



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

**Sistema de Aproveitamento Hidroelétrico: Válvulas
Hidráulicas, Gerador Síncrono e Regulador de Velocidade**

Daniel Duarte de Almeida

(Licenciado)

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Electromecânica

Orientador: Doutor João Paulo da Silva Catalão

Junho 2009

Sistema de Aproveitamento Hidroeléctrico: Válvulas Hidráulicas, Gerador Síncrono e Regulação de Velocidade

Daniel Almeida

Junho de 2009

Dissertação realizada sob orientação de
Professor Doutor Eng.^o João Paulo da Silva Catalão

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electromecânica da
UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

*Dedico este trabalho aos meus Pais e Irmão
que ao longo da Vida sempre me deram o
seu incondicional apoio. A todos aqueles
que de forma tão dedicada contribuíram
para a minha formação.*

Resumo

O presente trabalho insere-se no projecto de um dispositivo de aproveitamento energético integrado em válvulas redutoras de pressão que está a ser desenvolvido pela empresa Valcon. Tendo em conta a fase inicial em que o projecto se encontra, o principal objectivo deste trabalho consiste em fazer uma abordagem global do ponto de vista eléctrico.

Numa primeira fase, é realizado um ensaio experimental para a pressão de 1bar, a fim de determinar a potência mecânica disponível no eixo da turbina do dispositivo. Recorrendo à análise dimensional e com base nos resultados obtidos no ensaio, determina-se a característica correspondente à pressão de 3bar. Note-se que as pressões descritas são reduções de pressão típicas em condutas de redes de distribuição.

Um dos objectivos deste trabalho, consiste em analisar detalhadamente a utilização do gerador síncrono no dispositivo desenvolvido em três situações distintas: operação do gerador isoladamente, em paralelo com uma rede infinitamente forte, e em paralelo com outro gerador semelhante. Para esta família de geradores, é ainda analisado o principio de funcionamento dos mecanismos de governo utilizados para regular os parâmetros do sistema, ou seja, velocidade e tensão.

Um dos pontos de interesse do projecto consiste na análise do sistema desenvolvido pela Valcon para fazer a regulação da velocidade de rotação do conjunto. Este sistema, é economicamente mais viável quando comparado com os mecanismos de regulação de velocidade existentes que são mais complexos, no entanto apresenta algumas diferenças que podem ser favoráveis ou desfavoráveis, em função do sistema em que o dispositivo de conversão de energia é integrado. Para fazer esta análise é necessário considerar o modo como o regulador de velocidade actua sobre a turbina.

Palavras-chave

Válvula redutora de pressão, Válvulas hidráulicas de controlo, Gerador síncrono, Mecanismos de governo, Regulador de velocidade.

Abstract

This work is included in a project of an integrated energy recovery device in pressure reducing valves that is being developed by Valcon. According to the initial phase of the project the main objective of this work is to make an overall view of the electrical system.

At first place it was done an experiment to determine the mechanical power available at the turbine shaft of the device with 1bar of pressure. Using the dimensional analysis and based on results obtained in testing, it is determined the corresponding characteristic at 3bar. Note that the pressures described above are typical pressure reductions in pipelines for distribution networks.

One objective of this work consists in examining minutely the use of synchronous generator in the device developed in three different situations: the generator operating alone, the generator operating in parallel with a network infinitely bus, and the generator operating in parallel with another similar device. To this family of generators, it is still considered the principle of operation of the government mechanisms used to adjust the parameters of the system, this is speed and voltage regulation.

One of the important points of the project is the analysis of the system developed by Valcon to make the regulation of rotation speed of the set. This system is economically viable when compared with the tipical speed regulator that is more complex. However the set presents some differences that may be favorable or unfavorable, depending on the extent where the energy conversion device is integrated. To do this analysis is necessary to consider how the speed regulator acts on the turbine.

Keywords

Pressure reducing valves, Hydraulic control valves, Synchronous generator, Mechanisms of government, Speed regulator.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de expressar o meu profundo agradecimento ao Senhor Armando Mouta, fundador da empresa Valcon e criador da gama de Válvulas Hidráulicas de Controlo FLUCON, pessoa responsável pelo dispositivo que está na base da dissertação. O seu engenho notável, a sua capacidade criativa e a sua vasta experiência na área da hidráulica, são para mim uma inspiração na prática da engenharia.

Ao Professor Doutor João Paulo da Silva Catalão, Professor Auxiliar no Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior, principal responsável como orientador científico, desejo expressar o meu agradecimento pelo seu incondicional apoio e orientação.

Expresso o meu agradecimento à Professora Doutora Cristina Fael do Departamento de Engenharia Civil, pessoa responsável pelo Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior. Agradeço-lhe a cedência do laboratório descrito, assim como a confiança e a disponibilidade demonstradas. O ensaio realizado não seria possível sem a indispensável ajuda do colega de curso e amigo João Cantador e do Senhor Jorge, funcionário do laboratório, aos quais expresse o meu agradecimento.

Agradeço o companheirismo e a amizade a todos os funcionários da Valcon, em especial ao Engenheiro David pelo interesse demonstrado, ao Engenheiro Eduardo pela sua flexibilidade na utilização do banco de ensaios da empresa, ao Senhor Rui, pessoa responsável pelo ensaio das válvulas comercializadas, agradeço a sua ajuda na instalação do dispositivo laboratorial e ao amigo Cristovam pela maquinação de componentes necessários à realização do ensaio.

Aos Professores Doutores da Universidade da Beira Interior do Departamento de Electromecânica, José Carlos Páscoa Marques, Hélder Joaquim Dinis Correia e Davide Sérgio Baptista da Fonseca, agradeço os valiosos conselhos e ensinamentos.

Agradeço ainda aos pais e irmão o apoio demonstrado e por sempre acreditarem nas minhas capacidades.

A todos aqueles que contribuíram directa ou indirectamente para a elaboração desta dissertação desejo ainda expressar o meu agradecimento.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objectivos	1
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	Válvulas Hidráulicas	3
2.1	Tipos de Válvulas Hidráulicas	3
2.1.1	Constituição da Válvula de Globo Actuada por Diafragma	5
2.2	Válvulas Redutoras de Pressão	6
2.2.1	Princípio de Funcionamento das Válvulas Redutoras de Pressão Proporcional	7
2.2.2	Sistema Piloto das Válvulas Redutoras de Pressão Diferencial	8
2.3	Dispositivo de Conversão de Energia Desenvolvido pela <i>Valcon</i>	10
3	Grandezas Características do Funcionamento das Turbinas	13
3.1	Curvas Características	13
3.1.1	Variação do Rendimento em Função da Velocidade de Rotação	14
3.2	Análise Dimensional	16
3.2.1	Máquinas Hidráulicas, Parâmetros Adimensionais	16
3.2.1.1	Funcionamento da Mesma Turbina Sob Quedas Diferentes	18
4	Máquinas Eléctricas	20
4.1	Acção Motora e Geradora	20
4.2	Máquina de Corrente Contínua CC	22
4.3	Máquina Síncrona CA	23
4.4	Máquina Assíncrona CA	24
4.5	Curvas Características e Ponto de Funcionamento	25
4.5.1	Curva Característica de Motores Eléctricos	26
4.5.2	Curva Característica de Cargas Mecânicas	29
4.6	Escolha do Gerador	30
5	Gerador Síncrono	31
5.1	Circuito Equivalente	31
5.1.1	Relação Entre a f.e.m. Gerada e a Tensão nos Terminais para Vários Factores de Potência da Carga	32
5.1.2	Circuito Equivalente Trifásico	34
5.2	Características de Funcionamento	37

