

ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE ONDAS DO MAR E MÁQUINA DE INDUÇÃO

Fabricio de Abreu Bozzi

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 Hirokazu Watanabe
(Orientador)

Prof. Walter Issamu Suemitsu
(Orientador)

Prof. Isaac Rocha Machado
(Orientador)

Prof. Richard Magdalena Stephan

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2012

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha tia e madrinha Mônica que foi a pessoa na qual me espelhei para seguir nos estudos. A minha avó que cuidou de mim e possibilitou minha estadia fora de minha casa.

A minha mãe que sempre me deu carinho e apoio nas minhas decisões. Aos meus irmãos Matheus e Vinicius que fizeram parte dessa minha caminhada.

A minha, hoje, namorada, mas acima de tudo minha amiga Lorana, que sempre me apoiou e me ajudou nos momentos mais difíceis, com amor e carinho.

Aos meus amigos próximos que compartilharam este período da minha vida.

Agradecimento

Agradeço, primeiramente a Deus, que de sua natureza infalível sempre me ajudou e fez com que eu conquistasse tudo que eu desejasse. Obrigado meu Deus.

Ao meu orientador Watanabe, que sempre esteve disponível para tirar minhas dúvidas, e sempre cedeu seu ocupado tempo para me dar explicações.

Aos doutorandos, Isaac e Bráulio por contribuírem com este trabalho.

Por último, a todos que colaboraram, não só com este trabalho, mas com minha formação como engenheiro. Aos amigos do ELEPOT, e aos professores do departamento de engenharia elétrica da UFRJ.

ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE ONDAS DO MAR E MÁQUINA DE INDUÇÃO

Fabricio de Abreu Bozzi

Janeiro de 2012

Orientadores: Edson Hirokazu Watanabe

Walter Issamu Suemitsu

Isaac Rocha Machado

Este trabalho se baseia no sistema de geração de energia elétrica a partir das ondas do mar desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS), COPPE/UFRJ. O princípio de funcionamento deste sistema consiste na movimentação dos flutuadores pela ação das ondas do mar, que através de braços mecânicos em forma de alavanca, acionam bombas hidráulicas. Estas bombas estão ligadas a uma base fixa e injetam água num sistema hidráulico a alta pressão, armazenando a energia intermitente extraída das ondas. Uma válvula fixa ao sistema hidráulico controla um jato d'água com pressão e vazão suficiente para acionar uma turbina Pelton e um gerador elétrico.

Neste trabalho, a partir da modelagem analítica detalhada do sistema de armazenamento (acumulador hidropneumático e câmara hiperbárica) e da turbina, analisou-se o comportamento da tensão e potência gerada por uma máquina de indução rotor gaiola de esquilo conectada diretamente à rede elétrica.

É apresentado um estudo prévio da máquina de indução para auxiliar a análise das oscilações de tensão e potência que surgem devido ao torque variável no eixo do rotor e para compreender o comportamento da máquina atuando como gerador (análise da região de operação).

A capacidade da rede à qual a máquina é conectada também foi um ponto de análise. Um modelo equivalente do sistema elétrico foi desenvolvido onde a relação de curto-circuito (RCC) foi alterada de forma a avaliar os efeitos quanto à qualidade da energia.

A partir da modelagem do sistema hidráulico, mecânico e elétrico, as simulações foram implementadas utilizando-se o programa PSCAD-EMTDC. Os resultados são apresentados para diferentes parâmetros hidráulicos e elétricos. O comportamento da flutuação da tensão de acordo com a relação de curto-circuito foi analisado verificando pontos críticos da geração e a variação da potência relacionada com o dimensionamento do sistema hidráulico. As influências nos limites de geração e na qualidade da energia são analisadas.

Sumário

Capítulo 1- Introdução	1
1.1 Apresentação do Problema	2
1.2 Motivações.....	5
1.3 Objetivo	5
Capítulo 2 – Modelagem	6
2.1 Modelagem do Sistema de Armazenamento	6
2.1.1 Modelo Analítico	8
2.2 Modelo da Turbina Pelton	10
2.2.1 Modelo Analítico	11
2.3 Modelo do Sistema Elétrico	12
2.3.1 Princípios Básicos do Gerador de Indução Conectado a Rede.....	13
2.3.2 Modelo das Redes Elétricas	20
Capítulo 3 -Resultados	24
3.1 Considerações Iniciais.....	24
3.1.1 Determinação da Vazão de Entrada do Sistema Hidráulico.	26
3.1.2 Determinação do Valor de Pico (V_p).....	28
3.2 Simulação do Sistema hidráulico.....	29
3.3 Simulação do Sistema Completo.....	32
3.3.1 Limite de Operação do Sistema	34
3.3.2 Simulação do Sistema Utilizando o PSCAD/EMTDC	36
Capítulo 4 – Conclusão e Referências.....	49

Capítulo 1

De acordo com estudos [1], nas próximas décadas haverá uma carência mundial de energia. Atualmente, as fontes fósseis suprem a maior parte da demanda. No entanto, além de causarem diversos problemas ambientais, também atingirão os limites de extração. Desta forma, é importante a exploração de novas fontes alternativas e renováveis. A Figura 1 mostra a demanda mundial de energia e, em especial, mostra a parcela que deverá ser suprida por meio de fontes alternativas.

Por outro lado a preocupação com o meio ambiente é um fator que deve ser levado em conta, o que faz com que estas novas fontes devam ser, além de alternativas também renováveis. Neste sentido, por exemplo, países da Europa, como Dinamarca e Alemanha, já possuem grande parte de sua matriz energética composta por fontes alternativas e renováveis, como eólica e solar. Além disso, grandes investimentos tem sido feitos no desenvolvimento de diversas fontes alternativas

Uma outra energia alternativa e renovável ainda pouco explorada é a das ondas do mar. A extração dessa energia é uma opção para o futuro e é o tema abordado neste trabalho.

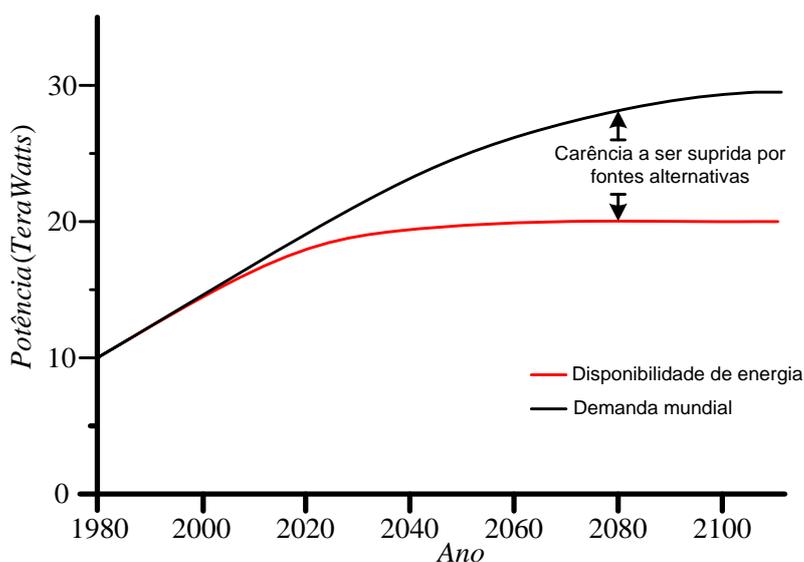


Figura 1 – Demanda e disponibilidade de energia

1.1 Apresentação do Problema

A necessidade do crescimento econômico do País associada à crescente preocupação com o meio ambiente são fatores que motivaram a escolha do tema.

Dentre os diversos dispositivos capazes de gerar energia através das ondas [2], o sistema estudado neste trabalho é baseado no bombeamento de água, realizado pela ação das ondas em flutuadores, conforme mostrado na Figura 2. Este sistema foi desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS), COPPE/UFRJ[2].

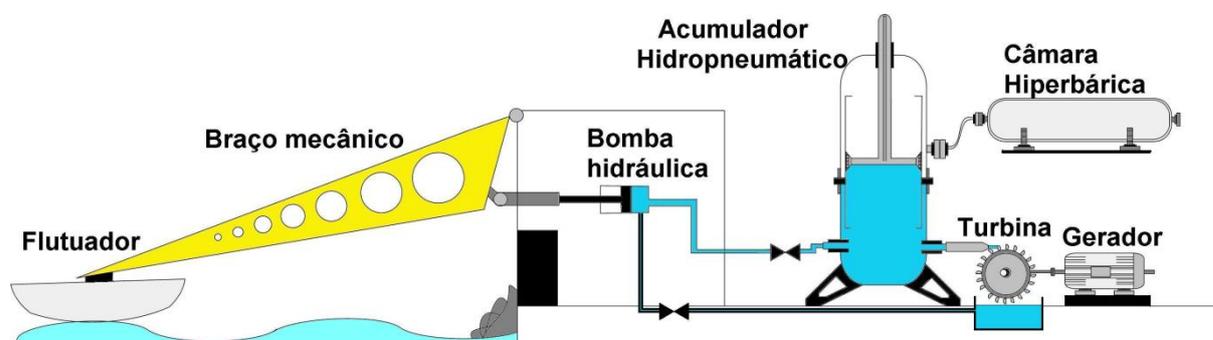


Figura 2 – Sistema de geração de energia elétrica a partir das ondas do mar

O princípio da extração de energia é dado pelos flutuadores que se movimentam na vertical de acordo com as ondas. Através do movimento dos flutuadores, os braços mecânicos pressionam o pistão da bomba hidráulica injetando água para o acumulador hidropneumático. Esse bombeamento ocorre apenas no movimento de descida, portanto a subida do flutuador é livre da ação de forças de resistência ao movimento.

Cabe ressaltar que o movimento de descida é devido à ação da força da gravidade sobre o flutuador e esta encontra uma força de resistência devido à compressão do pistão injetando água no acumulador o qual se encontra a alta pressão.

Esta característica proporciona uma captura de pulsos de energia, que é armazenada no reservatório a alta pressão (acumulador hidropneumático). A capacidade de armazenamento do sistema hidráulico é fundamental para a manutenção de uma vazão com variações compatíveis com o sistema de geração.

Após a bomba injetar água no acumulador, a água é liberada para a turbina por um injetor de área variável. Essa área é modificada à medida que se deseja liberar mais ou

menos energia. O acumulador possui um êmbolo móvel, que se desloca verticalmente à medida que a água é injetada ou liberada.

Após a água fluir por esse injetor, ela se choca com as pás da turbina, do tipo Pelton, gerando um torque. A turbina está acoplada diretamente ao gerador. Com a rotação da turbina, conseqüentemente o eixo do gerador gira. Esta rotação deve ser a uma velocidade suficiente para que ocorra a transformação da energia cinética em elétrica.

Para a análise do sistema, foi feita uma modelagem com base em equações da hidrodinâmica e da física Newtoniana. Após o desenvolvimento do modelo, este foi utilizado em simulações para a verificação do comportamento do sistema.

A utilização de ondas marinhas como fonte primária de energia traz alguns problemas inerentes. Dentre tais problemas, destaca-se, principalmente, a flutuação de tensão em baixa frequência, causada pela característica da intermitência das ondas. Esta flutuação pode ser prejudicial em sistemas conectados às redes elétricas com baixa relação de curto circuito (*RCC*) e se agravam ainda mais quando se trata de uma geração isolada.

Assim, dentro de certos limites, há possibilidade de se gerar energia a partir das ondas do mar, no entanto, com o aumento deste tipo de geração, podem-se causar problemas ao sistema elétrico, devido a sua intermitência. Logo, a utilização de um dispositivo para se obter uma geração mais “constante” é o desejável.

Para se obter uma potência gerada com característica “mais constante”, geralmente utilizam-se elementos armazenadores de energia. Assim, o sistema de geração das ondas poderia suprir a rede mesmo não tendo a fonte de energia primária disponível por algum tempo. Este tempo, neste trabalho, está limitado na ordem um minuto. Porém, a forma de armazenamento por períodos de tempos maiores ainda (dezenas de minutos a horas) é um desafio para o futuro.

Como dito, a flutuação de tensão é um problema para o sistema elétrico. Esta pode causar oscilações de torque e velocidade em motores elétricos, críticos em processos industriais onde se requer precisão. Como ilustrado na Figura 3, o gerador é conectado a uma rede de baixa tensão e alimenta um motor.

De forma a minimizar o problema da intermitência das ondas, o armazenador de energia atua como filtro, suavizando os pulsos gerados pelas ondas.

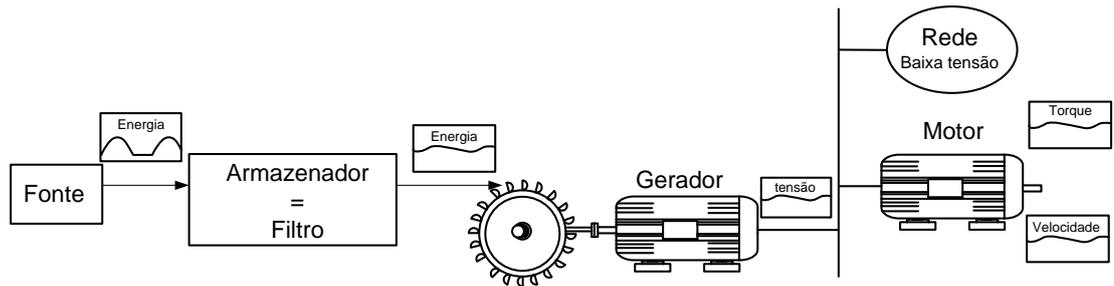


Figura 3– Conexão gerador rede.

Outra consequência da flutuação de tensão é o chamado efeito *flicker* (cintilação) causado principalmente em lâmpadas incandescentes. Estudos [3] indicam que quando há flutuações de tensão, estas podem causar o efeito “*flicker*”. Se as flutuações estiverem na faixa próxima dos 8 Hz, a perceptividade do olho humano é máxima, podendo causar náuseas e mal estar nas pessoas [3].

Estes são alguns dos problemas que podem existir na geração de energia elétrica a partir das ondas. No entanto, outros como, a suportabilidade a afundamentos de tensão próxima ao gerador, e sistemas hidráulicos sem controle de vazão, podem levar o sistema a apresentar danos à qualidade da energia gerada. No entanto, estes assuntos estão fora do escopo deste trabalho.

Atualmente, vários tipos de máquinas elétricas estão sendo estudadas para que a extração das fontes alternativas intermitentes seja otimizada. A máquina de indução rotor gaiola de esquilo, geralmente usada como motor, pode ser uma opção para sistemas de geração de energia a partir das ondas de pequeno e médio porte (possivelmente, até umas centenas de kW). Esta foi a opção para os primeiros sistemas de geração eólica. Hoje, cerca de 30% de geradores para aproveitamento da energia dos ventos é baseada em máquina de indução gaiola de esquilo (GIGE).

A máquina de indução com rotor bobinado é a segunda opção mais utilizada em sistemas eólicos, no entanto, esta requer um controle mais complexo e seu custo ainda é alto. Porém, tem um melhor aproveitamento de energia.

Logo, para a geração a partir das ondas o aperfeiçoamento das técnicas de extração depende do estudo da máquina elétrica que funcionará com gerador. Dentre outros fatores, o tipo de máquina escolhida depende das características do sistema de armazenamento e da característica da rede elétrica a qual o gerador está conectado. Como vantagens da utilização do GIGE citam-se: robustez, simplicidade de operação (dentro de certos limites) e, principalmente, baixo custo.

1.2 Motivações

O principal ponto de análise deste trabalho é o efeito do armazenamento de energia no “nivelamento das flutuações” de potência absorvida das ondas. O dispositivo armazenador de energia por compressão de ar é modelado e analisado, visando estabelecer limites de operação entre o sistema armazenador e o sistema elétrico.

O nível de filtragem do sistema de armazenamento é função das suas dimensões físicas. Logo, a característica do sistema de armazenamento e da rede elétrica conectada são parâmetros fundamentais que influenciam na qualidade da energia gerada.

Contudo, é de grande importância para o setor elétrico o desenvolvimento do aproveitamento dessa nova fonte de energia. Portanto, este estudo é atual e visa contribuir para o desenvolvimento da forma de extração. Dada a grande faixa litorânea brasileira, este recurso poderá contribuir significativamente para o suprimento de energia sem emissão de gases de efeito estufa, especialmente para cargas nas regiões costeiras.

