.17.

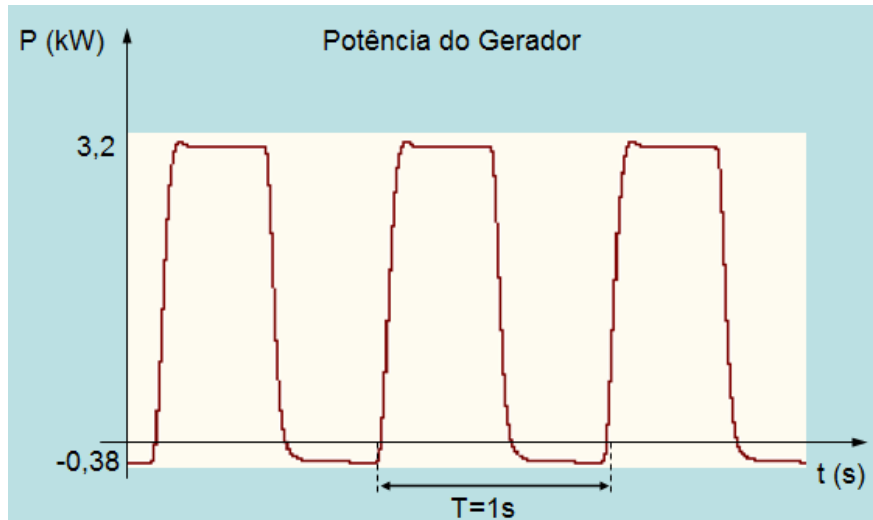


Figura 4.17 – Potência Gerada pela Máquina de Indução

Observando a Figura 4.17 pode-se concluir que a máquina gera potência apenas quando o torque é igual a 1pu. Nos instantes em que o torque vale zero, a máquina de indução gaiola funciona como um motor, absorvendo potência da rede. Isto é verificado na Figura 4.17 através do valor negativo de potência encontrado. O valor de -0,38kW de potência absorvida da rede, para a operação como motor, é devido às perdas da máquina (perdas por atrito, por ventilação e perdas no cobre dos enrolamentos de rotor e estator).

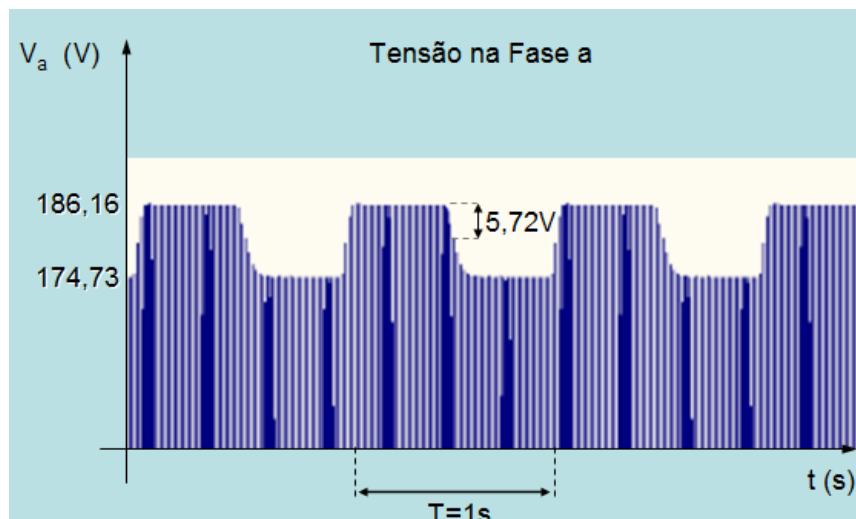


Figura 4.18 – Potência Gerada pela Máquina de Indução

As tensões de fase obtidas apresentam uma modulação quadrada na frequência

de 1Hz. Isto pode ser verificado na Figura 4.18. O valor máximo da tensão foi de 186,16V.

Na seção 4.5 serão analisados os níveis de flutuação encontrados nas tensões obtidas com as simulações das seções 4.1, 4.2 e 4.4.

4.5 – Flutuação de Tensão e Efeito Flicker

Segundo definição da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão.

A determinação da qualidade da tensão de um dado sistema de energia elétrica quanto à flutuação de tensão tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa no consumidor final, que tenha seus pontos de iluminação alimentados em baixa tensão.

O *efeito Flicker* é a denominação do efeito de cintilação da luz que ocorre principalmente em lâmpadas incandescentes quando estas são submetidas à uma tensão que apresenta uma certa flutuação em seu valor RMS, ou seja, quando esta oscila numa frequência mais baixa que a frequência da rede.