Conteúdo

5.2.1	Método da Reactância Síncrona, Ensaio em Vazio e em Curto-circuito	37
5.2.2	Funcionamento em Carga	39
5.3	Potência Activa e Reactiva	40
6	Controlo do Gerador Síncrono	43
6.1	Operação do Gerador Síncrono Isoladamente	44
6.2	Operação do Gerador Síncrono em Paralelo	45
6.2.1	Analogia Mecânica	46
6.2.2	Controlo da Frequência-Potência Activa e Tensão-Potência Reactiva	47
6.2.3	Operação em Paralelo com Rede Infinitamente Forte	49
6.2.4	Operação em Paralelo com Gerador Semelhante	52
6.2.5	Mecanismos de Governo: Princípios de Funcionamento	53
7	Ensaio Experimental do Sistema de Aproveitamento Hídrico	56
7.1	Instalação Experimental	56
7.1.1	<i>Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior</i>	57
7.1.2	Laboratório da <i>Valcon</i>	58
7.2	Procedimento Experimental	59
7.2.1	<i>Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior</i>	59
7.2.2	Laboratório da <i>Valcon</i>	61
7.3	Descrição do Ensaio Experimental	63
7.3.1	<i>Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior</i>	63
7.3.1.1	Conclusão	65
7.3.2	Laboratório da <i>Valcon</i>	66
7.3.2.1	Resultados Obtidos	67
7.3.2.2	Análise de Resultados	67
7.3.2.3	Conclusão	73
8	Curvas Características para Altura Manométrica de 3,00bar	75
9	Regulação de Velocidade	78
9.1	Operação do Gerador Isoladamente	78
9.2	Operação do Gerador em Paralelo com Rede Infinitamente Forte	79
9.3	Operação em Paralelo entre Geradores Semelhantes	80
9.3.1	Regulador de Velocidade da <i>Valcon</i>	82
9.4	Regulação de Tensão	85
10	Escolha do Gerador, Controlo de Parâmetros	86
10.1	Resultados Obtidos Laboratorialmente	86
10.2	Controlo de Parâmetros	87
10.2.1	Geradores Síncronos <i>ST</i> e <i>STC Series</i>	88
11	Conclusão	92

Lista de Figuras

2.1	Configurações de válvulas existentes: cunha elástica, globo, esfera e borboleta.[1]	4
2.2	Constituição da válvula globo <i>FLUCON 200</i> : a) tampa, b) diafragma, c) sede, d) haste, e) corpo da válvula, f) cone de regulação, g) obturador, h) caixa do obturador, i) batente do diafragma, j) mola, k) guia da haste.[2]	6
2.3	Válvula redutora de pressão proporcional.	8
2.4	Válvula redutora de pressão diferencial.	9
2.5	Válvula redutora da pressão fechada quando $p_1 = p_3$.	10
2.6	Representação esquemática do dispositivo desenvolvido pela <i>Valcon</i> para aproveitar parte da energia dissipada nas válvulas redutoras de pressão. Sistema de pilotagem de regulação de velocidade.[2]	12
3.1	Variação do rendimento em função da velocidade de rotação do eixo da turbina.[4]	15
3.2	Curvas de rendimento para diferentes caudais e altura manométrica fixa.[4]	15
3.3	Turbina Hidráulica contida num volume de controlo.[5]	17
3.4	Representação gráfica dos parâmetros adimensionais: coeficiente de caudal, de altura e de potência.[5]	18
4.1	Acção motora: consiste no aparecimento de uma força que resultada da corrente que atravessa um condutor exposto á acção de um campo magnético, a). Acção geradora: consiste no aparecimento de uma f.e.m. devido à acção do campo magnético e do movimento imposto, b). [7]	21
4.2	Na acção motora em a), a tensão aplicada V_a , é superior à força contra-electromotriz desenvolvida, E_c . Na acção geradora em b), a f.e.m. gerada, E_g , é superior á queda de tensão nos terminais da carga, V_a . [7]	21
4.3	Máquina de corrente contínua e respectivas ligações de excitação em derivação ou em série.[7]	23
4.4	Máquina síncrona de campo rotativo e armadura fixa. A máquina caracteriza-se pela utilização de anéis colectores.[7]	24
4.5	Máquina assíncrona com rotor em curto-circuito alimentada por uma fonte CA.[7]	25
4.6	O gráfico a) representa um ponto de funcionamento estável, deslocando o ponto P para n_1 ou n_2 , este tende a regressar á sua posição inicial. O gráfico b) representa um ponto de funcionamento instável, deslocando o ponto P para n_1 ou n_2 , o sistema pára ou embala.	27
4.7	Curvas características, momento (conjugado) versus rotação, de motores assíncronos de rotor bobinado para diferentes valores de resistência externa.[11]	28