Devido ao atual estágio de desenvolvimento, os custos de implantação ainda são elevados. Assim, o estudo apresentado é motivado por possibilitar possíveis melhorias no que diz respeito ao dimensionamento da parte elétrica e hidráulica, visando a diminuição dos custos de projeto futuros.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é estudar o funcionamento de um sistema de geração de energia elétrica a partir das ondas do mar. Este sistema é composto por uma câmara hiperbárica de armazenamento de energia que interfere diretamente na qualidade da tensão gerada. Neste sentido, é apresentado o comportamento da tensão, potência e torque para várias dimensões do sistema de armazenamento.

Também foi desenvolvido neste trabalho o modelo analítico do sistema e a partir dele foram feitas simulações para compreender a dinâmica do sistema. O estudo das dimensões do sistema de armazenamento é feito visando à qualidade da energia gerada (tensão e potência) quando conectados à redes elétricas com diferentes relações de curto-circuito (RCC).

Capítulo 2

Neste capítulo será apresentado o embasamento teórico para o sistema de geração a partir das ondas do mar apresentado na Figura 2. Serão desenvolvidos os modelos analíticos de cada parte do sistema.

2.1 Modelagem do Sistema de Armazenamento

O sistema de armazenamento é composto por um acumulador hidropneumático e uma câmara hiperbárica. A forma de armazenamento é feita a partir da compressão do ar, que em sua maior parte está na câmara. O sistema é utilizado neste trabalho como filtro das oscilações intermitentes das ondas.

O acumulador hidropneumático, apresentado na Figura 4, é composto por um êmbolo móvel que se desloca em movimento vertical, este movimento será considerado sem atrito. A este êmbolo é fixada uma haste para que se possa determinar visualmente ou por sensor a posição na qual o mesmo se encontra. A câmara hiperbárica, mostrada na Figura 5, é ligada diretamente à parte superior do acumulador mantendo a pressão a um dado volume. Assim, a câmara hiperbárica é parte do acumulador, sendo ela o dispositivo para armazenagem do ar comprimido.

Nesta modelagem, as perdas por atrito e trocas de calor com o meio externo foram desconsideradas e ainda os fluidos foram considerados incompressíveis.

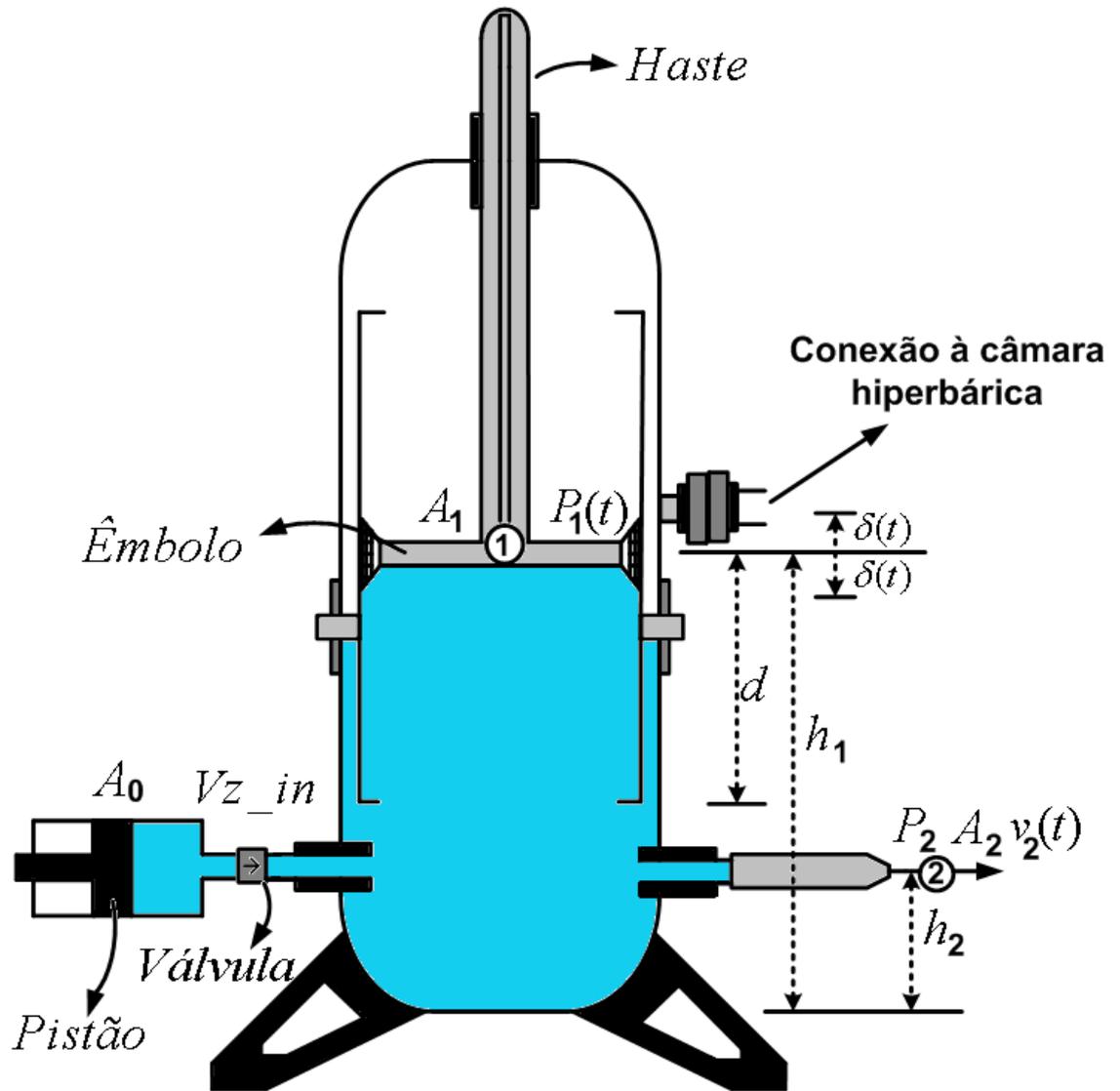


Figura 4 - Acumulador hidropneumático.

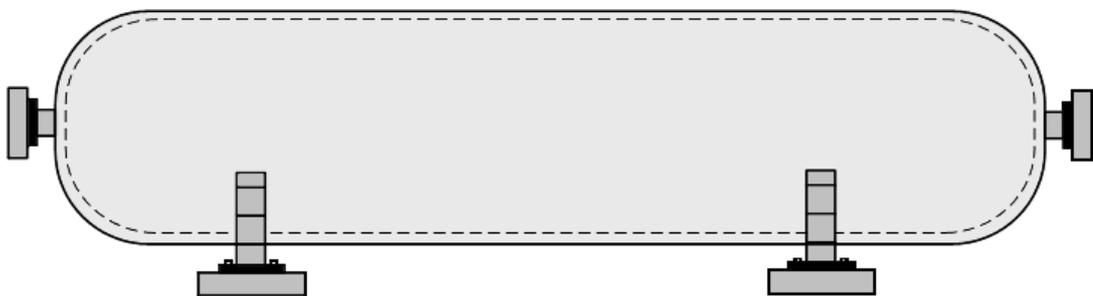


Figura 5 - Câmara hiperbárica.

2.1.1 Modelo Analítico

Para o sistema ilustrado na Figura 4, considera-se inicialmente que não há entrada de água injetada pelo pistão. Então, para este sistema pode-se determinar a velocidade do jato de água $v_2(t)$ pela equação de Bernoulli, que relaciona pressões e velocidades. Da equação de Bernoulli, tem-se:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constante}, \quad (1)$$

onde, P , ρ , v , g e h representam pressão, densidade do fluido, velocidade em um ponto, aceleração da gravidade e alturas de líquidos, respectivamente. Reescrevendo (1) para os pontos 1 e 2 da Figura 4:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g\Delta h' = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2. \quad (2)$$

Considerando que v_1 é muito menor que v_2 , onde v_1 é a velocidade do êmbolo móvel, então pode-se considerar $v_1=0$. Logo, obtém-se de (2) a velocidade do jato de água v_2 :

$$v_2(t) = \sqrt{2 \left\{ \left[g(\Delta h'(t) - h_2) + \left(\frac{P_1(t) - P_2}{\rho} \right) \right] \right\}}, \quad (3)$$

sendo que $\Delta h'$ e P_1 variam no tempo e:

$$\Delta h'(t) = h_1 + \delta(t), \quad (4)$$

onde, $\delta(t)$ é o deslocamento do êmbolo, conforme mostrado na Figura 4.

Para saber como P_1 varia no tempo utiliza-se a lei de Boyle-Mariotte, que analisa a transformação gasosa isotérmica de um sistema:

$$P_0 V_0 = P_1 V_1, \quad (5)$$

que aplicado ao sistema fica:

$$P_1(t) = P_0 \left[\frac{(V_t - dA_1)}{[V_t - (d + \delta(t))A_1]} \right], \quad (6)$$

onde, V_t é o volume total da câmara hiperbárica juntamente com o volume do acumulador para $d = 0$, P_0 é a pressão inicial da câmara, e d é a posição inicial do êmbolo. Com isso tem-se a variação da pressão em função apenas de $\delta(t)$.

A pressão interna da câmara P_0 é um dos parâmetros em análise. Nas simulações apresenta-se uma série de resultados para diferentes valores de P_0 . Esta pressão inicial está diretamente associada à capacidade da câmara para suportar essa pressão, interferindo assim no seu custo de fabricação.

Nota-se que a pressão instantânea dentro da câmara P_1 e $\Delta h'$ dependem da variação de $\delta(t)$, e esse varia com a diferença entre as vazões de entrada e saída.

Considera-se agora, que ocorra a injeção de água através do pistão com área de seção transversal A_0 . Pela relação infinitesimal dos volumes de entrada e saída no tempo, tem-se:

$$A_1 \partial\delta(t) = A_0 \partial x(t) - A_2 v_2 \partial t, \quad (7)$$

reorganizando (7) e integrando, obtém-se:

$$\delta(t) = \frac{A_0}{A_1} \int \frac{\partial x}{\partial t} \partial t - \frac{A_2}{A_1} \int v_2 \partial t + \delta(0), \quad (8)$$

onde, o elemento $\frac{\partial x}{\partial t}$ é a velocidade da água injetada pelo pistão.

Reorganizando (8), obtém-se:

$$\delta(t) = \frac{1}{A_1} \int V_{Z_in} \partial t - \frac{A_2}{A_1} \int v_2 \partial t + \delta(0), \quad (9)$$

onde, $V_{Z_in} = A_0 \frac{\partial x}{\partial t}$ é a vazão de entrada. A Figura 6 apresenta as formas de onda idealizada da posição do flutuador $y(t)$ e a vazão de entrada considerada.

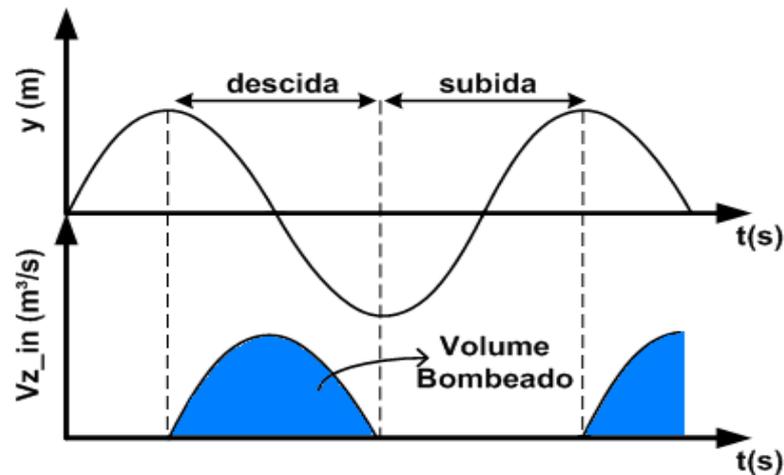


Figura 6 - Posição do flutuador – Vazão de entrada.

A Figura 6 ilustra o movimento do flutuador $y(t)$ supondo que o mesmo segue idealmente o movimento de uma onda senoidal. Como o flutuador injeta água apenas no movimento de descida, nota-se que o volume de água é injetado em pulsos.

Através de métodos numéricos, discretizando a equação de $\delta(t)$ obtêm-se os gráficos das formas de onda de cada variável do sistema, sendo possível analisar o seu funcionamento. Os métodos para obter essas formas de onda serão apresentados no Capítulo 3.

2.2 Modelo da Turbina Pelton

Após a modelagem do sistema de armazenamento de energia, foi feita a modelagem da turbina, apresentada na Figura 7. Na Figura 7(a), está mostrada a turbina com suas pás e o jato de água. Na Figura 7(b), está mostrado o detalhe da água se chocando com uma das pás. O equacionamento para a turbina hidráulica, segundo as leis de Newton, determina o torque fornecido ao gerador.

A turbina Pelton é uma tecnologia muito utilizada quando se possuem quedas de água entre 350m a 1100m. Esse modelo de turbina tem grande eficiência quando operada com altas velocidades de rotação [4].

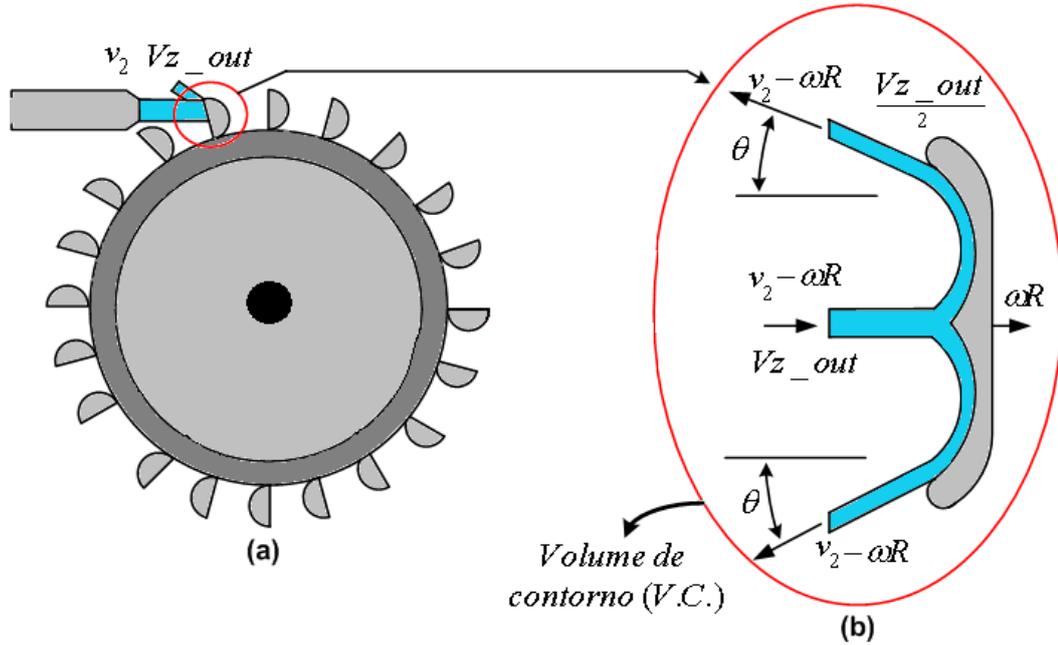


Figura 7 – Modelo turbina Pelton

2.2.1 Modelo Analítico

A partir da velocidade do jato de água $v_2(t)$, da área de saída (A_2) e velocidade da turbina ω , pode-se determinar o torque mecânico que a turbina irá exercer no eixo do gerador. Define-se um volume de contorno (V.C) entre a saída do jato de água e a pá da turbina Pelton, ilustrada na Figura 7. Assim, de acordo com [5] temos:

$$\left(\begin{matrix} \text{torque mecânico} \\ \text{no eixo} \end{matrix} \right) = \left(\begin{matrix} \text{fluxo de momento} \\ \text{angular que entra no V.C.} \end{matrix} \right) + \left(\begin{matrix} \text{fluxo de momento} \\ \text{angular que sai do V.C.} \end{matrix} \right), \quad (10)$$

que substituindo os parâmetros apresentados na Figura 7, obtém-se:

$$\left(\begin{matrix} \text{torque mecânico} \\ \text{no eixo} \end{matrix} \right) = Rv_2\rho(-Vz_{out}) + R[\omega R - (v_2 - \omega R) \cos \theta]\rho Vz_{out}, \quad (11)$$

e reorganizando as variáveis, o torque do eixo será:

$$T_{eixo} = -R(v_2 - \omega R)(1 + \cos \theta)\rho v_2 A_2, \quad (12)$$

onde, R , v_2 , ω , θ , ρ e V_{z_out} são respectivamente o raio, a velocidade do jato, a velocidade angular da turbina, o ângulo de escoamento com que a água deixa a pá da turbina, a densidade da água e a vazão.