Certas pessoas, quando submetidas à este tipo de efeito apresentam alguns sintomas como: desconforto, enjôo, irritabilidade e stress. Em casos de pessoas mais sensíveis e de flutuações em frequências consideradas críticas os efeitos podem ser mais graves, podendo evoluir para uma convulsão.

Para avaliar o nível de *flicker* em sistemas elétricos submetidos à este perfil de tensão criou-se uma norma que avalia o nível de percepção/incômodo do efeito em relação às diferentes frequências do sinal modulante.

A norma internacional que estabelece requisitos para a medição de *flicker* é a norma IEC 61000-4-15, “IEC Flickermeter – Functional and Design Specifications”.

O efeito é perceptível para o espectro de frequência do sinal modulante variando de 5 à 30 Hz. Segundo à norma IEC 61000-4-15 este efeito é crítico para frequência de

8,8 Hz.

A norma IEC 61000-4-15 informa as especificações para construção de um aparelho medidor do efeito *flicker* denominado *Flickermeter*. Este aparelho indica a percepção dos níveis de *flicker* para todas as flutuações e formas de onda das tensões.

A arquitetura do *Flickermeter* é representada na Figura 4.19 em diagramas de blocos, e pode ser dividido em duas partes, segundo o desempenho e tarefas que seguem:

- simulação da resposta da sensibilidade do conjunto “tensão-lâmpada-olho-cérebro” em relação à variação de iluminância;
- análise estatística do sinal de *flicker* e apresentação dos resultados.

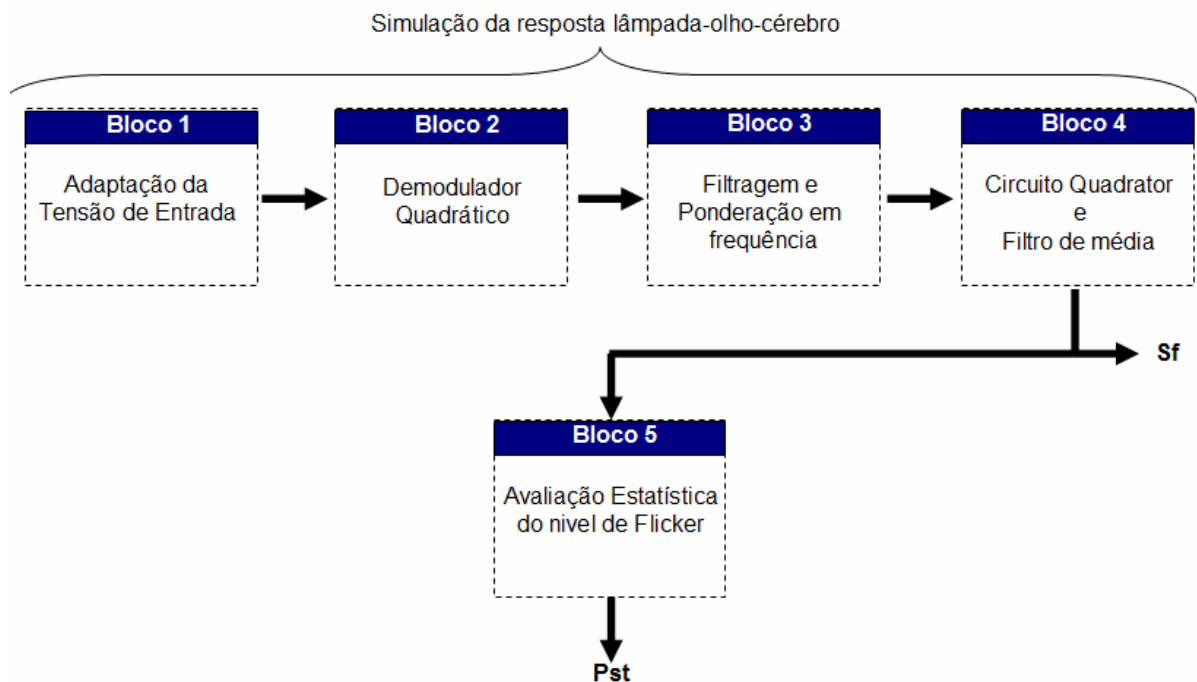


Figura 4.19 – Diagrama Funcional do Flickermeter

O bloco 1 adapta o sinal de entrada e ajusta a tensão aos níveis adequados ao medidor. Este bloco também normaliza a tensão em relação ao valor RMS médio.

O bloco 2 é responsável por realizar uma demodulação quadrática na tensão já

normalizada a fim de extrair a parte modulante do sinal.