Lista de Figuras

4.8	Configuração das curvas características, momento (conjugado) versus rotação, para diversas famílias de motores eléctricos.[11]	28
4.9	Configuração das curvas características em função da carga.	29
5.1	Circuito equivalente de um gerador síncrono monofásico. A tensão medida nos terminais, V_a , é função da f.e.m gerada E_g , e das quedas de tensão devidas à reacção do induzido $jX_{ar}I_a$, à reactância induzida jX_aI_a e à resistência interna R_aI_a . [14]	32
5.2	Diagramas fasoriais que representam a relação entre a f.e.m. gerada, E_g e a tensão medida nos terminais da máquina, V_a , para os três tipos de cargas: a) com factor de potência unitário, b) indutivas e c) capacitivas.[7]	33
5.3	Circuito equivalente do gerador síncrono trifásico, constituído pelas três fases. Representação do circuito de excitação do indutor (rotor), alimentado por uma tensão de V_{exc} . [15]	35
5.4	Circuito equivalente do gerador síncrono trifásico, a) ligação em estrela e b) ligação em triângulo. [15]	36
5.5	A característica em vazio determina em função da corrente de excitação I_{exc} , a f.e.m. E_g , igual á tensão nos terminais, V_a . A característica de curto-circuito, determina em função de I_{exc} a corrente do induzido I_a . A reactância síncrona X_s , é função dos parâmetros anteriores. [15]	38
5.6	F.e.m. necessária para manter a tensão nos terminais ($V_a = 2660V$), a uma dada corrente no induzido ($I_a = 125A$), para vários factores de potência. [7]	40
5.7	Circuito equivalente simplificado por fase. Despreza-se a resistência do induzido, R_a . [14]	41
5.8	Diagrama fasorial simplificado para uma carga indutiva. Representação do ângulo de potência, obtido entre a tensão V_a e a f.e.m. gerada E_g . [15]	41
6.1	Representação genérica de um gerador síncrono por um sistema de duas entradas e quatro saídas.	43
6.2	O aumento da carga aplicada ao gerador com factor de potência constante, varia a tensão nos terminais. a) factor de potência em atraso, b) unitário e c) em avanço. [15]	45
6.3	Analogia mecânica, representação de vários mecanismos interligados a uma caixa de engrenagens. [18]	46
6.4	Controlo da frequência-potência activa feito através de um regulador de velocidade, que permite um pequeno decréscimo da frequência em função do aumento de P . O controlo da tensão-potência reactiva, feito através de um regulador de tensão, permite um pequeno decréscimo de V_a em função de Q . [17]	48
6.5	Gerador síncrono ligado em paralelo com uma rede infinitamente forte, a alimentar uma carga.	49

Lista de Figuras

6.6	Através do ajuste do <i>set point</i> do regulador de velocidade regula-se f , controlando a potência fornecida pelo gerador P_{ger} . Sendo a potência consumida pela carga P_{carga} constante, a potência que não é fornecida pelo gerador, é assegurada pela rede infinitamente forte P_{rede} . [15]	50
6.7	Diagrama fasorial que ilustra, através de fasores, o aumento da potência activa gerada P_{ger} . [15]	51
6.8	Diagrama fasorial que ilustra, através de fasores, a variação de potência reactiva Q , mantendo a potência P fixa. [15]	51
6.9	Esquema de dois geradores síncronos semelhantes, ligados em paralelo, a alimentar uma carga.	52
6.10	Aumentando o <i>set point</i> do regulador de velocidade do gerador 2, aumenta a potência fornecida por este gerador, P_{ger2} e diminui a potência fornecida pelo gerador 1, P_{ger1} . [15]	53
6.11	Representação esquemática de um sistema de regulação de velocidade de um gerador isolado que alimenta uma carga. [17]	54
6.12	Regulador de velocidade desenvolvido por <i>Watt</i> para a máquina a vapor. [17] 55	
6.13	Representação esquemática de um sistema de regulação de tensão de um gerador síncrono. [17]	55
7.1	Representação esquemática da instalação experimental do <i>Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior</i>	57
7.2	Representação esquemática da instalação experimental do laboratório da <i>Valcon</i>	58
7.3	Pormenor da unidade experimental.	59
7.4	O gráfico representa esquematicamente as curvas características da instalação e da bomba.	65
7.5	Curvas características para as pressões de 0.95, 1.00 e 1.05bar, para níveis de admissão máximos.	70
7.6	Potência mecânica obtida no eixo da turbina em função da velocidade de rotação. Verifica-se que a potência é máxima para velocidades de rotação entre 1500 e 2000rpm aproximadamente.	71
7.7	Rendimento em função da velocidade de rotação do eixo da turbina, obtido para as diferentes condições de escoamento.	72
8.1	Curva característica para a pressão de 3bar.	76
8.2	Potência mecânica obtida no eixo da turbina em função da velocidade de rotação. Verifica-se que a potência máxima, para uma velocidade de rotação entre 2500 e 3000rpm, é de 5000W.	77
9.1	Quando o gerador alimenta uma carga isolada, P e Q são impostos pela carga, as entradas I_{exc} e M_{mec} controlam as saídas V_a e f , respectivamente.	78
9.2	Comparação entre o regulador de velocidade tipo a) e o regulador <i>Valcon</i> b).	79

Lista de Figuras

9.3	Quando o gerador é ligado em paralelo a uma rede infinitamente forte, V_a e f são impostos pela rede, as entradas I_{exc} e M_{mec} controlam as saídas Q e P , respectivamente.	80
9.4	Quando dois geradores semelhantes são ligados em paralelo, P_{total} e Q_{total} são impostos pela carga, as entradas I_{exc1} e I_{exc2} controlam a saída V_a , as entradas M_{mec1} e M_{mec2} controlam a saída f	81
9.5	Representação esquemática de duas válvulas redutoras <i>FLUCON 200</i> com turbina integrada, que constituem as máquinas primárias <i>MP1</i> e <i>MP2</i> ligadas aos geradores 1 e 2, conectados a uma carga comum. Os reguladores de velocidade são designados pelas siglas <i>RV1</i> e <i>RV2</i>	82
9.6	Potência activa fornecida por cada gerador à carga, P_{ger1} e P_{ger2} , depois de sincronizar o gerador 2 ao gerador 1.	83
9.7	a) O gerador 2 abre totalmente e o gerador 1 fecha parcialmente, velocidade final $1500rpm$. b) o gerador 1 fecha totalmente e o gerador 2 abre parcialmente, velocidade final $1600rpm$	84
9.8	Características frequência-potência activa quando o gerador 2 abre totalmente e o gerador 1 fecha totalmente. A velocidade final é um valor entre 1500 e $1600rpm$	84
10.1	Esquema eléctrico dos geradores <i>ST Series</i> com auto-excitação.[20]	89
11.1	Caudal médio total para a pressão de $0.95bar$, tendo em conta a proximidade de valores dos caudais médios.	98
11.2	Caudal médio total para a pressão de $1.00bar$, tendo em conta a proximidade de valores dos caudais médios.	98
11.3	Caudal médio total para a pressão de $1.005bar$, tendo em conta a proximidade de valores dos caudais médios.	98

Lista de Tabelas

2.1	Características correspondentes aos tipos de válvulas de cunha elástica, globo, esfera e borboleta.	5
7.1	Valores para a pressão de $0.95bar$ e abertura de 100%.	68
7.2	Valores para a pressão de $1.00bar$ e abertura de 100%.	68
7.3	Valores para a pressão de $1.05bar$ e abertura de 100%.	69
7.4	Valores de n e M máximos para diferentes níveis de admissão.	69
7.5	Potência mecânica em função dos momentos e velocidades de rotação obtidas experimentalmente.	71
8.1	Análise dimensional, com base nos resultados obtidos experimentalmente para a altura de $1,05bar$, permitindo determinar as grandezas correspondentes para uma altura manométrica de $3,00bar$	76
10.1	Geradores síncronos monofásicos de rotor bobinado <i>ST Series</i> . [20]	89
10.2	Geradores síncronos trifásicos de rotor bobinado <i>ST Series</i> . [21]	90
11.1	Caudais obtidos experimentalmente; determinação dos caudais médios.	97