Multiplicando (12) por ω pode-se obter a potência mecânica da turbina:

$$P_{mec} = \omega(v_2 - \omega R)k, \quad (13)$$

onde, $k = (1 + \cos \theta)\rho v_2 A_2 R$. Nota-se por (13) que a potência mecânica é uma equação do segundo grau com zeros em $\omega = 0$ e $\omega = \frac{v_2}{R}$. Traçando a parábola de *potência x ω* , obtém-se a Figura 8. Por convenção utilizou-se a potência extraída da turbina positiva, mesmo sabendo que o torque é negativo.

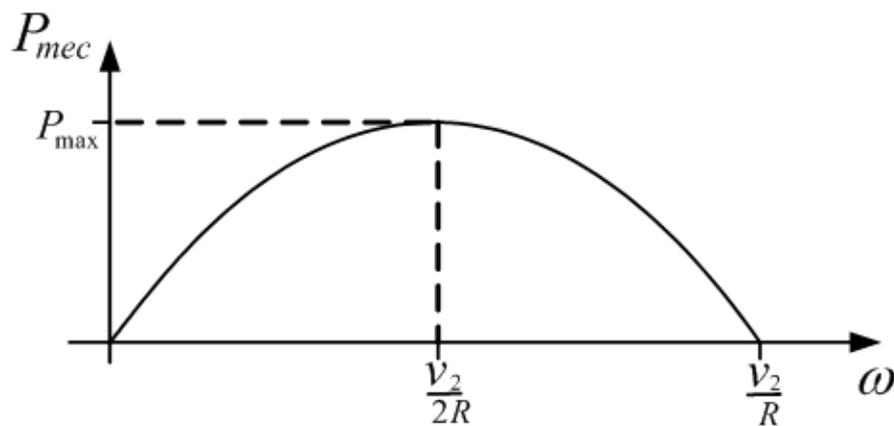


Figura 8– Potência mecânica x ω

A partir da Figura 8 pode-se verificar a velocidade angular em que a turbina extrai a máxima potência.

2.3 Modelo do Sistema Elétrico

Para o estudo da parte elétrica do sistema, dado que é conhecido o torque do eixo da turbina, utilizou-se uma máquina de indução, rotor gaiola de esquilo, funcionando como gerador conectado a redes de diversas características. A análise é feita com objetivo de

avaliar a relação entre o dimensionamento do sistema hidráulico e a qualidade da energia gerada, para diferentes redes.

Como dito no

Capítulo 1, variações de tensão em baixas frequências podem ocasionar o efeito *flicker* e variação de torque em motores. Logo, este estudo visa analisar, os limites em que o sistema poderá funcionar sem ocasionar variações de tensão que causem problemas as cargas da rede em geral.

Atualmente, o gerador de indução rotor bobinado está sendo muito utilizado para tipos de gerações em que se tenha velocidade variável. Esta máquina possui um sistema complexo de controle, o que proporciona uma otimização da geração. Assim, esta máquina poderia ser outra opção para gerador.

Entretanto, pelo nível de potência do sistema em estudo e complexidade de funcionamento do gerador com rotor bobinado, utilizou-se a máquina de indução rotor gaiola de esquilo.

O sistema de armazenamento proporciona uma velocidade fixa à turbina, assim, o gerador de indução rotor gaiola de esquilo pode operar satisfatoriamente dentro de certos limites. Para o nível de potência do sistema, esta máquina tem preço baixo comparado com a máquina de rotor bobinado.

2.3.1 Princípios Básicos do Gerador de Indução Conectado a Rede.

A máquina de indução rotor gaiola de esquilo é composta, assim como outras máquinas elétricas, por uma parte fixa e uma parte girante. A fixa, chamada de estator é composta pelos enrolamentos de armadura que estão presos à carcaça do estator. A móvel, chamada de rotor é composta por barras de cobre curto-circuitadas, formando a “gaiola de esquilo”.

Em uma máquina trifásica, estando os enrolamentos de cada fase do estator defasados fisicamente de 120° , e aplicando tensão trifásica equilibrada a esses enrolamentos, gera-se um campo girante Φ_s que gira na velocidade ω_s . Este fluxo Φ_s induz uma tensão nas barras

do rotor gaiola de esquilo [6], induzindo então uma corrente que gera um fluxo Φ_R , que também gira na velocidade ω_s em relação ao estator.

A interação dos fluxos do rotor Φ_R , com o fluxo do estator Φ_s gera o fluxo resultante Φ_{RES} . Isso pode ser ilustrado como mostrado na Figura 9.

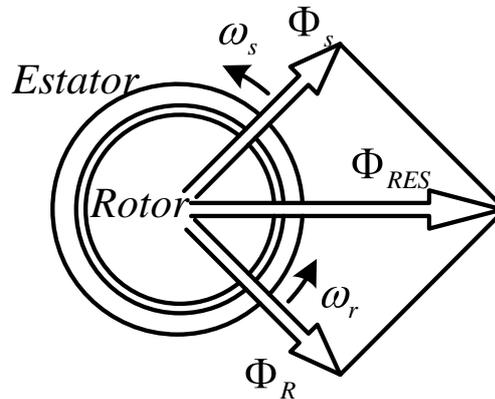


Figura 9 – Interação do campo do estator com rotor

Uma característica importante do funcionamento da máquina de indução é a existência do escorregamento devido à diferença entre a velocidade mecânica do rotor e o campo girante. Como o campo do estator está na velocidade síncrona ω_s e supondo que o rotor esteja na velocidade ω_r , o escorregamento é dado por:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}. \quad (14)$$

A máquina de indução pode ser vista como um transformador, de “secundário girante”, embora não haja nenhuma rotação em um transformador real. Para a análise da máquina de indução o modelo do transformador é adaptado com a inserção da resistência $\frac{R_2}{s}$. A partir de [6], pode-se fazer a análise do circuito equivalente da máquina de indução em regime permanente. A Figura 10 ilustra esse circuito.

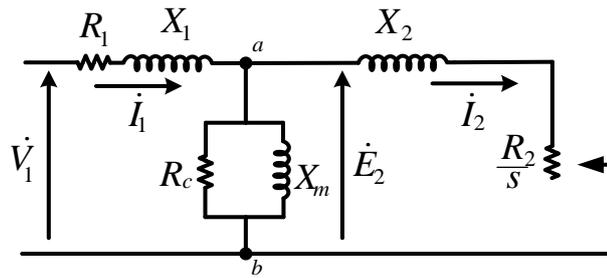


Figura 10 – Circuito equivalente máquina de indução

Na Figura 10, R_1 representa a resistência e X_1 a reatância de dispersão do enrolamento do estator, X_m é a reatância de magnetização, R_c a resistência de perda do núcleo, R_2 e X_2 a resistência e a reatância do rotor refletida para o estator respectivamente, e s é o escorregamento. Sendo \dot{V}_1 e \dot{I}_1 a tensão e a corrente por fase do estator, \dot{E}_2 e \dot{I}_2 a tensão e corrente do rotor referidas ao estator. Sendo que se \dot{E}_{2s} e \dot{I}_{2s} for a tensão e corrente no rotor, então, $\dot{E}_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{s}$ e $\dot{I}_2 = \dot{I}_{2s}$.

Pode-se fazer o equivalente de *Thevenin* entre os pontos $a - b$ do circuito da Figura 10. Assim, obtém-se o circuito mostrado na Figura 11.

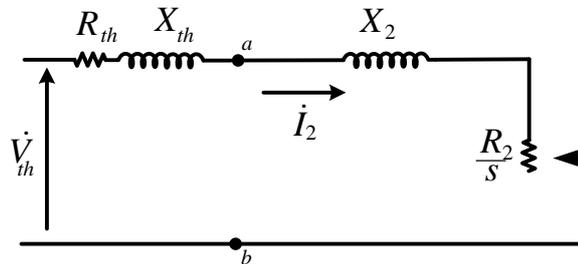


Figura 11 – Circuito com equivalente de *Thevenin*

A partir da Figura 11 pode-se calcular a corrente \dot{I}_2 como:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{V}_{th}}{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right) + j(X_{th} + X_2)} \tag{15}$$

A compreensão da transferência de potência na máquina, é definida no diagrama apresentado na Figura 12. Sendo a P_{ele} a potência elétrica, P_{os} as perdas ôhmicas no estator, P_g a potência transferida no entreferro, P_{or} perdas ôhmicas no rotor, P potência eletromecânica rotórica, $P_{hf} + P_{av}$ são as perdas por histerese e corrente de *Foucault* somadas às perdas de atrito e ventilação, P_{mec} potência mecânica de saída.

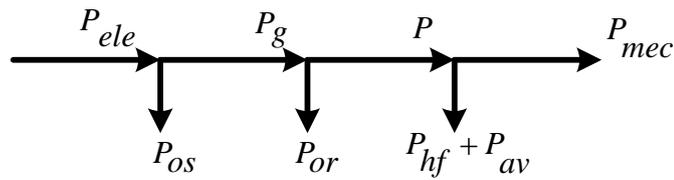


Figura 12 – Transferência de potência

Define-se através da Figura 10:

$$P_g = n_{fases} I_2^2 \left(\frac{R_2}{s} \right), \quad (16)$$

e

$$P_{or} = n_{fases} I_2^2 R_2, \quad (17)$$

onde n_{fases} é o número de fases.

Através de (16) e (17), percebe-se que:

$$P_{or} = s P_g. \quad (18)$$

Da Figura 12 e utilizando (18) pode-se obter:

$$P = P_g - P_{or} = (1 - s) P_g. \quad (19)$$

No entanto, deseja-se conhecer o conjugado mecânico da máquina. Assim será possível determinar o torque que a turbina deverá impor à máquina para que ela opere como gerador.

Para o caso geral, tem-se que o torque é dado por:

$$T = \frac{P}{\omega_r} = \frac{(1 - s) P_g}{(1 - s) \omega_s}. \quad (20)$$

Substituindo (15) e (16) em (20) tem-se:

$$T = \frac{n_{fases}}{\omega_s} \frac{\left(\frac{R_2}{s}\right) V_{th}^2}{\left[\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2)^2\right]}, \quad (21)$$

Para operação com $s \cong 0$, (21) torna-se:

$$T = \frac{n_{fases} V_{th}^2}{\omega_s R_2} s = ks, \quad (22)$$

onde, $k = \frac{n_{fases} V_{th}^2}{\omega_s R_2}$.

Assim, para valores de $s \cong 0$, o comportamento da curva do $T \times \omega_r$ é apresentado na Figura 13:

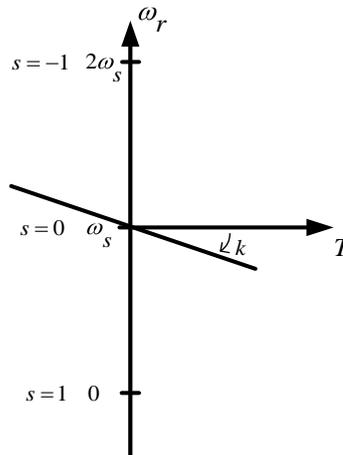


Figura 13- Curva $\omega_r \times T$

Para operação com valores elevados de s (21) torna-se:

$$T = \frac{n_{fases} R_2}{\omega_s s} \frac{V_{th}^2}{[(R_{th})^2 + (X_{th} + X_2)^2]} = \frac{k_1}{s}, \quad (23)$$

onde, $k_1 = \frac{n_{fases} R_2 V_{th}^2}{\omega_s [(R_{th})^2 + (X_{th} + X_2)^2]}$.

Logo, as curvas do torque para valores de s muito elevados, é mostrado na Figura 14.

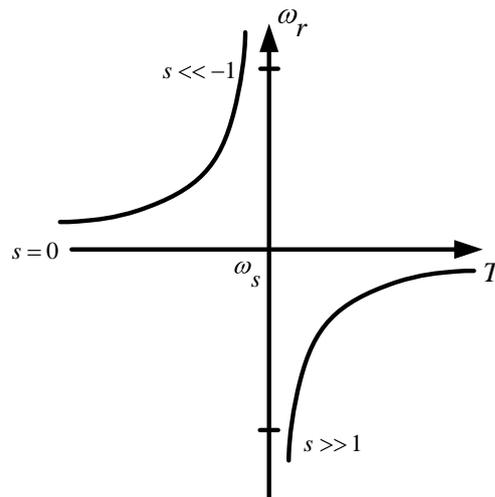


Figura 14- Curva $\omega_r \times T$

Assim, associando os gráficos das Figura 13 e Figura 14 obtém-se o gráfico para a região completa de escorregamento:

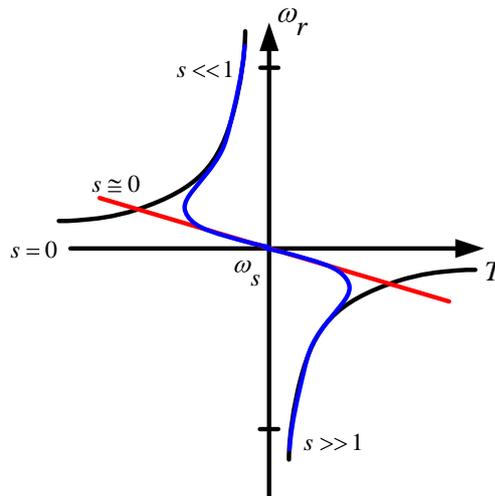


Figura 15- Curva $\omega_r \times T$

Invertendo os eixos da Figura 15, obtém-se a Figura 16. A partir deste gráfico pode-se verificar que o pré-requisito para a máquina de indução operar como gerador é que este gire a uma velocidade maior que a velocidade síncrona, então $\omega_r > \omega_s$, ou seja, a máquina terá um escorregamento negativo.

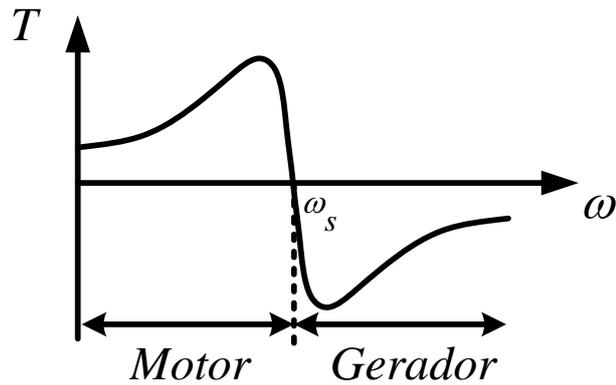


Figura 16- Curva Torque $\times \omega_r$

O sistema hidráulico e a turbina deverão garantir que o eixo do gerador tenha uma rotação maior que a síncrona. Isso é garantido aplicando um torque suficientemente negativo ou alterando o número de polos da máquina, como mostra em:

$$n_s = \frac{120f}{P} \text{ rpm}, \quad (24)$$

onde, f e P são, respectivamente, a frequência e o número de polos da máquina.

Como o gerador não tem controle de velocidade ou potência, a velocidade de rotação dependerá do torque aplicado dado por (12), e da equação newtoniana, que rege o sistema:

$$T_{mec} - T_{ele} = J \frac{d\omega_r}{dt}, \quad (25)$$

onde, T_{mec} , T_{ele} , J e ω_r são, respectivamente, o torque mecânico, torque elétrico, momento de inércia do conjunto turbina/gerador, e velocidade de rotação do eixo do rotor.

Pode-se reescrever (25) multiplicando-a pela velocidade de rotação:

$$\omega_r T_{mec} - \omega_r T_{ele} = J \omega_r \frac{d\omega_r}{dt}, \quad (26)$$

onde, $\omega_r T_{mec} = P_{mec}$, $\omega_r T_{ele} = P_{ele}$ e $J \omega_r = H$, são respectivamente potência mecânica, potência elétrica e constante de inércia. Assim, (26) é dada por:

$$P_{mec} - P_{ele} = H \frac{d\omega_r}{dt}. \quad (27)$$

Através da Figura 16, que foi feito considerando torque positivo o torque motor, verifica-se a faixa de operação que a máquina de indução deverá operar para que ela atue como gerador quando conectado à rede. Na referência desta figura, o sistema hidráulico deverá produzir um torque negativo. Analisando (12), a velocidade v_2 deverá ser maior que a velocidade $\omega_s R$. Assim, o sistema produz um torque negativo, consequente de uma velocidade maior que a velocidade síncrona.