O terceiro bloco realiza o processo de filtragem do sinal modulante. Para isto este bloco é composto de dois filtros em cascata. O primeiro filtro elimina a componente cc. e também as frequências mais altas, fora da faixa de frequências que causam desconforto visual. Este filtro é um passa-banda com frequências de corte da ordem em 0,05 e 42 Hz. Já os segundo filtro é um filtro de ponderação de 4ª ordem e sua função de transferência é dada por:

$$F_p(s) = \left[\frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \right] \left[\frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)} \right],$$

onde S é a variável complexa de Laplace e as outras variáveis são parâmetros das lâmpadas indicados na Tabela 4.1, que corresponde a Tabela 8 da Norma IEC 61000-4-15.

Tabela 4.1 – Indicativo dos Valores dos Parâmetros das Lâmpadas

Variável	Lâmpada de 230V Sistema de 50Hz	Lâmpada de 120V Sistema de 60Hz
κ	1,74802	1,6357
λ	$2\pi(4,05981)$	$2\pi(4,167375)$
ω_1	$2\pi(9,15494)$	$2\pi(9,077169)$
ω_2	$2\pi(2,27979)$	$2\pi(2,939902)$
ω_3	$2\pi(1,22535)$	$2\pi(1,394468)$
ω_4	$2\pi(21,9)$	$2\pi(17,31512)$

Este filtro de ponderação é centrado em 8,8Hz.

O bloco 4 é composto de um circuito quadrador, que eleva ao quadrado o sinal enviado pelo bloco 3. Este bloco 4 também é composto de um filtro de média de primeira ordem com constante de tempo de 300ms. Este filtro emula a resposta do cérebro perante as mudanças de iluminância.

O sinal de saída do bloco 4 é denominado sensação instantânea de *flicker* (Sf). Este sinal é normalizado e uma saída unitária representa o limiar de percepção de

flicker.

O bloco 5 efetua o tratamento estatístico de Sf. A partir daí obtém-se o Pst, que é a medida de severidade das flutuações de tensão.

Maiores detalhes em relação ao *Flickermeter* são encontrados na norma IEC 61000-4-15.

Para calcular os níveis de *flicker* presentes nos sinais de tensão modulante obtidos foi criada uma rotina em Matlab que emula o *flickermeter*. Esta rotina tomou como base a rotina desenvolvida por Assis [9] para medição de *flicker*, porém foram realizadas mudanças significativas no código, devido à erros encontrados nos filtros e à mudanças no processo de informação dos dados de entrada.

As tensões obtidas com os modelos de regime transitório e permanente foram fornecidas como dados de entrada para o *flickermeter* e os resultados são mostrados a seguir.

Resultados do Flickermeter

Os níveis de Pst encontrados para as simulações realizadas nas seções 4.1, 4.2 e 4.4 foram, respectivamente iguais a 0,633; 0,630; 1,510.

Pst = 0,633 - encontrado para a tensão obtida pelo modelo de regime transitório e reatância da rede X_{rede} igual a 5% (seção 4.1).

Pst = 0,630 - encontrado para a tensão obtida pelo modelo de regime permanente e reatância da rede X_{rede} igual a 5% (seção 4.2).

Pst = 1,510 - encontrado para a tensão obtida pelo modelo de regime transitório, sem a câmara hiperbárica e com reatância da rede X_{rede} igual a 5% (seção 4.4).

Para avaliar se os níveis de *flicker* encontrados são críticos ou não se utilizou os critérios estabelecidos pela ANEEL no módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional).

Os valores de Pst estabelecidos pela ANEEL como referência são mostrados na

Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores de Referência de Pst estabelecidos pela ANEEL

Valor de Referência	Pst
Adequado	$Pst < 1p.u.$
Precário	$1p.u. < Pst < 2p.u.$
Crítico	$Pst > 2p.u.$

De acordo com os critérios apresentados conclui-se que os valores encontrados de Pst para as tensões obtidas nas seções 4.1 e 4.2 com o sistema de geração proposto são adequados, segundo critérios estabelecidos pela ANEEL e para as condições testadas. Já o valor de Pst encontrado para a tensão obtida na seção 4.4, situação sem a câmara hiperbárica, é precário, pois seu valor está entre 1 e 2 p.u. Desta forma conclui-se que a geração de energia das ondas

CAPÍTULO 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

O sistema proposto é uma ótima opção para se utilizar em sistemas de produção de energia das ondas *onshore* pois representa uma alternativa de baixo custo para projetos inovadores de geração de energia alternativa.

De acordo com as equações obtidas no capítulo 3 e com os resultados do capítulo 4, pode-se notar que a frequência de oscilação da onda impõe ao eixo do gerador uma velocidade mecânica que possui um valor médio constante mas a velocidade ao longo do tempo varia na mesma frequência da onda.