Lista de Símbolos

F	Força
p	Pressão
a	Área da superfície de fecho
A	Área do diafragma
R	Razão de redução
Q	Caudal
H	Altura manométrica
M	Momento ou binário
M_{motor}	Binário motor
M_{carga}	Binário da carga
M_{res}	Binário resistente
P	Potência
P_{mec}	Potência mecânica
ω	Velocidade angular
η	Rendimento
n	Velocidade de rotação
$n_{nominal}$	Velocidade de rotação nominal
n_s	Velocidade síncrona
f	Frequência
f_v	Frequência em vazio
ρ	Densidade
μ	Viscosidade
D	Diâmetro

Re	Número de <i>Reynolds</i>
\bar{P}	Coefficiente de potência
ϕ	Coefficiente de caudal
ψ	Coefficiente de altura
V	Velocidade periférica
p_p	Número de pares de pólos
s	Deslizamento
V_a	Tensão aos terminais da máquina
E_g	Força electromotriz gerada pelo movimento relativo e pelo campo magnético
E_{ar}	Força electromotriz gerada pela corrente e pelo campo magnético
E_c	Força contra-electromotriz
I_a	Corrente no induzido
R_{exc}	Resistência do circuito de excitação
X_{exc}	Reactância do circuito de excitação
R_{aj}	Resistência de ajuste
I_{exc}	Corrente no circuito de excitação
V_C	Tensão composta
I_L	Corrente na linha
$R\%$	Regulação de tensão
X_a	Reactância indutiva
X_{ar}	Reacção do induzido
X_s	Reactância síncrona
$\cos\theta$	Factor de potência
P_{rede}	Potência activa da rede
P_{total}	Potência activa total
P_{carga}	Potência activa da carga
P_{ger}	Potência activa gerada

S	Potência aparente
Q	Potência reactiva
Q_{total}	Potência reactiva total
Q_{carga}	Potência reactiva da carga
Q_{ger}	Potência reactiva gerada
δ	Ângulo de potência
P_{mx}	Potência activa máxima

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A *Valcon* é uma empresa nacional que produz e comercializa uma gama própria de válvulas hidráulicas de controlo, utilizadas em condutas para fazer regulação de fluido. As diversas válvulas permitem fazer regulação de pressão, caudal, controlo de nível de reservatórios, sustentação entre outros.

Em 2008 a empresa iniciou o projecto de um dispositivo hidráulico que permite fazer o aproveitamento energético de uma parcela da energia dissipada nas válvulas reductoras de pressão. Note-se que, o processo implícito na redução de pressão, é a dissipação de energia na estrutura da válvula através de perdas de carga.

Esta dissertação surge no âmbito do projecto desenvolvido pela empresa. Tendo como ponto de partida o dispositivo hidráulico desenvolvido pela *Valcon*, procura-se efectuar uma abordagem do ponto de vista eléctrico nos mais variados aspectos. Caracterizando as potencialidades do dispositivo ao nível da energia produtível, assim como apresentar soluções ao nível do conversor electromecânico a utilizar.

1.2 Objectivos

Numa primeira fase, o presente trabalho tem por objectivo analisar o funcionamento do dispositivo desenvolvido pela *Valcon*, identificando as suas potencialidades. Após esta análise, é realizado o ensaio experimental necessário à determinação das curvas características e curvas da potência mecânica disponível no eixo da turbina em função da velocidade de rotação para alturas manométricas típicas. Com base na informação obtida laboratorialmente, pretende-se apresentar soluções ao nível do conversor eléctricomecânico a utilizar.

Tendo em consideração a abordagem do ponto de vista electromecânico que se pretende efectuar, é analisada a integração do dispositivo em três situações distintas: operação do gerador isoladamente, em paralelo com uma rede infinitamente forte e em paralelo com outro gerador semelhante. São ainda analisados os mecanismos de governo associados à regulação de velocidade e tensão do dispositivo.

De modo particular, é analisado um sistema de regulação de velocidade desenvolvido pela *Valcon*, que permite manter o valor da grandeza constante, através do controlo da abertura/fecho da válvula.

Genericamente, considerando a fase inicial em que o projecto da *Valcon* se encontra, não se pretende no âmbito desta dissertação apresentar uma solução final, mas sim definir quais as potencialidades do dispositivo, qual a sua aplicabilidade, vantagens e

desvantagens associadas a cada situação e apresentar possíveis soluções.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente documento encontra-se dividido em 11 capítulos, com correspondentes sub-capítulos.

No capítulo 2 efectua-se uma descrição genérica dos tipos de válvulas hidráulicas mais utilizadas, com especial enfoque na válvula de globo actuada por diafragma, modelo que constitui as válvulas redutoras de pressão da *Valcon*. É ainda descrito o princípio de funcionamento das válvulas, assim como o do sistema piloto que as constitui.

O capítulo 3 refere conceitos teóricos da mecânica dos fluidos, necessários á obtenção de resultados com base no ensaio experimental. São descritas as grandezas características do funcionamento das turbinas, os ensaios possíveis e ainda conceitos relacionados com a análise dimensional.

O capítulo 4 descreve conceitos relacionados com a acção motora e geradora, assim como as várias famílias de máquinas eléctricas existentes. É ainda introduzido o conceito de estabilidade do ponto de funcionamento.

No capítulo 5 é feita a descrição de conceitos relacionados com o gerador síncrono: circuito equivalente monofásico e trifásico, características de funcionamento em vazio, em curto-circuito e em carga, potência activa e reactiva.

No capítulo 6 são focados os aspectos relacionados com o controlo do gerador síncrono quando este opera isoladamente, em paralelo com uma rede infinitamente forte, ou em paralelo com um gerador semelhante. São ainda descritos aspectos relacionados com o controlo da frequência-potência activa, tensão-potência reactiva e princípios de funcionamento dos mecanismos de governo existentes.

No capítulo 7 é descrito o ensaio laboratorial realizado ao sistema de aproveitamento hídrico no *Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior* e no laboratório da *Valcon*. A descrição consiste na instalação experimental, procedimento experimental, descrição do ensaio, apresentação e análise de resultados e conclusão.

No capítulo 8, considerando os conceitos teóricos descritos no capítulo 3, é efectuada a análise dimensional de modo a obter, com base nos resultados experimentais obtidos para a altura manométrica de $1bar$, as curvas características para a altura manométrica de $3bar$.

No capítulo 9 pretende-se analisar a regulação de velocidade proposta pela *Valcon* do ponto de vista da estabilidade do sistema. São especificadas três situações distintas: operação do gerador síncrono isoladamente, em paralelo com uma rede infinitamente forte e em paralelo com um gerador semelhante.