2.3.2 Modelo das Redes Elétricas

Além de analisar as características da geração variando os parâmetros do sistema hidráulico, apresenta-se uma análise do gerador conectado a diversos tipos de redes. O sistema de energia elétrica será representado pelo modelo de uma fonte de tensão em série com uma impedância (equivalente de *Thevenin*), como mostrado na Figura 17. Um parâmetro para definir a característica da rede é a Relação de Curto-Circuito (*RCC*). A definição das características das redes consideradas é mostrada na Tabela 1:

Tabela 1 – Tipos de rede

Rede	Fraca	Média	Forte
<i>RCC</i>	<2	2< <i>RCC</i> <5	>5

Com a análise de redes de diversas características é possível compreender a influência que o gerador de indução causa no sistema elétrico. Verificando a variação de tensão no ponto de conexão comum (PCC) para cada caso pode-se concluir em que condição este gerador é capaz de gerar energia atendendo aos critérios de qualidade mínima de normas como do IEEE.

No entanto, como a rede está sendo representada por uma fonte ideal, sua frequência estará fixa, não estando no escopo deste trabalho a análise da variação da frequência na fonte. No caso de sistemas isolados com outras fontes de geração, como eólica, solar ou diesel, de mesmo porte de potência, a representação dos modelos de cada um seria o mais

adequado, porém como estamos interessados, a princípio, em analisar a variação da tensão e potência, a suposição é válida.

A relação de curto-circuito é determinada diretamente através da razão entre a potência de curto-circuito S_{cc} e a potência do gerador S_G :

$$RCC = \frac{S_{cc}}{S_G}. \quad (28)$$

Reescrevendo (28), temos:

$$RCC = \frac{V_s^2}{S_G Z_{rede}}. \quad (29)$$

Como a potência da máquina (S_G) é conhecida, pode-se então determinar a impedância (Z_{rede}) para se obter uma relação de curto-circuito desejada:

$$Z_{rede} = \frac{V_s^2}{S_G RCC}. \quad (30)$$

A partir da determinação da impedância (Z_{rede}) obtém-se a resistência (R_{rede}) e a reatância (X_{rede}) da rede. Para isso considera-se que para sistemas de baixa tensão a relação entre X_{rede} e R_{rede} varie entre 2 e 8. Assim, considerando $\frac{X_{rede}}{R_{rede}} = 5$, pode-se obter estes parâmetros da seguinte forma:

$$Z_{rede} = \sqrt{X_{rede}^2 + R_{rede}^2} = \sqrt{X_{rede}^2 + \left(\frac{X_{rede}}{5}\right)^2} = \frac{\sqrt{26}X_{rede}}{5}, \quad (31)$$

então:

$$X_{rede} = \frac{5Z_{rede}}{\sqrt{26}} \rightarrow L = \frac{5Z_{rede}}{\omega\sqrt{26}}, \quad (32)$$

e

$$R_{rede} = \frac{X_{rede}}{5} = \frac{Z_{rede}}{\sqrt{26}}. \quad (33)$$

Assim, pode-se representar a conexão entre a máquina de indução e a rede elétrica no PCC, por meio da figura abaixo.

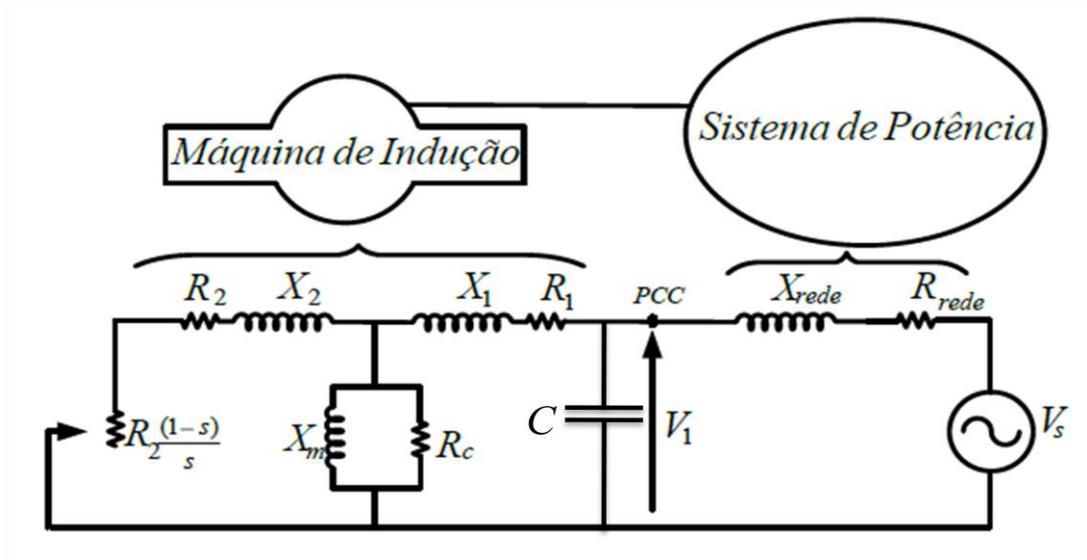


Figura 17 – Sistema elétrico

A Figura 17 ilustra a representação do modelo da máquina de indução e do modelo do sistema de potência. Sendo Z_{rede} a impedância equivalente e V_s a tensão do equivalente de *Thevenin* do sistema de potência.

A máquina de indução é composta de elementos resistivos e indutivos. Como forma de compensar a quantidade de reativos, geralmente utiliza-se capacitores em derivação [7]. Para este trabalho, calcula-se os capacitores suprindo 75% da quantidade de reativos que a máquina consome. Esta consideração é feita pois assumiu-se que a máquina trabalha frequentemente gerando 75% da potência ativa nominal. Assim, este sistema não possui controle da potência reativa.

Pode-se calcular o banco de capacitores em estrela no PCC através de:

$$Q_{cap} = 3 \frac{V_1^2}{X_c}, \quad (34)$$

e a potência reativa que deverá ser compensada é dada por:

$$Q_{maq} = S \sin(\varphi), \quad (35)$$

onde φ é o ângulo do fator de potência.

Igualando (34) e (35) e sabendo que $X_c = \frac{1}{\omega C}$, então o banco de capacitores terá uma capacitância nominal definida:

$$C_{nom} = \frac{S \sin(\varphi)}{3V_1^2 \omega}. \quad (36)$$

Assim capacitância utilizada é igual a $C = 0,75C_{nom}$.

Capítulo 3

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados de simulações desenvolvidas a partir dos modelos das partes hidráulicas e elétricas apresentadas no Capítulo 2.

O capítulo está dividido de forma a dar segmento a um projeto de uma usina de geração elétrica a partir de ondas do mar. Portanto, este capítulo apresenta o dimensionamento preliminar da parte hidráulica, mecânica e elétrica, com base em um protótipo. Depois é definido o parâmetro de entrada do sistema de geração com suas equações analíticas.

É feita a simulação do sistema hidráulico a partir das equações analíticas do sistema hidráulico onde é avaliado o efeito da mudança de pressão e volume do acumulador hidropneumático.

Neste capítulo, também são apresentadas as simulações do sistema de geração completo, analisando o efeito hidráulico e da rede elétrica ao qual a máquina é conectada. A partir da análise do efeito hidráulico, dimensiona-se (tamanho da câmara e pressão) o acumulador hidropneumático. O efeito da rede elétrica é analisado visando determinar a possibilidade de uma geração com qualidade.

As simulações foram realizadas utilizando o programa PSCAD/EMTDC.

3.1 Considerações Iniciais

Este estudo tem como base um protótipo de $100kW$. As Tabela 2 e Tabela 3 apresentam os valores dos parâmetros definidos nas Figura 4 e Figura 5.

Tabela 2 – Dados do sistema hidráulico

A_0 – Área do pistão da bomba hidráulica	$0,4417m^2$
A_1 – Área do êmbolo	$0,64m^2$
A_2 - Área do injetor	<i>Variável de $0,2\text{ cm}^2$ a $2,01\text{ cm}^2$</i>
h_1 - Altura do nível de água até o êmbolo	1 m
h_2 - Altura do nível de água até o injetor	$0,3\text{ m}$
d – posição inicial do êmbolo	$0,5\text{ m}$
ρ – densidade da água	1.10^3 kg/m^3
g – Aceleração da gravidade	$9,8\text{ m/s}^2$
P_2 - Pressão atmosférica	$1\text{ atm} = 1.10^5\text{ Pa} = 1.10^5\text{ N/m}$
P_0 - Pressão inicial na câmara	<i>Variável de $3,5.10^6\text{ Pa}$ a 5.10^6 Pa</i>
V_t – Volume total (incluindo acumulador)	$1m^3 \leq V_t \leq 8m^3$

Tabela 3 – Dados da turbina Pelton

R - Raio	$0,3\text{ m}$
θ – Ângulo de escoamento da pá	30°

Os dados da máquina de indução são apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 – Dados da máquina de indução

n° de polos	4
Momento de Inércia (J)	1 kgm^2
Potência Aparente de Base (S)	$111,9\text{ kVA}$
Tensão Base	220 V
Fator de Potência	0,85
Eficiência	98,5%
Escorregamento	0.015
ω_{base}	$188,49\text{ rad/s}$
T_{base}	$593,66\text{ N.m}$

3.1.1 Determinação da Vazão de Entrada do Sistema Hidráulico.

O parâmetro de entrada do sistema hidráulico é a vazão de água. A partir da movimentação do flutuador, pela ação das ondas do mar, aciona-se a bomba que injeta água no acumulador. Com base nos dados do protótipo, considera-se que a cada “bombeada” seja injetado 80 litros de água para cada período de 5 segundos. Essa hipótese é baseada na altura frequente das ondas.

Definiu-se o gráfico da vazão de entrada de acordo com o movimento das ondas do mar. Neste trabalho foi considerado que os flutuadores acompanham o movimento das ondas e essas têm forma idealizada como senoidal conforme mostrado na Figura 6. Para o estudo, analisou-se um sistema de conversão de energia das ondas em energia elétrica com apenas um flutuador.

Para a dedução de uma expressão analítica da forma de onda descrita na Figura 18 utilizou-se a série de *Fourier* [8].

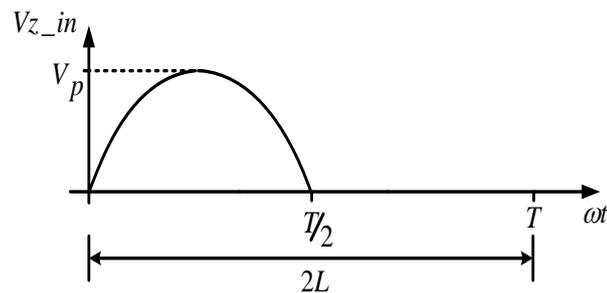


Figura 18 – Vazão de entrada

Pela definição da série de *Fourier*, tem-se:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{n\pi t}{L}\right) + b_n \sin\left(\frac{n\pi t}{L}\right) \right], \quad (37)$$

onde,

$$a_0 = \frac{1}{L} \int_c^{c+2L} f(t) dt, \quad (38)$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_c^{c+2L} f(t) \cos\left(\frac{n\pi t}{L}\right) dt, \quad (39)$$

e

$$b_n = \frac{1}{L} \int_c^{c+2L} f(t) \sin\left(\frac{n\pi t}{L}\right) dt, \quad (40)$$

onde, c é uma constante inicial, T o período e $2L = T$

Assim, calculou-se os termos a_0 , a_n e b_n :

$$a_0 = \frac{1}{T/2} \int_0^T V_p \sin(\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_p \sin\left[\frac{2\pi}{T} t\right] dt = \frac{2V_p}{\pi}, \quad (41)$$

e

$$a_n = \frac{1}{T/2} \int_0^T V_p \sin(\omega t) \cos(n\omega t) dt \rightarrow a_n[n, T] = V_p \frac{1 + \cos[n\pi]}{\pi - n^2\pi}. \quad (42)$$

Pode-se notar que $n = 1$ é um termo singular. Logo, se faz necessário calcular o termo para o primeiro harmônico separadamente:

$$a_1[T] = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_p \sin\left[\frac{2\pi}{T} t\right] \cos\left[\frac{2\pi}{T} t\right] dt = 0, \quad (43)$$

e

$$b_n = \frac{1}{T/2} \int_0^T V_p \sin(\omega t) \sin(n\omega t) dt \rightarrow b_n[n, T] = \frac{V_p \sin[n\pi]}{\pi - n^2\pi}. \quad (44)$$

Novamente calculando-se o termo fundamental:

$$b_1[T] = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_p \sin\left[\frac{2\pi}{T} t\right] \sin\left[\frac{2\pi}{T} t\right] dt = \frac{1V_p}{2}. \quad (45)$$

A forma geral da série de *Fourier* é apresentada em (46). O somatório foi considerado até o harmônico de 50ª ordem e período $T = 5s$:

$$f[t, T = 5] = \frac{V_p}{\pi} + \sum_{n=2}^{50} V_p \left(\frac{1 + \cos[n\pi]}{\pi - n^2\pi} \cos \left[2 \frac{\pi}{T} n \times t \right] + \frac{\sin[n\pi]}{\pi - n^2\pi} \sin \left[2 \frac{\pi}{T} nt \right] \right) + \frac{V_p}{2} \sin \left[2 \frac{\pi}{T} t \right]. \quad (46)$$

A Figura 19 apresenta a curva obtida a partir de (46) para $V_p = 1$:

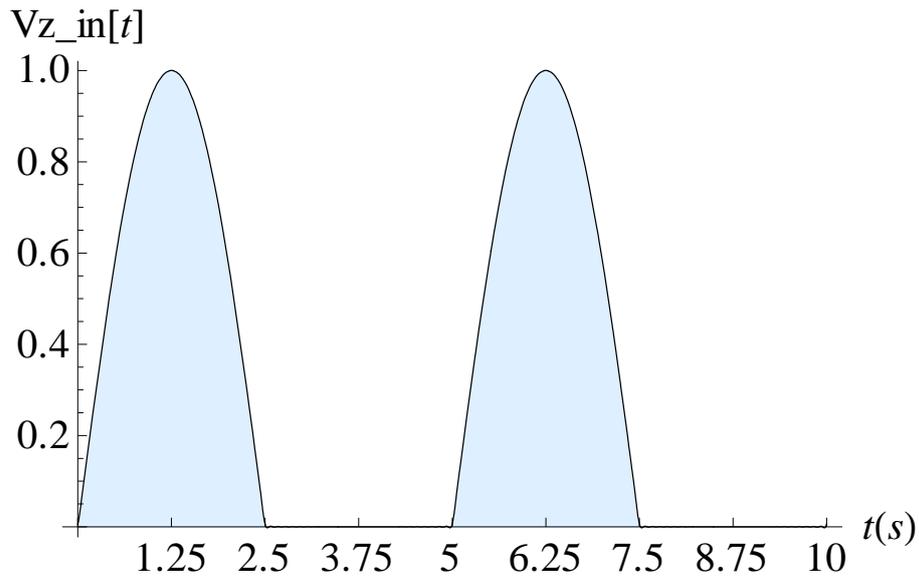


Figura 19 – Curva da vazão de entrada

3.1.2 Determinação do Valor de Pico (V_p)

O valor de pico da onda de vazão de entrada (V_p) é obtido considerando-se que em cada período insere-se um determinado volume de água. Para a curva da Figura 18, temos:

$$\begin{cases} Vz_in = V_p \sin(\omega t) & 0 \leq t \leq T/2, \\ 0 & 0 \leq t \leq T/2, \end{cases} \quad (47)$$

apesar desta expressão analítica definir a vazão de entrada, (46), que foi obtida a partir da série de *Fourier*, mostra que o parâmetro de entrada pode ser modificado para outras formas de onda periódica que se deseje.

O volume é dado por:

$$Volume = \int_0^{T/2} V_p \sin(\omega t) dt = \frac{T V_p}{\pi}. \quad (48)$$

A quantidade de volume que entra por “bombeada” é dependente da altura das ondas. Este trabalho analisará o comportamento do sistema (tensão e potência ativa) para diferentes volumes, modificando V_p .

Definiu-se, a princípio, que o volume bombeado em cada período igual a 80 *litros* e o período igual a $T = 5s$ o valor de V_p será:

$$V_p = \frac{Volume \pi}{T} = 0,0502 \frac{m^3}{s}. \quad (49)$$

Assim, a forma de onda da vazão pode ser alterada através a serie de *Fourier*. E o volume de água bombeado em cada período pode ser modificado através de V_p .

3.2 Simulação do Sistema hidráulico

A parte hidráulica do sistema de geração pode ser analisada separadamente do sistema mecânico-elétrico. Por métodos discretos de simulação digital, foram obtidas as variadas formas de onda de cada parte do acumulador hidropneumático apresentado na Figura 4.

A partir de (3), (6) e (9) desenvolvidas no Capítulo 2 e aplicando a entrada apresentada (Vz_{in}), obtém-se a curva da velocidade do jato de água v_2 e do deslocamento do êmbolo ($\delta(t)$).