Considerando-se apenas a componente fundamental da série de Fourier deste perfil de velocidade oscilante, obtém-se uma tensão terminal do gerador que apresenta componentes da série de Fourier nas frequências $(60\text{Hz} + f_{onda})$ e $(60\text{Hz} - f_{onda})$, conforme apresentado no espectro de frequência nas Figura 4.13 e 4.14.

Analisando-se os gráficos apresentados no capítulo 4 pode-se concluir que:

- Os níveis de *flicker* presentes nas tensões terminais da máquina não são críticos, ou seja, são admissíveis segundo critérios estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica. Isto pode ser verificado através dos níveis de Pst encontrados nas tensões;
- a tensão no ponto de conexão comum é sensível ao torque (e velocidade) e à reatância

da rede;

- o sistema de geração de energia elétrica a partir das ondas do mar utilizando um gerador de indução do tipo gaiola de esquilo diretamente conectado à rede funciona e é adequado para conexões com redes de alta impedância (redes fortes – $5\% < X_{rede} < 15\%$), pois o nível de flutuação de tensão encontrado está abaixo dos valores máximos exigidos pela ANEEL. Para o nível de tensão de 220V, a flutuação máxima permitida é de 4% em relação ao valor nominal. De acordo com a Figura 4.9, para redes com reatâncias menores que 15%, a flutuação não ultrapassa 9V (4%);

- para a conexão com redes fracas ($X_{rede} \geq 15\%$) o sistema proposto não é adequado para a geração, pois apresenta variações na tensão do ponto de conexão comum maiores do que as permitidas pela ANEEL. Isto pode ser observado na Figura 4.9, onde observa-se que para uma rede com reatância de 15% a amplitude da modulação foi de 9,7V (~4,4%).

A flutuação de tensão alcança níveis além dos permitidos por norma, logo não pode ser aplicado a redes fracas. O efeito *flicker* existe, mas não chega a ser crítico pois a região de frequência é baixa (de 0,1 a 1Hz) na modulação, mas a amplitude é alta quando comparado com os valores permitidos por norma. Isto torna efeito mais perceptível ao olho humano.

É necessário dar continuidade ao projeto validando os resultados encontrados através de simulações na bancada montada no laboratório de Eletrônica de Potência, onde temos um motor e um gerador de indução. Para dar prosseguimento ao projeto é preciso desenvolver um emulador da turbina acionada a partir da energia das ondas. Este emulador será responsável por controlar o motor de indução de tal forma que o toque no seu eixo seja equivalente ao torque encontrado na saída da turbina Pelton do conversor de energia das ondas. Como os eixos do motor e do gerador estão conectados, o torque do motor será igual ao torque mecânico aplicado ao gerador de indução, excentuando-se as perdas por atrito e ventilação.

Com os experimentos e com as rotinas desenvolvidas em Matlab será possível mensurar os níveis de perturbação na rede que deverão ser encontrados na realidade.

Referências

- [1] N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, “Power Electronics – Converters, Applications and Design”, John Wiley & Sons, Inc. New York, 2003.
- [2] -Cruz, J. M. B. P. & Sarmiento, A. J. N. A. (2004), “Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais”, Instituto do Ambiente.
- [3]-Estefen, S. F., Costa, P. R., Ricarte, E. & Pinheiro, M. M. (2007), “Wave energy hyperbaric device for electricity production”, in ‘International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering’, Vol. OMAE-2007, San Diego, USA.
- [4]-Rudge, C. (2005), “Oscillating Water Columns”, Technical report, Energetech Australia.
- [5]-Fitzgerald, A.E.; Charles Kingsley Jr.; Alexander Kusko – “Máquinas Elétricas”, McGraw-Hill, São Paulo, 1975.
- [6]-Jenkins, N., Allan, R., Crossley, P., Kirschen, D. e Strbac, G. (2000). “Embedded Generation”, Institute of Electrical Engineers.
- [7]-Grzegorz Wiczynski, “Simple Model of Flickermeter Signal Chain for Deformed Modulating Signals” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, n.º.4, October 2008.
- [8]-IEC Flickermeter – Functional and Design Specifications, IEC 61000-4-15: 1997+A1:2003(E), 2003.
- [9]- Assis, Tatiana Mariano Lessa de, “Análise do Desempenho Dinâmico de um Statcom: Aplicações em 12 Pulsos”, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2000.
- [10]- Garcia Rosa, Paula Bastos , “Controle e Otimização de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica”, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2008.
- [11]-Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional PRODIST, Módulo 8 “Qualidade de Energia Elétrica”, 2006.
- [12]-J. A. Pomílio, Marra, E. G., “Sistemas de Geração Baseados em Gerador de Indução Operando com Tensão Regulada e Frequência Constante”, SBA Controle e Automação Vol. 11 n.º 01, Jan., Fev., Mar, Abril de 2000.