No capítulo 10, tendo em consideração os resultados obtidos nos capítulos 7 e 8, são apresentadas algumas soluções possíveis na escolha do gerador síncrono a implementar o sistema. São ainda descritas considerações que é necessário fazer para definir a escolha do controlo de parâmetros mais adequada.

No capítulo 11 são tiradas conclusões finais acerca do trabalho.

2 Válvulas Hidráulicas

A água, sendo um bem indispensável á nossa sobrevivência e bem estar, tem inúmeras aplicações. Esta é utilizada para consumo próprio, sistemas de rega no sector agrícola, na indústria em geral para os mais variados fins, em sistemas de combate a incêndios, geração de energia, piscinas e lagos numa vertente de lazer, entre outros.

Para a água chegar aos pontos de utilização referidos, é necessário fazer o seu transporte através de redes de distribuição. No caso mais comum, que é a utilização da água para consumo próprio, é necessário fazer o transporte desde as barragens até às torneiras das casas. As redes de distribuição são compostas por condutas, responsáveis por fazer o transporte da água, e por válvulas, que permitem o controlo da água que circula nas condutas. Tecnicamente estas válvulas designam-se por válvulas hidráulicas de controlo. As válvulas hidráulicas de controlo, genericamente, consistem num dispositivo mecânico instalado nas condutas que controla a passagem do fluido.

Note-se que embora no texto se considere o fluido água, o que se justifica com a sua vasta aplicabilidade, os conceitos são válidos para qualquer fluido, seja este líquido ou gasoso.

As válvulas hidráulicas de controlo são constituídas por três componentes principais: o corpo e a tampa, que são os elementos fixos e o mecanismo de accionamento, parte móvel que permite a abertura ou fecho da válvula.

Existe uma grande variedade de válvulas que diferem na forma geométrica, no mecanismo que as constitui e no modo como são accionadas. Os principais tipos de válvulas podem ser agrupados de acordo com as suas funções. Deste modo existem as válvulas de isolamento ou seccionamento, caracterizadas por permitirem ou interromperem o escoamento no circuito hidráulico, ou seja, o seu modo de funcionamento é totalmente aberto ou fechado. As válvulas de regulação fazem o controlo do caudal no interior das condutas. As válvulas de protecção, são utilizadas para proteger o sistema hidráulico contra fenómenos indesejáveis, como é o caso do golpe de aríete.

2.1 Tipos de Válvulas Hidráulicas

De entre a grande variedade de configurações de válvulas existentes, as mais utilizadas são as do tipo cunha elástica, globo, esfera e borboleta, figura 2.1.

A válvula de cunha elástica utiliza um sistema de vedação (obturador) perpendicular à linha de fluxo, permitindo que, quando a válvula está totalmente aberta, a obturação à passagem de fluxo seja mínima. A configuração deste tipo de válvula reflecte vantagens ao nível do diferencial de pressão, da turbulência e do ruído que são mínimos. A sua configuração distingue-se das restantes, dado que permite uma passagem de fluxo nos

2 Válvulas Hidráulicas

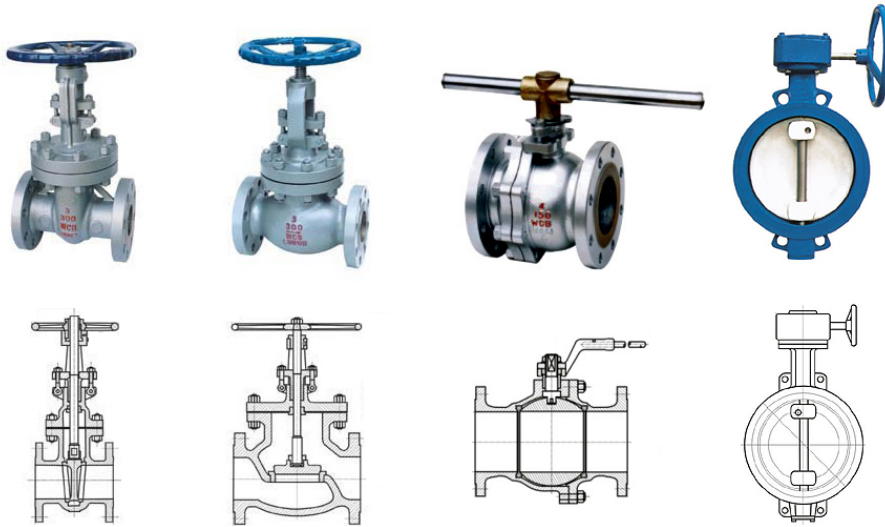


Figura 2.1: Configurações de válvulas existentes: cunha elástica, globo, esfera e borboleta.[1]

dois sentidos. As válvulas de cunha elástica apenas podem ser empregues quando as operações de abertura/fecho são pouco frequentes, estando o obturador numa posição intermédia, o aumento de velocidade do fluido origina elevado desgaste por erosão, nesta situação há vibração e ruído. Pelo mesmo motivo, as válvulas não podem ser utilizadas para fazer estrangulamento ou regulação de fluido. O manuseamento da válvula é lento.

A válvula de globo é caracterizada pela forma globular do corpo. Contrariamente à válvula de cunha elástica, é empregue em situações de abertura/fecho muito frequentes, permitindo a sua aplicação na redução de pressão e controlo de caudal em condutas. Permite a regulação do fluido com desgastes por erosão pequenos no obturador e na sede, tendo em conta a brusca mudança de direcção imposta ao fluido. Estas válvulas podem ser de quatro tipos diferentes: normais, em “Y”, em ângulo e de agulha. De forma a reduzir o impacto causado pela mudança de direcção e conseqüente aumento das perdas de carga, existem as válvulas de globo de configuração em “Y”. Neste caso, a parte móvel da válvula tem uma posição oblíqua relativamente às conexões de montante e jusante do corpo. Nas configuração em ângulo as conexões entre a entrada e a saída estão dispostas com um ângulo de 90° entre si. A válvula de agulha é um caso particular, ao invés das configurações anteriores, a diferença reside no formato afilado da extremidade da haste, elemento de vedação. Permite uma regulação mais precisa, assim é usualmente utilizada em linhas de gases, como ar e vapor de água. A válvula de globo permite acesso aos seus componentes internos, sem necessidade de remover a válvula da linha. O tempo de abertura/fecho é mais rápido relativamente às válvulas de cunha elástica.

A válvula de esfera é caracterizada pela forma esférica do elemento de vedação. Neste caso, para fazer a vedação não é utilizado um conjunto de obturação cónico ou cilíndrico, mas sim uma esfera com um orifício que gira entre dois apoios. A principal vantagem

2 Válvulas Hidráulicas

Características	Tipos de Válvulas			
	Cunha	Globo	Esfera	Borboleta
Utilizada para seccionamento	x	x	x	
Utilizada para regulação		x		x
Para utilização frequente		x	x	x
Abertura total com baixo gradiente de pressão	x		x	
Passagem de fluido nos dois sentidos	x		x	x
Tempo de manuseamento rápido			x	

Tabela 2.1: Características correspondentes aos tipos de válvulas de cunha elástica, globo, esfera e borboleta.