Para as curvas apresentadas na Figura 20, considerou-se $P_0 = 3,5 \times 10^6 Pa$ e $V_t = 8m^3$. Considerou-se também, que todo o volume de água que entra no acumulador em um período é liberado neste mesmo tempo, ou seja, o volume que entra em $\frac{T}{2}$ segundos é liberado em T segundos (isso porque a bomba só injeta água no movimento de descida). Para que isso ocorra a área A_2 é ajustada. Esse ajuste é feito manualmente até que o valor médio da velocidade de saída não se altere.

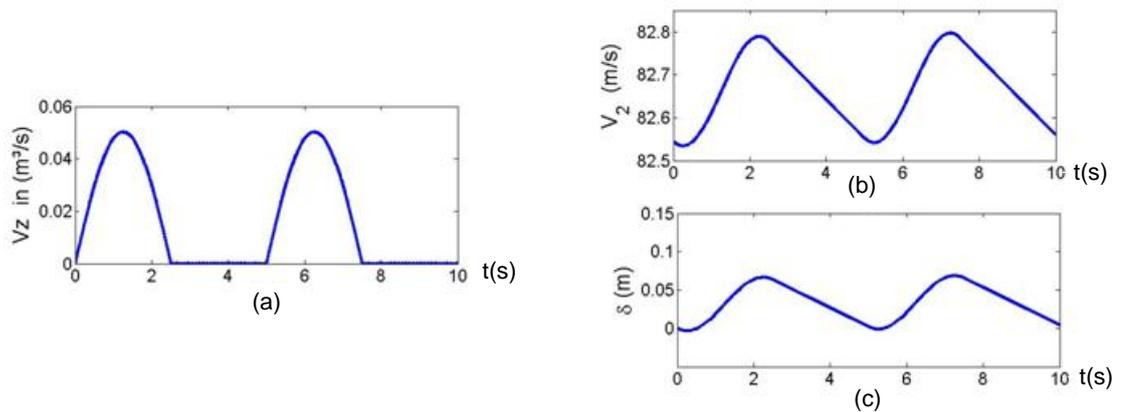


Figura 20 – Formas de ondas das principais variáveis do acumulador hidropneumático

A Figura 20 (a) apresenta a vazão de entrada do sistema hidráulico para um volume de 80 litros por bombada. Em (b) é mostrada a velocidade $v_2(t)$ e em (c) o deslocamento do êmbolo a partir da posição d .

Com o ajuste da área A_2 , pode-se fazer o controle para armazenamento ou liberação de energia (armazenada em forma de ar comprimido). Através da Figura 20 (b) percebe-se, que o armazenador está funcionando como filtro, suavizando o jato de água. Na seção 3.3.2.1, é mostrado que quanto maior a variação do jato maior a flutuação da potência ativa gerada.

Para a condição imposta no qual todo volume de água que entra no acumulador saia no mesmo ciclo percebe-se que quando se aumenta a pressão deve-se diminuir a área. Isso é previsível, pois, uma maior pressão, faz com que a água seja mais pressionada a sair, logo diminui-se a área, para manter o equilíbrio entre a entrada e saída.

Para o sistema hidráulico atuando como filtro a variação máxima de $\delta(t)$ na Figura 20 (c) é em torno de $6,5\text{cm}$. Para aplicações em armazenamento de energia, o dimensionamento da máxima distância que o êmbolo pode percorrer define a quantidade de energia que pode ser armazenada. Para o dimensionamento utilizado neste trabalho, o deslocamento máximo que o êmbolo poderá desenvolver é de 100cm , o que corresponde a cerca de 1 minuto de geração caso pare de entrar água.

Para o estudo da variação de tensão e potência gerada, primeiramente avaliou-se a flutuação do jato de água em diferentes configurações do acumulador hidropneumático modificando a pressão P_0 , o volume V_t e a área A_2 .

A Figura 21 mostra o comportamento da velocidade do jato de água no tempo variando-se o volume da câmara hiperbárica ($1m^3 \leq V_t \leq 8m^3$). Estes valores de volume foram definidos levando em consideração que para $V_t = 1m^3$ seria equivalente um sistema sem câmara hiperbárica, onde este volume seria somente o disponível do movimento do êmbolo. Para o limite de $V_t = 8m^3$ seria equivalente a um sistema superdimensionado (para a faixa de potência considerada). Nota-se pela figura que para um volume menor de câmara aumenta-se a oscilação do jato.

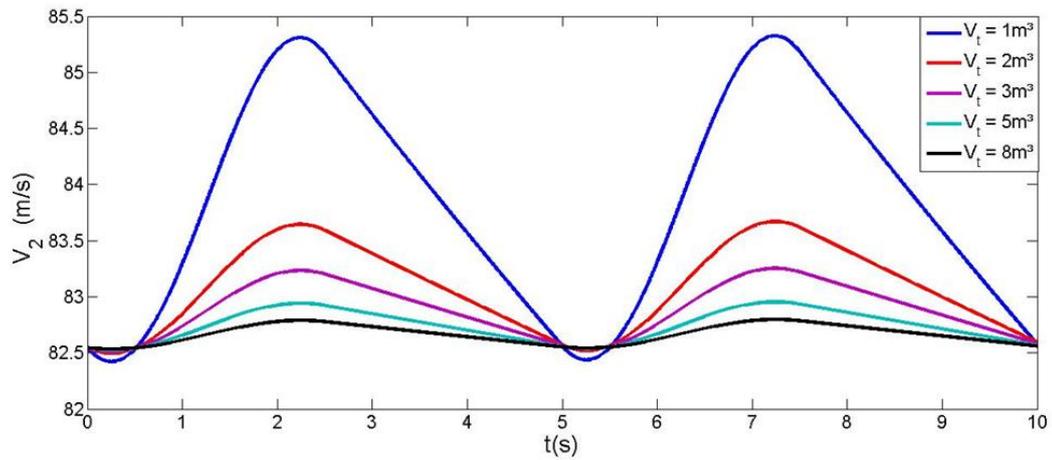


Figura 21 – Velocidade v_2 para $P_0 = 3,5 \times 10^6 Pa$ e $A_2 = 1,9 cm^2$

A Figura 22 apresenta o mesmo comportamento de maior flutuação quando se tem menor volume, porém, para este caso a pressão P_0 é incrementada ($P_0 = 5 \times 10^6 Pa$) aumentando-se o nível médio do jato de água. Este fato é explicado por (3) e (6). A área A_2 é reduzida pelo motivo abordado acima.

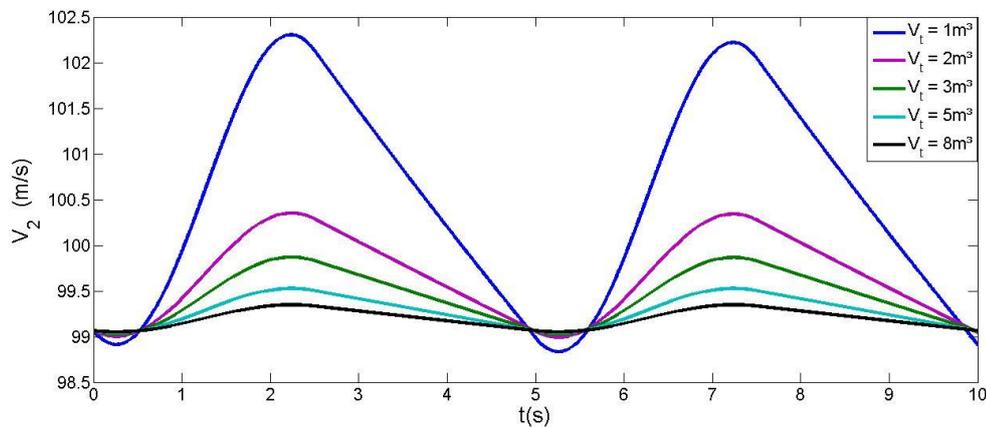


Figura 22 - Velocidade v_2 para $P_0 = 5 \times 10^6 Pa$ e $A_2 = 1,61 cm^2$

A partir dos resultados de simulação apresentados nas Figura 21 e Figura 22, percebe-se que o acréscimo da pressão P_0 implica em um aumento da velocidade média do jato. Com relação à variação do volume da câmara, o aumento deste implica em menores flutuações da velocidade do jato (V_2).

O motivo do nível médio da velocidade ter diminuído é devido a dinâmica de (6) e (3). Essas equações mostram que o volume V_t interfere na dinâmica de $P_1(t)$, logo interfere na velocidade do jato.

3.3 Simulação do Sistema Completo

Após o conhecimento das formas de onda das variáveis do sistema hidráulico, deseja-se agora analisar a geração elétrica. Para isso, utiliza-se a equação do torque da turbina, apresentada em (12) que pode ser calculado com a velocidade do jato de água e da velocidade de rotação. Porém, a velocidade de rotação também depende da potência elétrica que o gerador está produzindo. O diagrama de blocos que representa esse sistema é apresentado na Figura 23.

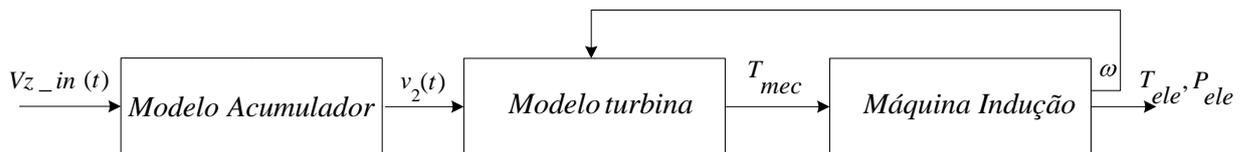


Figura 23 – Diagrama do sistema completo

A Figura 23 mostra a junção da parte hidráulica, mecânica e elétrica. A partir dos modelos de cada parte do sistema pode-se abrir cada parte do diagrama apresentado acima em um diagrama de blocos.

A partir das equações analíticas que representam o modelo do acumulador obtém-se o diagrama mostrado na Figura 24.

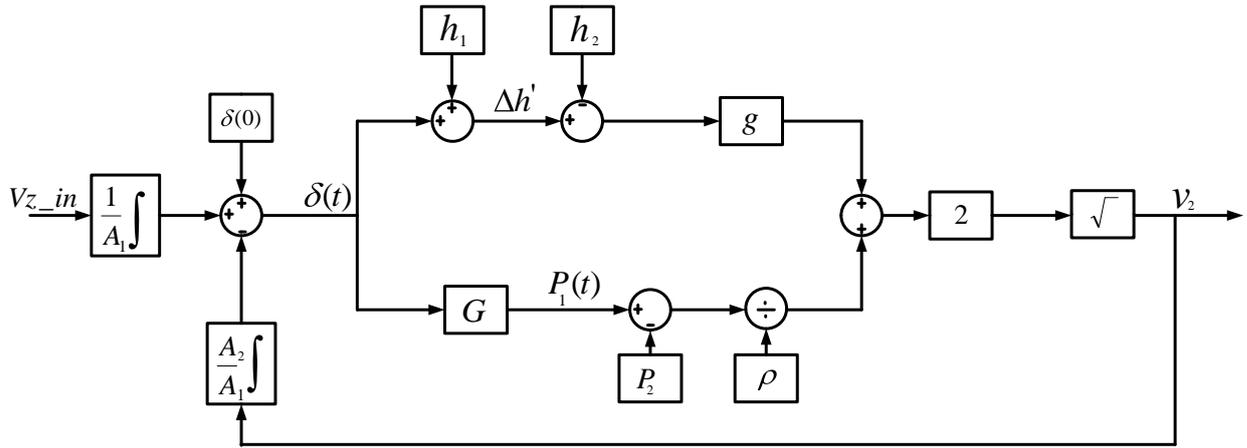


Figura 24 – Diagrama de blocos do sistema hidráulico

O bloco G é apresentado na Figura 25.

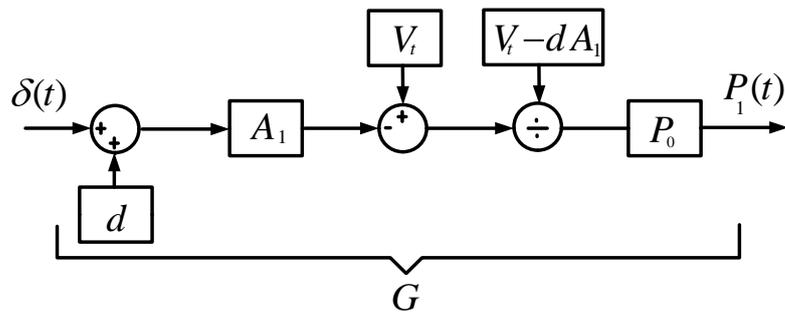


Figura 25 - Diagrama de blocos do sistema hidráulico

Através dos diagramas apresentados nas Figura 24 e Figura 25 pode-se verificar os parâmetros de entrada (Vz_in) e de saída (v_2).

As partes mecânica e elétrica são apresentada na Figura 26.

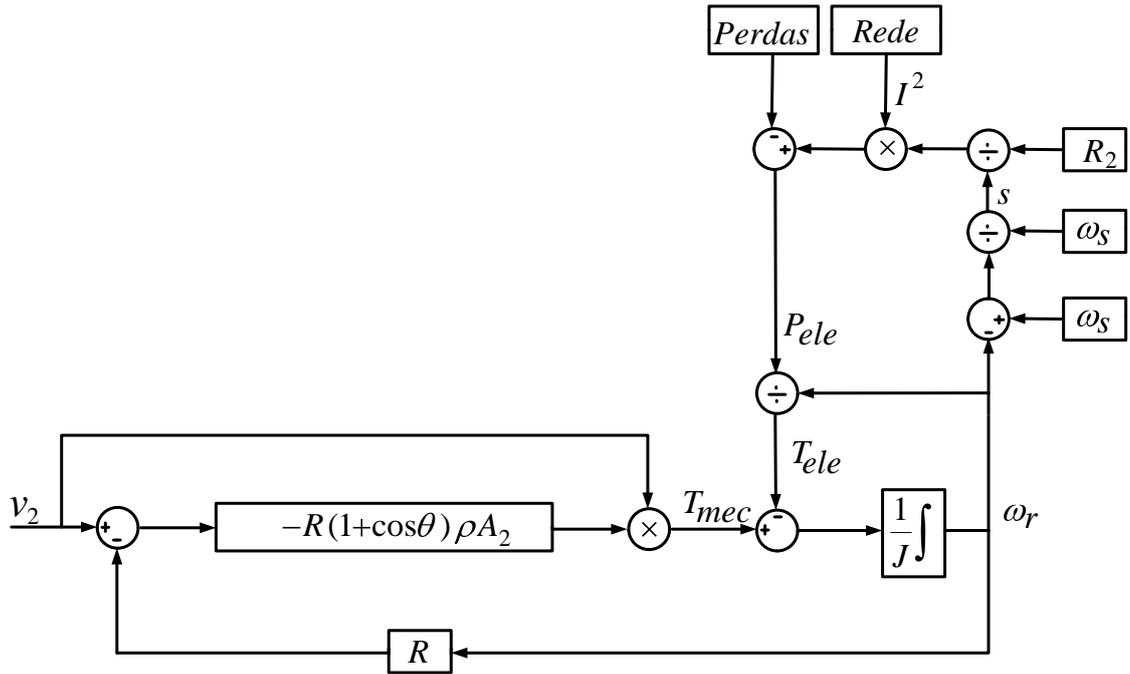


Figura 26 – Diagrama de blocos sistema mecânico-elétrico

A interação dos torques em (25) determina a velocidade de rotação. Esta é utilizada para o cálculo do torque mecânico (T_{mec}) novamente. Assim, tem-se a representação do sistema completo.

3.3.1 Limite de Operação do Sistema

Em (12) é descrito o comportamento do torque da turbina. Plotando o torque eletromecânico da máquina (T_{elemec}) juntamente com o torque da turbina pode-se determinar os limites de operação para que a máquina opere como gerador.

Analisando a curva do T_{elemec} da máquina, sabe-se da seção 2.3.1 que para a máquina estar operando como gerador a velocidade deve ser superior a síncrona e $T_{elemec} < 0$.