é a rapidez de manuseamento, para abrir ou fechar a válvula é apenas necessário rodar o manípulo um quarto de volta. Os apoios da esfera, normalmente fabricados em teflon garantem boa estanquidade e um accionamento suave, em contrapartida, o tipo de material utilizado limita a gama de temperatura de utilização, assim como a utilização de fluidos que possuam partículas sólidas em suspensão. À semelhança da válvula de cunha elástica, não é recomendada para fazer o estrangulamento ou regulação de fluido, e quando totalmente aberta as perdas de carga são muito reduzidas.

A válvula de borboleta tem um mecanismo que consiste na rotação de uma peça circular, denominada borboleta, em torno de um eixo perpendicular à direcção do escoamento. A válvula borboleta é caracterizada pelo seu peso reduzido, assim, é muitas vezes uma opção para condutas de grandes diâmetros. Tem boa performance como válvula de controlo, no entanto existem restrições na sua aplicação. A válvula, quando completamente fechada, é estanque para baixas pressão, no entanto, o contrário já não se verifica, assim, em algumas situações a válvula não veda perfeitamente o fluido.

A tabela 2.1 permite visualizar e comparar de forma expedita as principais características das válvulas de cunha elástica, globo, esfera e borboleta.

As válvulas apresentadas na figura 2.1 são operadas manualmente, na válvula de globo através de uma alavanca e nos restantes casos através de um volante, normalmente acoplado a um sem-fim ou a um sistema de engrenagens. Existem outras formas de operar as válvulas que não necessitam uma intervenção humana directa, é o caso da operação monitorizada e automática. No primeiro caso, a operação é feita através de sistemas pneumáticos, hidráulicos ou eléctricos, no segundo caso é o próprio fluido que controla a abertura/fecho da válvula através de diferenças de pressão, este sistema utiliza molas e contrapesos.

2.1.1 Constituição da Válvula de Globo Actuada por Diafragma

A válvula de globo actuada por diafragma, apresentada na figura 2.2, é constituída pelo corpo de forma globular, pela tampa e pelo conjunto do diafragma, parte móvel. O conjunto do diafragma, é constituído pela haste que suporta todo o conjunto; obturador, disco macio existente na caixa do obturador; cone de regulação que suporta o obturador;

em paralelo, para que o abastecimento nunca seja interrompido em caso de avaria ou trabalhos de manutenção de uma delas. Quando assim não acontece, em caso de avaria, é conveniente proceder á rápida substituição.

As válvulas redutoras são constituídas pela câmara de montante e jusante, situadas no corpo da válvula, e pela câmara de controlo de pressão, situada na parte superior da mesma. Tendo em conta as características da válvula do tipo globo, esta é a opção mais utilizada para fazer reduções de pressão. As válvulas podem ser controladas por diafragma ou por êmbolo, elementos que fazem a separação entre o corpo da válvula e a câmara de controlo.

As válvulas, tendo em conta a sua aplicação, podem fazer uma redução proporcional ou diferencial. Na primeira situação, há uma proporção fixa de redução entre a pressão a montante e a pressão a jusante, assim, a variação de pressão criada pela válvula é constante. Na segunda situação, a válvula mantém constante a pressão regulada a jusante independentemente das flutuações de pressão a montante e das variações de caudal. As válvulas redutoras de pressão diferenciais, utilizam um sistema de pilotagem, que permite ao utilizador regular a pressão de saída. Tendo em conta as características descritas, a redução diferencial é a mais utilizada.[3]

2.2.1 Princípio de Funcionamento das Válvulas Redutoras de Pressão Proporcional

Como se pode ver na figura 2.3 a válvula proporcional é constituída por uma dupla câmara. A câmara superior, onde o diafragma actua o controlo da válvula (câmara de controlo), e a câmara inferior, onde o obturador e a sede permitem a abertura/fecho da mesma. A parte jusante da câmara inferior com a pressão p_2 está ligada por um canal à câmara de controlo, assim, desprezando as perdas, considera-se p_2 a pressão na câmara de controlo. A pressão a montante p_1 é aplicada na base da superfície de fecho (conjunto obturador), designada pela área “a”. A pressão p_2 é aplicada no topo da superfície de fecho de área “a”, e na superfície do accionador, que neste caso é um diafragma de área “A”.

Quando a água circula na válvula, as forças no eixo da parte móvel estão compensadas, ou seja, as forças de abertura da válvula são iguais ás forças de fecho:

$$F_{abertura} = F_{fecho} \Leftrightarrow F_{1a} = F_{2a} + F_{2A} \quad (2.1)$$

$$p_1 \cdot a = p_2 \cdot a + p_2 \cdot A \Leftrightarrow p_1 = \frac{a + A}{a} p_2 \Leftrightarrow p_2 = \frac{p_1}{R} \text{ com } R = \text{constante} \quad (2.2)$$

Verifica-se que p_2 é o resultado da pressão p_1 dividido pela constante R, designada por razão de redução, que representa a relação entre as áreas. É a relação entre a área do diafragma e a superfície de fecho que define a redução de pressão de montante para jusante.

Na prática ocorrem situações em que a pressão a jusante da válvula excede a proporção pré-definida, por exemplo, devido a interrupção de caudal na conduta a jusante. Nesta situação a válvula fecha instantaneamente, servindo de válvula de retenção. Quando

2 Válvulas Hidráulicas

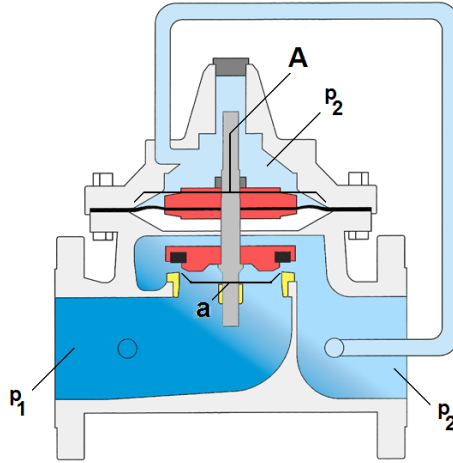


Figura 2.3: Válvula redutora de pressão proporcional.

a válvula está fechada, o conjunto obturador encosta na sede, de forma a bloquear a passagem de fluido. Neste caso, o equilíbrio de forças no eixo não se verifica, dado que, parte da força é suportada pela sede da válvula. No eixo as forças de fecho superam a forças de abertura:

$$F_{abertura} < F_{fecho} \Leftrightarrow p_1 \cdot a < p_2 \cdot a + p_2 \cdot A \quad (2.3)$$

Para fazer esta demonstração considerou-se que a secção do eixo da válvula é desprezável em função da superfície do disco de fecho. O diafragma não é um componente estático, ao variar a pressão na câmara de controlo este desloca-se variando ligeiramente a área, esta variação por ser muito pequena foi desprezada. Considerou-se que a pressão de jusante é igual à pressão na câmara de controlo, desprezando as perdas existentes.

Para as válvulas de êmbolo o raciocínio é o mesmo das válvulas controladas por diafragma, a única diferença, é o facto de o pistão ser um elemento estático, logo não tem a ligeira deformação descrita no caso anterior.

2.2.2 Sistema Piloto das Válvulas Redutoras de Pressão Diferencial

As válvulas redutoras de pressão diferencial e proporcional são muito idênticas. A principal diferença consiste na utilização de um sistema piloto para controlar a pressão no interior da câmara de controlo. Na válvula principal, a diferença prende-se com o facto de esta possibilitar a existência de uma câmara única, em vez da câmara dupla, e a utilização de uma mola, que permite o fecho da válvula na situação de ausência de caudal.

Apesar das diferenças descritas, o principio de funcionamento das válvulas redutoras de pressão proporcional também se aplica para estas válvulas. Em sistema modulante, as forças responsáveis pela abertura da válvula são iguais às forças de fecho (figura 2.4):

$$F_{abertura} = F_{fecho} \Leftrightarrow F_{1a} + F_{2(A-a)} = F_{3A} + F_{mola} \quad (2.4)$$

$$p_1 \cdot a + p_2 \cdot (A - a) = p_3 \cdot A + F_{mola} \quad (2.5)$$

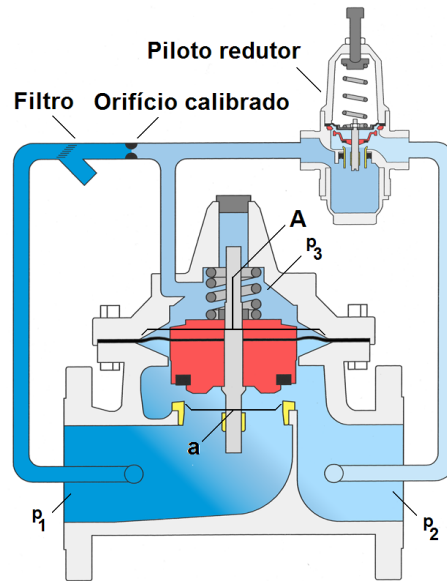


Figura 2.4: Válvula redutora de pressão diferencial.

O sistema piloto é constituído pelo filtro, que retém as partículas sólidas contidas no fluido, um orifício calibrado, responsável por criar perdas no fluido circulante e o piloto redutor, que abre ou fecha em função da pressão a jusante. O sistema piloto é colocado em paralelo com a válvula principal de acordo com a figura 2.4. Existe ainda uma ligação desde a câmara de controlo da válvula, até ao canal que liga o orifício calibrado ao piloto redutor.

No sistema piloto, tal como acontece na válvula principal, o fluido circula de montante para jusante. Assim numa primeira fase são filtradas as partículas sólidas do fluido, de seguida este passa através do orifício calibrado que reduz drasticamente o valor da pressão de p_1 para p_3 . Depois desta fase, o fluido ou circula através do piloto redutor na direcção de jusante, ou circula no canal que dá acesso à câmara de controlo, contribuindo para a sua pressurização. É ainda possível haver circulação desde a câmara de controlo até ao piloto redutor, despressurizando a câmara.

O piloto redutor é uma válvula, de menor dimensão, sensível às oscilações de pressão a jusante. Quando esta pressão tem uma oscilação positiva, aumentando ligeiramente, o piloto redutor fecha ligeiramente, assim, a circulação de fluido dá-se preferencialmente pelo canal da câmara de controlo. Se a oscilação de pressão for negativa, o piloto abre ligeiramente, facilitando a passagem de fluido através dele. Assim, o fluido circula da câmara de controlo para jusante, passando pelo piloto redutor, dá-se a despressurização da câmara.

Quando o piloto redutor permanece fechado, figura 2.5, o fluido no sistema piloto permanece estático. Nesta situação particular, o orifício calibrado não origina perdas, assim, a pressão a montante é transmitida para a câmara de controlo, $p_1 = p_3$. Esta é uma característica importante que garante a perfeita vedação da válvula principal, já

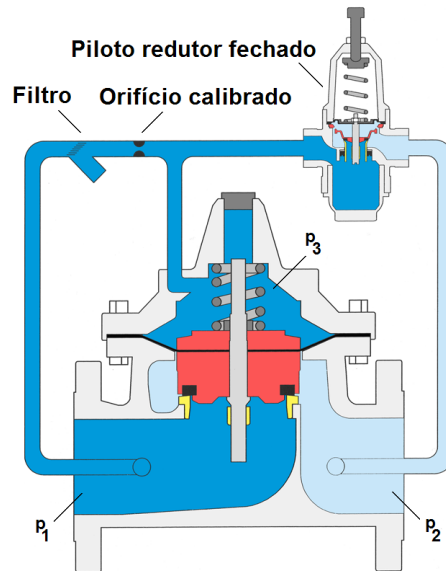


Figura 2.5: Válvula redutora da pressão fechada quando $p_1 = p_3$.

que a pressão na câmara de controlo atinge o valor máximo possível.

O piloto redutor é composto pelo corpo, parte inferior onde circula o fluido, pela mola colocada no interior de um copo na parte superior, e pela parte móvel com um diafragma que faz a separação entre as duas partes anteriores. Na parte inferior do diafragma, o fluido exerce a força de fecho, na parte superior a mola exerce a força de abertura. Note-se que, contrariamente ao mecanismo da válvula principal, quando a parte móvel do piloto redutor sobe este fecha e vice-versa.

Tendo em conta o funcionamento das válvulas redutoras de pressão, interessa ao utilizador regular a pressão a jusante para o valor desejado. Na prática esse ajuste é feito enroscando ou desenroscando o parafuso situado no topo do piloto redutor. Ao enroscar o parafuso a mola é comprimida, aumentando as forças que contribuem para a abertura do piloto e conseqüente despressurização da câmara de controlo. Desta forma diminui-se a pressão a jusante. Ao desenroscar o parafuso, seguindo a mesma linha de raciocínio, regula-se a pressão a jusante para um valor superior.

2.3 Dispositivo de Conversão de Energia Desenvolvido pela *Valcon*

O dispositivo de conversão de energia desenvolvido pela *Valcon* consiste numa válvula hidráulica, no interior da qual foi integrada uma turbina, juntamente com o conjunto obturador já existente. Construtivamente, de modo a adaptar a turbina, a válvula sofre algumas alterações, no entanto o princípio de funcionamento é o mesmo. O conjunto obturador, que nas válvulas normais se situa na parte da tampa da válvula, passa para a zona inferior da mesma, adaptada para o efeito. Por sua vez, a turbina é colocada

2 Válvulas Hidráulicas

na zona superior da válvula. A circulação de fluido no interior da válvula é invertido, passando previamente o fluido na turbina e posteriormente na zona de obturação, figura 2.6.