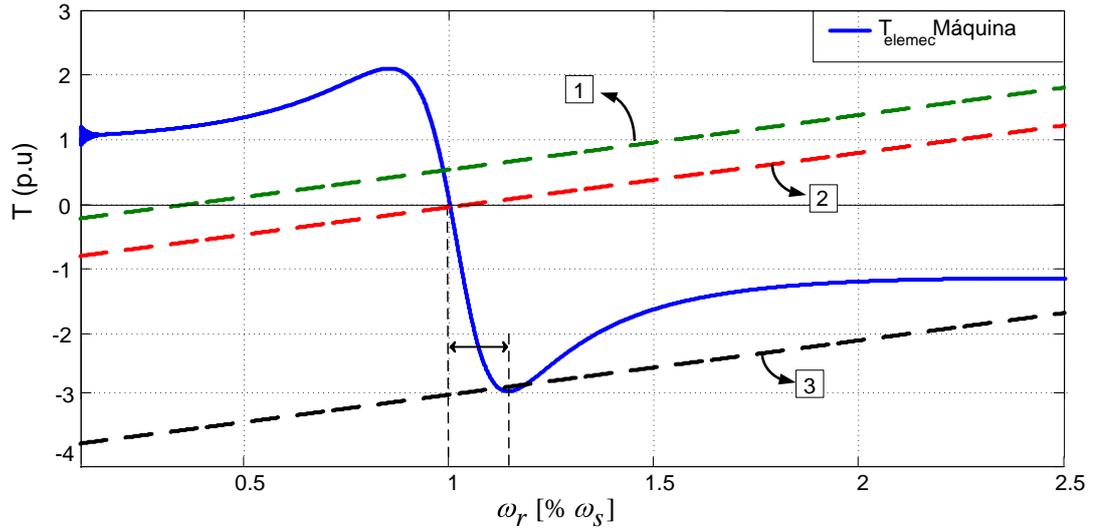


Figura 27 - Curva $T_{mec} \times \omega$

A Figura 27 mostra três retas de torque da turbina, obtidas a partir de (12) para diferentes velocidades de jato d'água. A curva tracejada 1 indica a situação onde a velocidade do jato é baixa ($v_2 < \omega_s R$). Observa-se que na interseção entre as curvas de torque da máquina e da turbina (curva 1), em regime permanente (referente a (25)), se a máquina estiver conectada a rede elétrica, a turbina funcionará como uma carga mecânica e a máquina como motor. Portanto, neste caso a velocidade do jato, que depende da pressão do acumulador é insuficiente para que a máquina entre na região de atuação como gerador.

As curvas tracejadas 2 e 3 representam os limites de operação para que a máquina opere como gerador. Sendo que na curva de limite mínimo a velocidade do jato deve ser maior que a velocidade tangencial de rotação (referente à velocidade síncrona) da máquina, ou seja, $v_2 \geq \omega_s R$.

A Figura 27 mostra os limites de operação para valores fixos da velocidade do jato de água. No entanto a velocidade do jato de água pode variar, assim, como a velocidade do jato tem flutuações (como mostrado na seção 3.2) o torque também tem. Esta flutuação pode ser ilustrada pela variação ΔT na Figura 28.

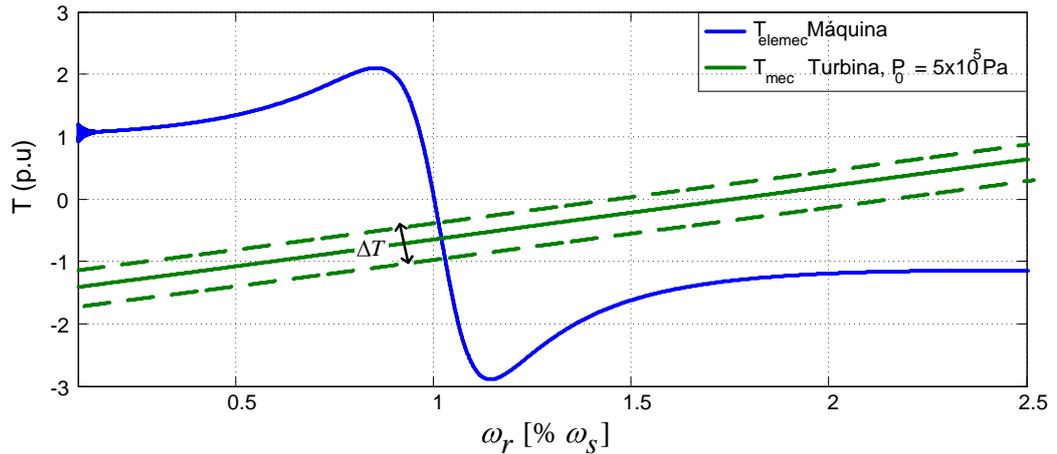


Figura 28 – Curva $T_{mec} \times \omega$

Essas variações de torque também são analisadas, pois dado que o ponto de operação da máquina esteja perto de seus limites, esta variação pode levar o sistema a instabilidade.

3.3.2 Simulação do Sistema Utilizando o PSCAD/EMTDC

Para a simulação do sistema, utiliza-se o modelo da máquina de indução da biblioteca do PSCAD/EMTDC. A rede (ou sistema de potência) é representada por uma fonte ideal seguido de uma impedância Z_{rede} .

O sistema representado no PSCAD é mostrado na Figura 29.

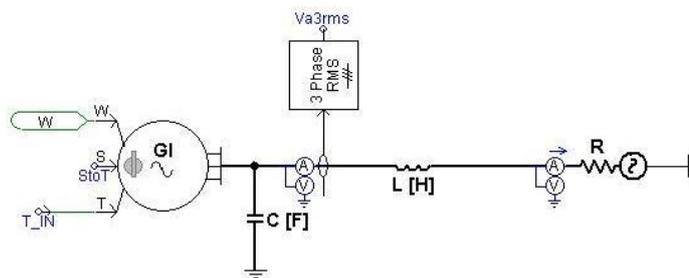


Figura 29 – Sistema representado no PSCAD

Primeiramente, simulou-se a geração para um sistema hidráulico superdimensionado, onde foram considerados: Volume de entrada de água 80 litros, $V_t = 8m^3$, $P_0 = 5 \times 10^6 Pa$, $A_2 = 1,9mm^2$ conectado a uma rede com $RCC = 5$. O banco de capacitores foi calculado para uma capacitância igual a $C = 0,75C_{nom}$.

Neste caso base, o banco de capacitores foi utilizado, pois, através de simulações, notou-se que gerador não é capaz de produzir uma tensão em torno de $1 p.u.$. A análise, sem capacitor, será vista no item 3.3.2.2.

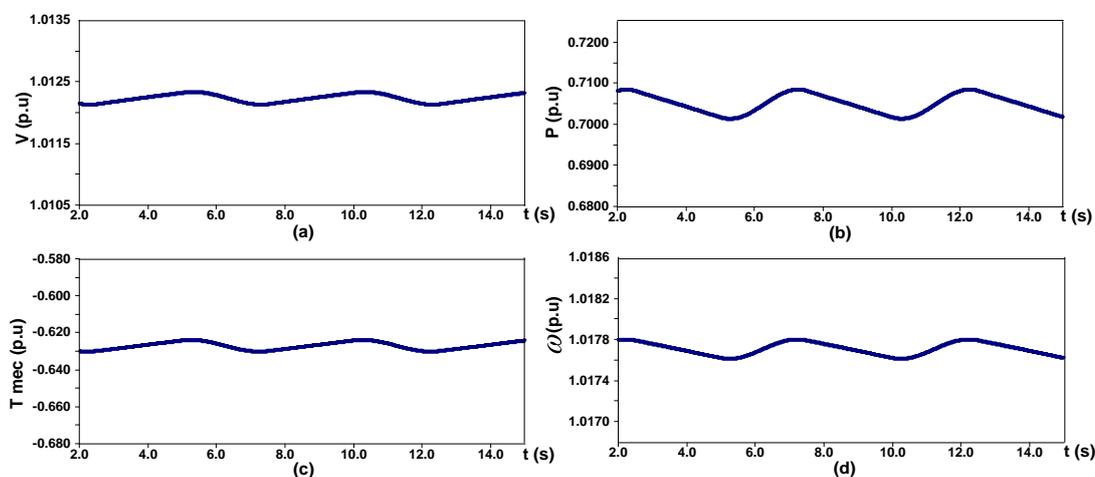


Figura 30 – Curvas características da tensão, potência, torque mecânico e velocidade angular

A Figura 30 (a) apresenta o comportamento da tensão gerada. Pode-se notar que a tensão está acima de $1 p.u.$. Isso deve-se ao fato da utilização do capacitor.

A Figura 30 (b) mostra a potência ativa. É possível verificar sua flutuação ($\Delta P = 1,4\%$) sendo a potência média gerada igual a $0,705 p.u.$ o que equivale a cerca de $66kW$. Esta potência ativa gerada será considerada como referência, isso porque o volume de água bombeado é considerado freqüentemente 80 litros. Porém, devido a variação das ondas este volume bombeado pode aumentar, assim, a potência pode chegar a $1 p.u.$.

Na Figura 30 (c) é apresentado o torque mecânico proveniente da turbina Pelton. O valor do torque é negativo devido à referência adotada no programa para uma máquina funcionando como gerador.

A Figura 30 (d) apresenta a velocidade de rotação. Nota-se que esta velocidade é superior a $1 p.u.$, o que indica a operação com velocidade acima da velocidade síncrona. Assim, a máquina está operando como gerador.

3.3.2.1 Efeito do Sistema Hidráulico

A partir da simulação base feita no item anterior, deseja-se analisar, a princípio, o efeito da pressão da câmara hiperbárica e do volume da câmara. Isso para definir qual

configuração adotar. Após fixar a dimensão do sistema hidráulico (pressão e volume da câmara) analisa-se o efeito da variação da vazão de entrada.

Assim, analisou-se as flutuações de potência e tensão alterando as dimensões do acumulador hidropneumático. Como apresentado na seção 3.2, onde foi mostrado que as alterações nas características do sistema hidráulico, como volume e pressão altera-se as flutuações e o nível médio da velocidade do jato de água, deseja-se analisar agora esses efeitos nos parâmetros da geração (tensão, potência ativa, torque mecânico e velocidade).

Considera-se a rede com $RCC = 5$, pressão $P_0 = 5 \times 10^6 Pa$ e variou-se o volume total V_t entre os pontos extremos ($1m^3 \leq V_t \leq 8m^3$). Os resultados são apresentados na Figura 31.

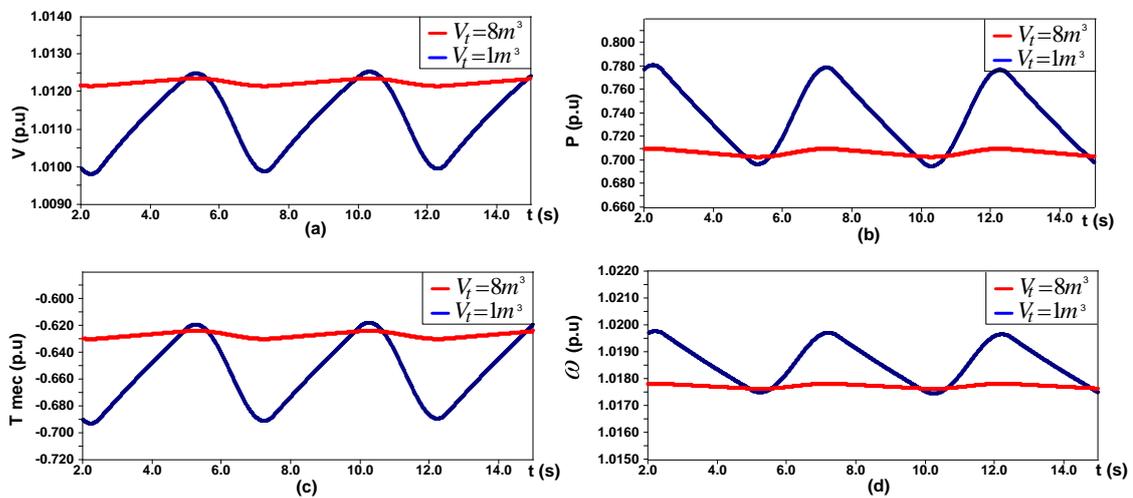


Figura 31 – Curvas características da tensão, potência, torque mecânico e velocidade angular em p.u. variando-se o volume V_t

A Figura 31 apresenta o efeito da intermitência das ondas no comportamento da geração. As Figura 31 (a), (b), (c) e (d) mostram, respectivamente, a tensão, a potência ativa, o torque mecânico e a velocidade de rotação. Verifica-se que com um maior volume de câmara hiperbárica tem-se uma menor flutuação em todos os parâmetros da geração. Este fato é reflexo da flutuação do jato de água (devido o dimensionamento do sistema hidráulico como apresentado na seção 3.2 (Simulação do Sistema hidráulico)).

A partir da Figura 31, são observadas as seguintes variações para o menor volume ($V_t = 1m^3$):

$$\Delta V = 0,25\%,$$

$$\Delta \omega = 0,24\%,$$

$$\Delta P = 16,8\%,$$

e

$$\Delta T_{mec} = 12,7\%.$$

Observa-se através da Figura 31 (a) e (d) que as variações de tensão e velocidade são pequenas em relação a variação da potência e torque (Figura 31 (b) e (c)), justificado pelo fato da rede ser forte. Assim, para este caso, nota-se que o efeito da redução da câmara interfere mais na variação da potência ativa e torque mecânico.

Pode-se notar em (b) e (c) que o nível médio das grandezas de potência e torque aumentam em módulo com um volume menor. Isso deve-se ao fato da dinâmica da pressão depender do volume total V_t .

A relação da pressão P_0 da câmara e a potência média gerada pode ser melhor visualizada com auxílio da Figura 32.

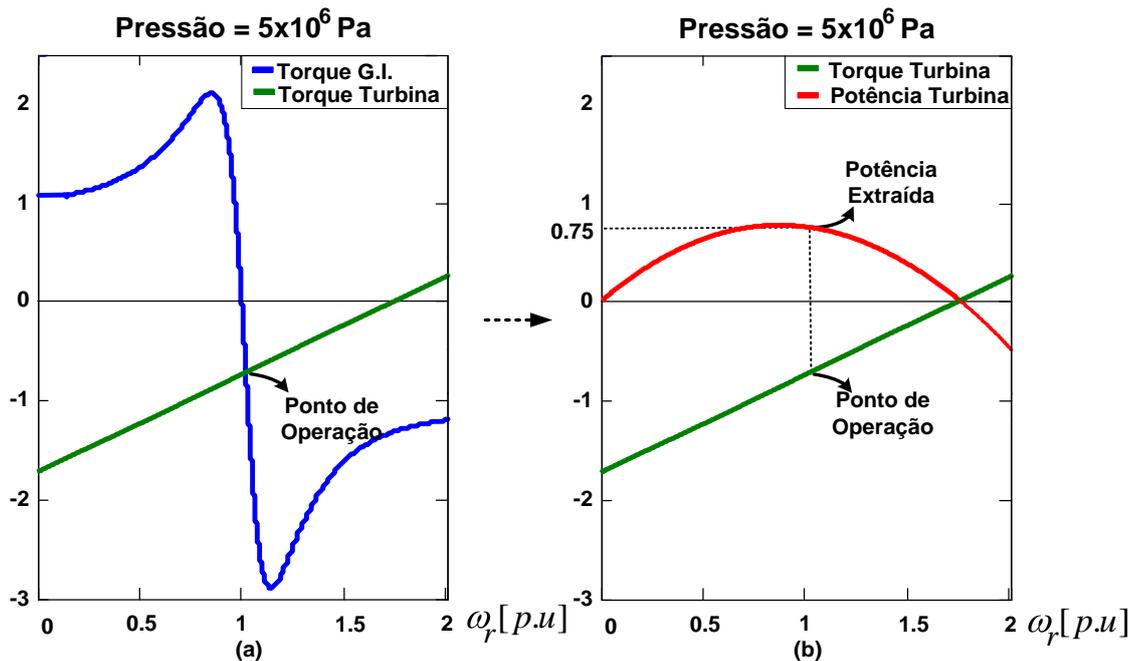


Figura 32 – Curvas de operação

A Figura 32 (a) apresenta o gráfico do torque mecânico da turbina, dado por (12), e o gráfico do torque eletromecânico da máquina, em função da velocidade de rotação ω_r . Com a interseção dos gráficos pode-se obter o ponto de operação em determinada pressão.

A Figura 32 (b) mostra, a curva do torque mecânico da turbina, dado por (12), e a potência extraída pela turbina, dado por (13). A partir do ponto de operação encontrado na

Figura 32 (a) obtém-se a potência extraída pela turbina. Esta potência é aproximadamente a potência ativa gerada pela máquina elétrica, pois na potência ativa real gerada descontam-se as perdas.

Através da seção 3.3.1, onde foi tratado do limite de operação, fica claro que a máquina talvez não consiga extrair a máxima potência da turbina, pois este ponto corresponderia a uma velocidade abaixo da síncrona.

Para analisar o efeito da pressão, manteve-se a rede com $RCC = 5$, reduziu-se a pressão para $P_0 = 3,5 \times 10^6 Pa$ e ajustou-se a área A_2 . Variando o volume total V_t obteve-se as curvas mostradas na Figura 33.

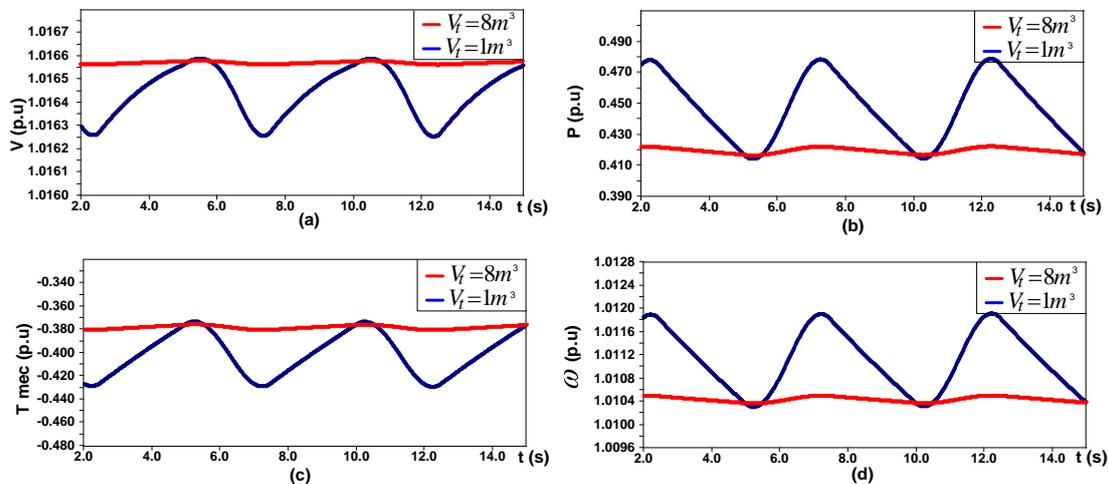


Figura 33 - Curvas características da tensão, potência, torque mecânico e velocidade angular em p.u. variando-se o volume V_t para $RCC = 5$

Novamente constata-se que para uma câmara maior tem-se uma menor variação dos parâmetros. Porém, como a pressão da câmara diminuiu a vazão de saída diminuiu assim o torque ficou reduzido (Figura 33 (c)) e a potência média gerada (Figura 33 (b)) também teve menor valor.

As variações para $V_t = 1m^3$ são:

$$\Delta V = 0,04\%,$$

$$\Delta \omega = 0,16\%,$$

$$\Delta P = 15,9\%,$$

e

$$\Delta T_{mec} = 15,0\%.$$

O comportamento dos parâmetros se assemelham ao encontrado na Figura 31, mostrando que a interferência da diminuição da câmara é mais direta na variação da potência ativa e torque mecânico.

Novamente pode-se visualizar a potência média gerada relacionada à pressão interna da câmara através da Figura 34.

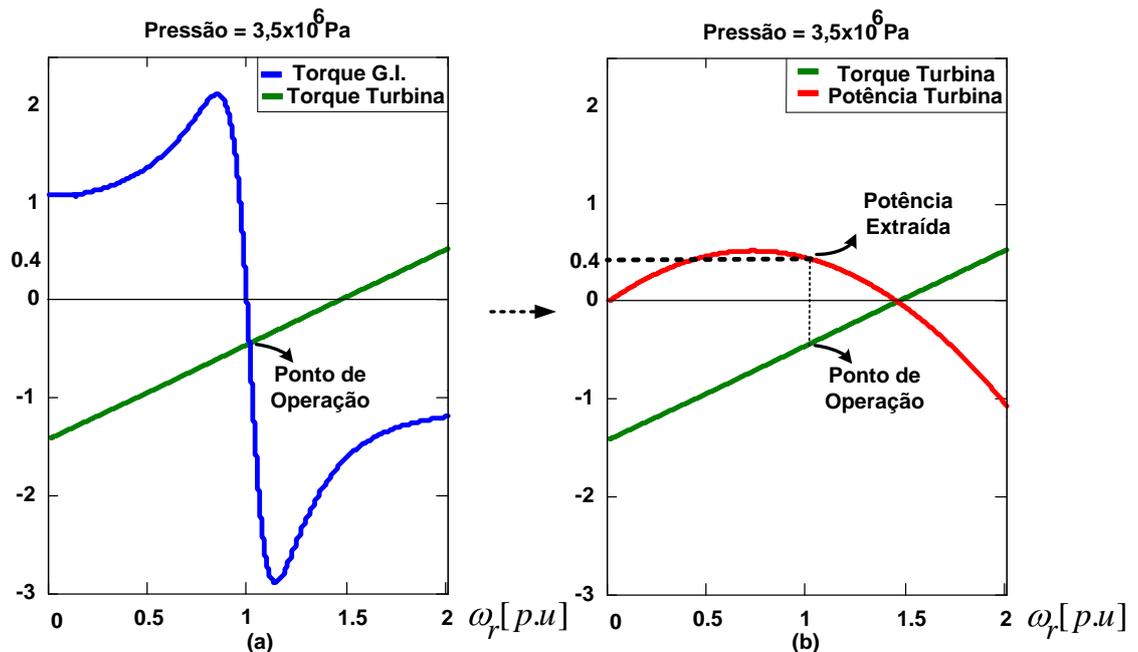


Figura 34 – Curvas de Operação

A Figura 34 mostra com clareza o fato da diminuição da potência média gerada (apresentada na Figura 33) com relação à potência gerada quando $P_0 = 5 \times 10^6 Pa$.

A partir desta análise fixou-se o valor de pressão em $5 \times 10^6 Pa$, pois com essa pressão gera-se uma maior potência ativa. E o volume foi fixado em $1m^3$, pois para uma rede com $RCC = 5$ a variação de tensão foi desprezível.

Assim, fixado estes valores, alterou-se o parâmetro de entrada (V_{z_in}), isso porque em um caso real a vazão de entrada depende da altura das ondas, estando essas se modificando ao longo do dia. Este parâmetro foi alterado modificando o valor de V_p dado na equação (49) para diferentes volumes de água “bombeada”. A área A_2 também é alterada para manter o nível médio da velocidade de saída do jato d’água constante. A Tabela 5 apresenta os valores dos parâmetros (A_2 e V_p) correspondentes a quantidade de volume de água que é injetado em cada ciclo.

Tabela 5 – Valores dos parâmetros para determinado volume de entrada

Volume por bombeamento(l)	$V_p(m^3/s)$	$A_2(cm^2)$
100	0,0628	2,01
80	0,0502	1,61
50	0,0314	1,01
10	0,0063	0,20

Nota-se através da Tabela 5 que para um maior volume bombeado para o acumulador tem-se um valor de V_p maior, ou seja, a amplitude de V_{z_in} aumenta. A área A_2 deve ser reduzida para um volume bombeado menor, isso para que a condição de que todo volume de água que entre, saia no mesmo período.

A Figura 35 apresenta a simulação do sistema a partir do ajuste dos parâmetros da Tabela 5.

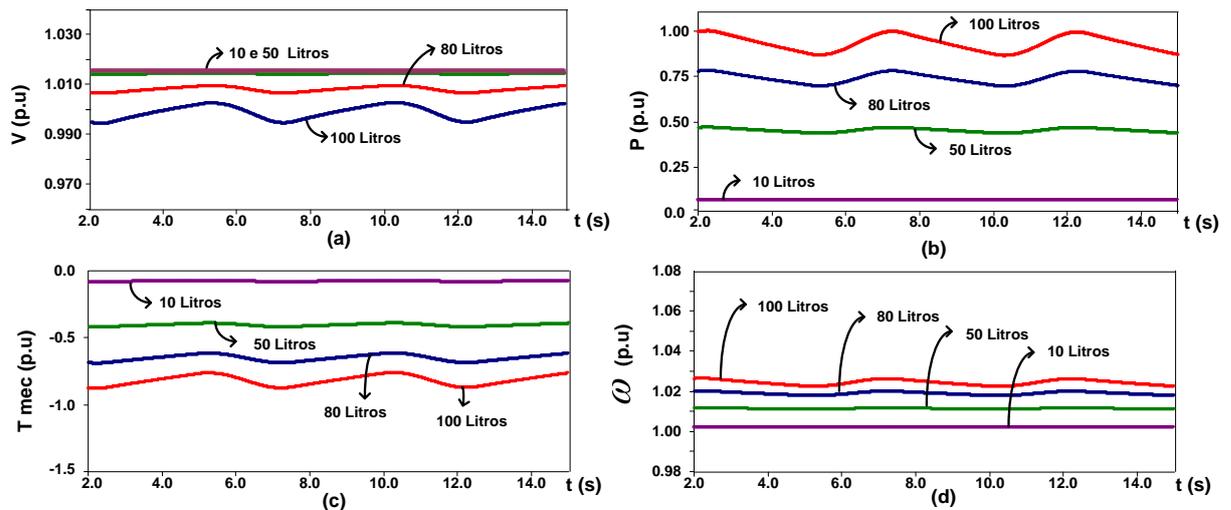


Figura 35 – Curvas características da tensão, potência, torque mecânico e velocidade angular para diferentes volumes de água “bombeados”

A Figura 35 (a) apresenta a tensão para as diferentes quantidades de água injetada. Nota-se que mesmo modificando a vazão de entrada a tensão tem valor médio em torno de 1 p.u para todos os casos e quase não apresenta flutuação de tensão. Isto se deve ao fato da rede ser forte.

A Figura 35 (b) mostra a potência ativa gerada para os diferentes volumes de água. Como já abordado, injeta-se no acumulador, frequentemente, 80 litros por bombeada, o que

seria capaz de gerar cerca 0,8 *p.u.* de pico. Porém, com o aumento da altura das ondas essa quantidade de litros por bombeada poderia aumentar. Na simulação utilizou-se o valor de 100 litros para representar este caso, e nota-se que a potência atingiria 1 *p.u.* de pico.

Os casos onde a altura da onda diminuísse é representado quando injeta-se um quantidade pequena de litros de água por bombeada (50 e 10 *litros*). Assim, nota-se pela Figura 35 (b) que a potência ativa estaria reduzida.

A Figura 35 (c) apresenta o torque mecânico da turbina. Observa-se que para uma maior quantidade de água injetada o torque tem maior valor (em módulo). Isso pode ser visualizado pela equação do torque da turbina em (12), onde o torque é dependente da área A_2 e como essa área aumenta, para um maior volume de água bombeado, o torque também aumenta.

A Figura 35 (d) mostra a velocidade de rotação da máquina. Esta velocidade é maior para volume de água injetados maiores. Isto se deve ao ponto de operação da máquina, que por sua vez está gerando mais potência ativa com um torque maior.

De um modo geral a Figura 35 apresenta o comportamento da tensão, potência ativa, velocidade e torque mecânico da máquina, onde pode-se notar que com um maior volume de água bombeado aumenta-se a flutuação das variáveis do sistema. Isso deve-se ao fato da intermitência das ondas e como o gerador está fornecendo uma maior potência para rede, esta estaria mais fraca (em relação ao gerador).

3.3.2.2 Efeito da Rede

Outra análise abordada foi a da geração considerando o gerador conectado em redes elétricas de diferentes relações de curto-circuito (*RCC*). A seção 2.3.2 descreve como são obtidos os tipos de rede. Essa análise permite observar qual a influência de um sistema com geração intermitente causa em sistemas com baixa relação de curto-circuito.

Deseja-se analisar o comportamento da tensão com o incremento da potência ativa gerada, já que esta varia de acordo com as ondas. A princípio o gerador é conectado diretamente à rede sem a utilização do banco de capacitores. Esta análise foi feita com e sem a conexão de uma carga local. Para este estudo foi considerada a variação do torque médio com que a turbina aciona o gerador.

A partir de simulações apresenta-se a RCC mínima que este gerador poderá ser conectado. Também se observa o efeito da conexão da carga.

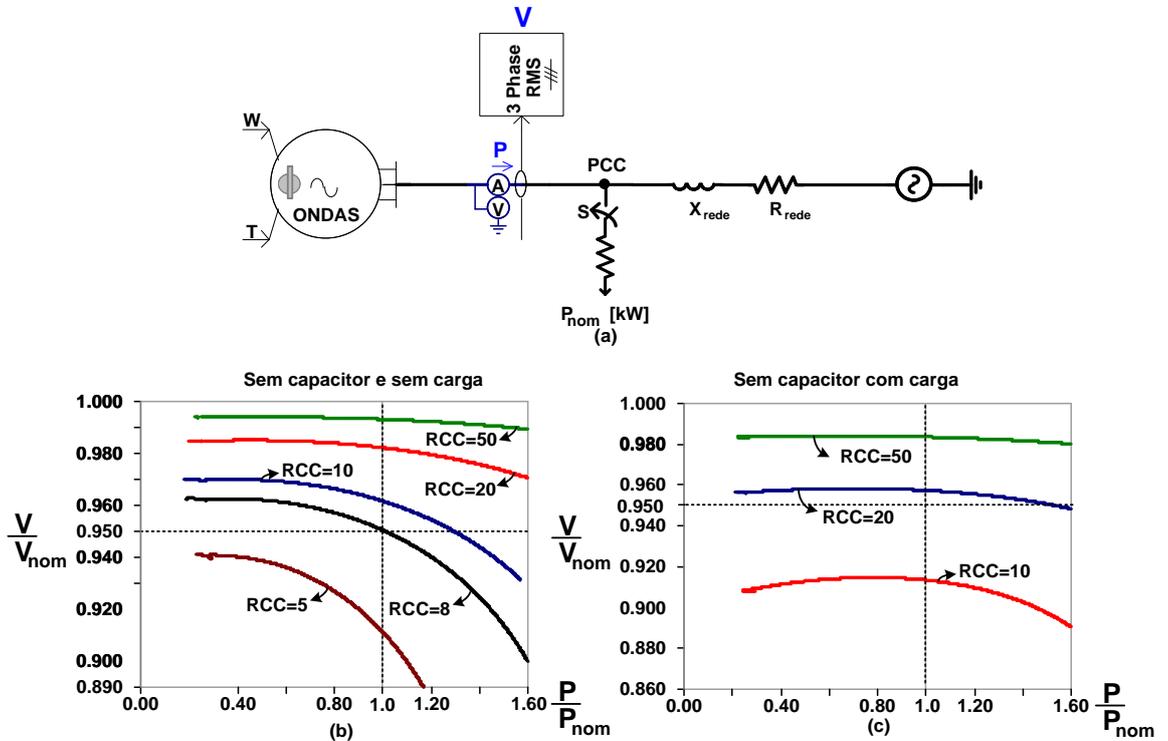


Figura 36 – Diagrama e curvas características da tensão x potência gerada

A Figura 36 (a) apresenta o gerador de indução conectado à rede no PCC. A carga é conectada a esse PCC através da chave S. Esta carga equivale à potência ativa nominal do gerador, sendo puramente resistiva.

A Figura 36 (b) e (c) ilustram a tensão no PCC em função da potência injetada para redes com determinadas RCC . Para a obtenção das curvas utilizou-se (30), onde se obteve Z_{rede} para determinada RCC , referente à potência nominal. A partir de Z_{rede} fixo, variou-se a potência gerada.

Assim, de certa forma, com uma potência gerada baixa, uma rede com RCC baixo pode ter comportamento de uma rede com RCC alto. Portanto, variando a potência gerada, varia-se a RCC implicitamente.

A Figura 36 (b) mostra o comportamento da tensão V com o incremento da potência gerada. Nota-se que a tensão não atinge o valor de $1 p.u.$. Esse fato será comprovado através do diagrama fasorial do sistema.

Observa-se que para a tensão gerada no PCC estar próxima a $1 p.u.$, o que é desejável, deve-se ter valores de RCC muito elevados ($RCC > 50$). Verifica-se, a partir da Figura 36 (b), que a RCC mínima, para geração com tensão em $0,95 p.u$ é igual a oito. Porém, mesmo assim, seria uma geração de baixa qualidade pois as oscilações de torque, devido à intermitência das ondas, podem diminuir ainda mais a tensão.

A Figura 36 (c) apresenta o efeito da conexão da carga. Com a carga ligada ao terminal do gerador nota-se que a relação de curto circuito deve ser ainda maior para se obter uma tensão próxima a $1 p.u$, sendo o limite mínimo da RCC igual a vinte, ou seja, mais do dobro do caso sem carga.

A queda de tensão com o incremento de potência deve-se ao fato da capacidade da rede em fornecer o reativo para o circuito de magnetização da máquina [7].

Assim, a partir desta análise pode-se verificar que o gerador operando sem o auxílio do banco de capacitores só poderá se conectar a uma rede com RCC muito elevada, isso para ter a tensão próxima a $1 p.u$. Nota-se também que, quando conectada uma carga ao PCC deve-se ter uma RCC ainda maior.

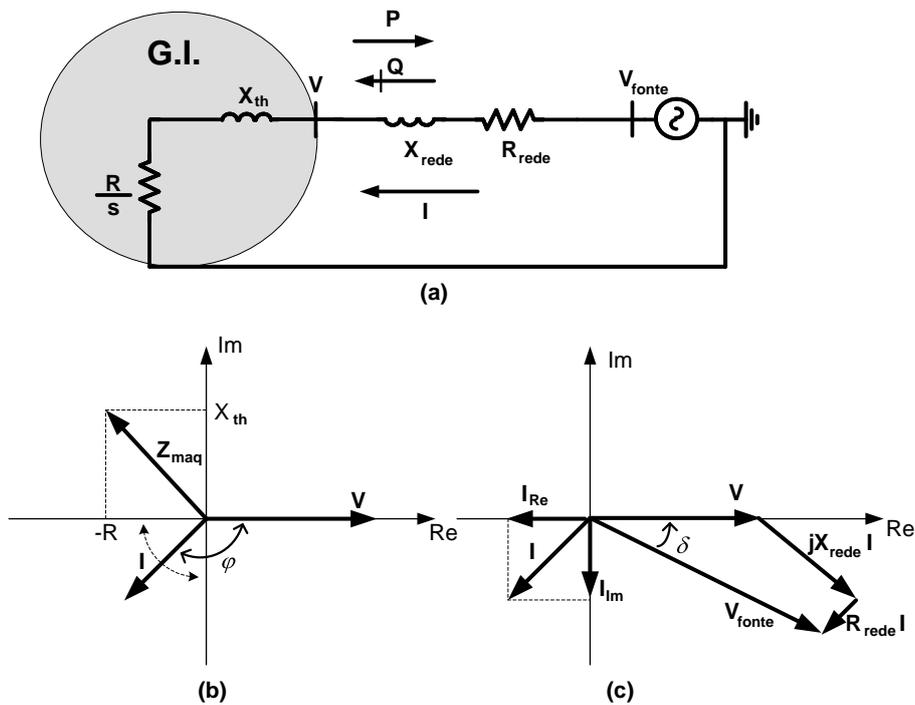


Figura 37 – Diagrama elétrico e diagrama fasorial

Pode-se analisar a geração sem a utilização do banco de capacitores através do circuito elétrico apresentado na Figura 37 (a). Por simplificação, considera-se o gerador de indução ($G.I$) representado pelo modelo simples como mostrado na figura.

As equações que regem o sistema são:

$$\dot{V}_{fonte} = \dot{V} + R_{rede}\dot{I} + jX_{rede}\dot{I}, \quad (50)$$

sendo \dot{V}_{fonte} , \dot{V} , R_{rede} , X_{rede} e \dot{I} , respectivamente, a tensão da fonte, a tensão do terminal do gerador, a resistência e reatância da rede e a corrente. A impedância da máquina é dada por:

$$\dot{Z}_{maq} = jX_{th} + \frac{R}{s}, \quad (51)$$

e sabendo que $s < 0$ para operação como gerador tem-se a parte real de \dot{Z}_{maq} negativa. Assim, a equação da corrente é dada por:

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{\dot{V}}{-R + jX_{th}} = \frac{\dot{V}(-R - jX_{th})}{R^2 + X_{th}^2}. \quad (52)$$

Para o referencial de tensão $\dot{V} = V\angle 0^\circ$, pode-se obter o diagrama apresentado na Figura 37 (b). Nota-se que o ângulo da corrente pode ser definido de acordo com (52).

A Figura 37 (c) apresenta o diagrama fasorial construído a partir de (50). Como foi considerada a relação $X_{rede} = 5 R_{rede}$ para rede de baixa tensão, nota-se pelo diagrama que a tensão V sempre será menor ou igual V_{fonte} em módulo. Assim, para a consideração de $X_{rede} = 5 R_{rede}$ somente seria possível gerar uma tensão igual a 1 p.u no caso de $Z_{rede} = 0$, o que seria equivalente a $RCC = \infty$. Para o caso de uma rede com $R_{rede} \geq X_{rede}$ tem-se uma tensão $V > V_{fonte}$.

Pode-se verificar o sentido da potência ativa e reativa através do diagrama fasorial apresentado na Figura 37 (c). Assim, tem-se:

$$P = \frac{V V_{fonte}}{Z} \sin\delta = VI \cos\varphi = VI_{Re} < 0, \quad (53)$$

onde φ é o ângulo entre a tensão V e a corrente I , ou seja, do fator de potência. A potência reativa é dada por:

$$Q = VI \sin\varphi = VI_{Im} > 0. \quad (54)$$

A partir da análise da geração sem o auxílio de um banco de capacitores notou-se que a RCC necessária para geração com tensão regulada é alta. Por este motivo verifica-se a seguir a influência da inserção de um banco de capacitores.

Para o estudo do gerador conectado diretamente à rede, sem carga local, partiu-se da consideração da utilização do banco de capacitores suprindo 75% da potência reativa nominal. Com essa consideração o efeito do uso do capacitor para diferentes RCC é mostrado na Figura 38.

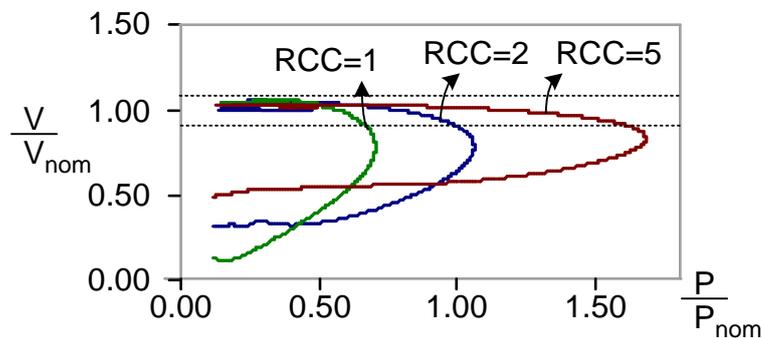


Figura 38 - curvas características da tensão x potência gerada

A Figura 38, comparada à Figura 36 (b), mostra claramente o efeito da inserção do banco de capacitores na tensão gerada. Com a ligação do banco de capacitores a tensão é incrementada e nota-se que a relação de curto circuito é reduzida atendendo a mesma faixa de potência apresentada na Figura 36.

O limite da queda de tensão aceitável é mostrado em linha tracejada. A partir desta figura pode-se determinar a queda de tensão para a potência gerada (para determinado Z_{rede} (dependente da RCC)).

A partir do ponto de colapso de tensão o sistema não consegue voltar a condição estável de geração. Assim, para esse sistema de geração de cerca de $100kW$, a rede que este gerador pode ser conectado deve ter $RCC > 2$. Isso porque tem-se que garantir a geração para todas as faixas de potência (até $1 p.u.$).

Pela análise da Figura 38 nota-se que com a utilização do capacitor precisa-se de uma RCC muito inferior da verificada na Figura 36. O capacitor foi calculado para uma suprir 75% da potência nominal, porém, no caso da RCC em um ponto ser conhecida pode-se otimizar o projeto deste banco de capacitores via análise gráfica.

Para o caso da $RCC = 5$, variou-se o tamanho do capacitor em relação ao capacitor nominal, definido em (36).

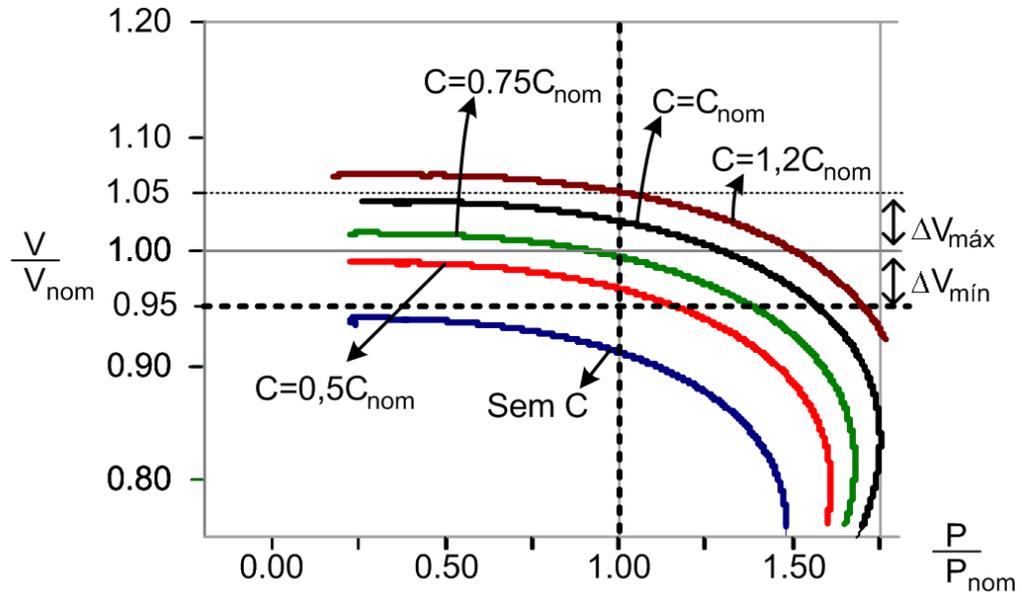


Figura 39 – Curvas características da tensão x potência gerada para diferentes capacitores

A partir da Figura 39 pode-se notar a interferência do banco de capacitores de diferentes valores de capacitâncias. Para o projeto do banco de capacitores pode-se utilizar um critério onde se estabelece uma faixa de tensão aceitável ΔV .

A Figura 39 responde por si própria, mostrando todas as faixas de C , variando do caso onde não se tem capacitor até o caso de um capacitor com $C = 1,2C_{nom}$. Assim, cabe ao projetista estipular qual capacitor utilizar.

Fica claro também que o ideal seria a utilização de um dispositivo que regulasse o valor desta compensação. Este efeito poderia ser feito utilizando o dispositivo conhecido como *STATCOM* ou *SVC*. Porém, com o propósito de redução de custo, a utilização de um capacitor fixo, em uma rede conhecida, poderia atender a faixa de tensão aceitável (0,95 p.u. até 1,05 p.u.).

Capítulo 4

Conclusão

A partir do que foi mostrado neste trabalho, apresenta-se, neste capítulo, a conclusão das análises mais importantes desenvolvidas.

Como abordado no Capítulo 1, as fontes alternativas de energia estão sendo desenvolvidas, atualmente, para suprir parte da demanda de energia elétrica. Através do que foi mostrado, os problemas de geração dessas fontes servem como fontes de pesquisa e está sendo cada vez mais explorado.

Devido a fatores econômicos, políticos e ambientais há uma grande pressão para o desenvolvimento de novas tecnologias para a exploração dessas fontes e isso acarreta um aumento nos investimentos em pesquisa nessa área.

Dentre as fontes alternativas mais conhecidas como a eólica, solar, biomassa, PCH's (pequenas centrais hidroelétricas), entre outras, as fontes de energia proveniente do mar vem sendo muito exploradas dada a grande parcela de mares e oceanos do planeta.

Existem diversas formas de exploração de energia do mar, podendo ser através das marés, correnteza ou através de conversores de energia das ondas instalados *shoreline* (costeiros), *near-shore* (próximos a costa) ou *off-shore* (afastado da costa). Estes são melhores apresentados em [3]. O sistema estudado neste trabalho pode ser instalado em qualquer um dos locais citados.

A energia proveniente das ondas do mar, assim como outras fontes alternativas, são fontes variáveis, ou seja, podem ficar alguns períodos com produção abundante e períodos com baixa produção. Com isso, o uso de um dispositivo de armazenamento de energia se faz necessário, filtrando as oscilações de energia devido a intermitências das ondas.

A partir da modelagem desenvolvida no Capítulo 2, foi possível determinar o comportamento do sistema hidráulico (acumulador hidropneumático), mecânico (turbina Pelton), e elétrico (gerador de indução).

Cabe ressaltar que possíveis erros em relação as grandezas reais podem existir devido o sistema ser modelado idealmente, desconsiderando as perdas existentes em cada parte do sistema. Assim, análise da eficiência não pode ser realizada.

Assim, no Capítulo 3, obteve-se as simulações de todo o sistema podendo-se fazer as seguintes observações:

- Sistema hidráulico – Para o estudo deste trabalho, o sistema hidráulico, que é composto pela bomba hidráulica e acumulador hidropneumático, teve função de filtrar os pulsos de água, injetados pelo pistão no acumulador. A pressão e volume impostos na câmara hiperbárica interferiram diretamente na velocidade do jato de água na saída do acumulador.

O comportamento do sistema hidráulico para alguns volumes de câmaras e para diferentes pressões foram analisados. Notou-se assim que, para um maior volume de câmara tem-se uma menor flutuação do jato de água e que, para maiores pressões se obtêm maiores velocidades médias do jato de água.

- Sistema elétrico – O comportamento da geração é diretamente relacionado com o torque aplicado na turbina Pelton. Como esse torque depende da velocidade do jato de água pode-se concluir que o dimensionamento da parte hidráulica interfere na geração.

Assim, pôde-se ver o efeito da parte hidráulica na geração, verificando que, para uma rede forte, o incremento da pressão implica em uma maior potência média gerada. Notou-se também que o volume da câmara afeta a flutuação dos parâmetros da geração.

O efeito da rede elétrica ao qual o gerador é conectado foi analisado de forma a definir as faixas de tensão apropriadas para a geração. Assim, mostrando que o gerador de indução rotor gaiola de esquilo sem controle, pode ser uma opção de baixo custo para certas condições.

O trabalho mostrou o comportamento do sistema de geração a partir das ondas do mar para algumas condições de operação, onde alguns parâmetros do sistema hidráulico e do sistema elétrico foram modificados analisando seus efeitos na geração.

Dependendo da aplicação desejada, por exemplo, a geração com uma maior qualidade na tensão, este sistema pode não atender a este requisito. Para esta aplicação, pode-se utilizar um *STATCOM*. E se o desejo fosse retirar a máxima potência das ondas, com maior qualidade, seria necessário a utilização de conversores ligados em *back-to-back*, tendo como desvantagem o maior custo [9].

Referências

- [1] http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Vantagens_da_Fusao.htm - Adaptado, 4/10/2011, 18:56.
- [2] P. B. G. Rosa, “Controle e Otimização de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, PEE, COPPE – UFRJ, 2008.
- [3] T. M. Monteiro; “ANÁLISE DE GERADOR DE INDUÇÃO PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DAS ONDAS DO MAR”, Projeto Final de Curso, DEE-UFRJ, 2009.
- [4] Quintela, A - *Hidráulica*, Fundação Gulbenkian, Lisboa 2005.
- [5] C. P. Livij; Fundamentos de Fenômenos de Transporte, LTC, 2004.
- [6] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr., S. D. Umans; Máquinas Elétricas, McGraw-Hill, 6ª Edição.
- [7] Stephen J. Chapman; Electric Machinery Fundamentals, McGraw-Hill, 1999, 3ª Edição.
- [8] William E. Boyce, Richard C. DiPrima; Elementary differential equations and boundary value problems, 8ª Edição..
- [9] J. C. C. Ferreira, L. G. B. Rolim; “Aplicação do Controle Vetorial e Teoria PQ no Controle de Aerogeradores Conectados à Rede Elétrica”; Dissertação de Mestrado, PEE, COPPE – UFRJ, Abril-2005.
- [10] F. A. Bozzi, I. R. Machado, E. H. Watanabe; “Wave Energy Conversion System Using Asynchronous Generators – A Comparative Study”, COBEP 2011, Natal, 2011.
- [11] F. A. Bozzi, I. R. Machado, E. H. Watanabe; “Análises dos Sistemas de Armazenamento de Energia na Geração de Energia a partir das Ondas”, XXI SNPTEE, Florianópolis, Out/2011.
- [12] A. Muetze, J. G. Vining; “Ocean Wave Energy Conversion – A Survey”; Electrical and Computer Engineering Department University of Wisconsin-Madison, WI 53706, USA.
- [13] P. T. T. Esperança, C. H. P. Clemente; “Simulação Numérica do Comportamento de Aparato para Extração de Energia das Ondas”, COPPE-UFRJ; SOBENA.
- [14] R. Resnick, D. Halliday; Fundamentos de Física, vol. 2, 8ª Edição