Ao nível do sistema de pilotagem da válvula, esta pode ser integrada com o sistema de redução de pressão diferencial descrito anteriormente, ou com um dispositivo desenvolvido pela *Valcon* que tem por objectivo manter constante a velocidade de rotação do eixo da turbina, independentemente das variações de pressão a montante da válvula. Note-se que os dois sistemas são incompatíveis não podendo ser utilizados em simultâneo, dado que actuam sobre o mesmo conjunto obturador para controlar a pressão a montante ou a velocidade de rotação da turbina.

Utilizando o sistema de redução de pressão diferencial para fixar o valor da grandeza a jusante, o sistema piloto utilizado é o apresentado na figura 2.4. O modo de funcionamento do conjunto constituído pela válvula redutora com turbina integrada é exactamente o mesmo, o sistema piloto actua sobre o conjunto obturador em função da pressão que mede a jusante. Por esta razão, do ponto de vista do sistema piloto, é indiferente se a redução de pressão é conseguida através da dissipação de energia através do conjunto obturador, ou se parte da queda de pressão é aproveitada pela turbina.

O dispositivo desenvolvido para manter a velocidade constante, figura 2.6, consiste num *encoder* colocado de modo a medir a velocidade de rotação do eixo da turbina. O sinal transmitido por este dispositivo (4 a 20mA) é enviado a um piloto eléctrico que controla a abertura ou fecho da válvula. O piloto eléctrico pode ser equiparado ao piloto redutor, a diferença é que este pressuriza ou despressuriza a câmara de controlo electricamente com base numa corrente de referência.

Quando o *encoder* mede uma velocidade de rotação superior à velocidade de referência do piloto eléctrico este fecha, impossibilitando a passagem de fluido através dele. Assim, a câmara de controlo pressuriza e consequentemente a válvula fecha ligeiramente, reduzindo a velocidade de rotação do eixo. Inversamente, quando a velocidade diminui, o piloto eléctrico abre, despressurizando a válvula e permitindo a sua abertura.

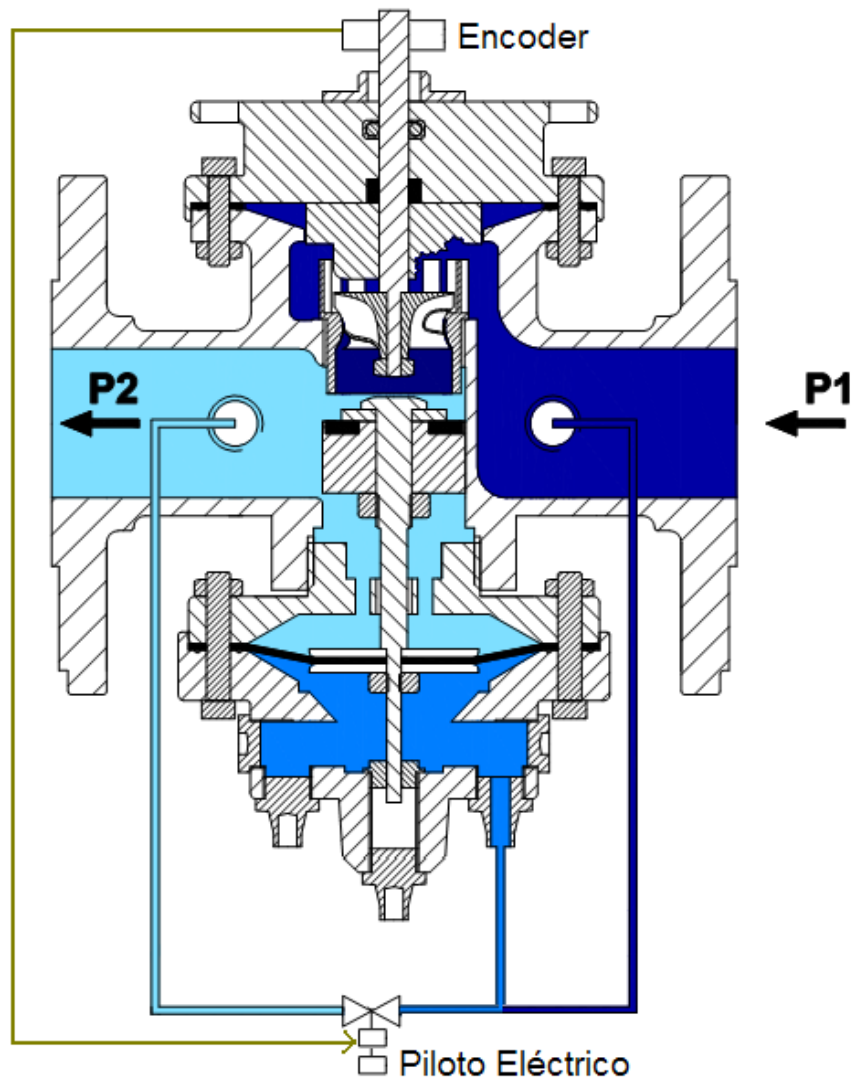


Figura 2.6: Representação esquemática do dispositivo desenvolvido pela *Valcon* para aproveitar parte da energia dissipada nas válvulas redutoras de pressão. Sistema de pilotagem de regulação de velocidade.[2]

3 Grandezas Características do Funcionamento das Turbinas

Teoricamente uma turbina é projectada para funcionar com caudal, altura manométrica e velocidade de rotação fixas. A este conjunto de parâmetros, relacionados entre si, deverá corresponder o ponto de funcionamento para o qual o rendimento da turbina é máximo.

Na prática a realidade é um pouco diferente; como o valor dos parâmetros pode variar, a turbina adopta pontos de funcionamento distintos, para os quais o rendimento deixa de ser máximo. Por este motivo, é importante conhecer com rigor o funcionamento da turbina, procurando conhecer experimentalmente a interdependência entre as grandezas, ou seja, como cada uma das grandezas influencia as restantes. De forma a estabelecer esta dependência, experimentalmente é necessário conhecer quatro parâmetros: caudal Q , altura manométrica H , velocidade de rotação n e momento M .

É impraticável estabelecer experimentalmente todas as dependências entre as quatro grandezas, pois isso levaria a um número de ensaios muito elevado. Assim, é utilizada a análise dimensional, que tem como finalidade a obtenção de maior quantidade de informação, com base num menor número de ensaios.

3.1 Curvas Características

Genericamente, o ensaio da turbina consiste em manter constante duas destas grandezas, fazendo variar uma terceira é possível conhecer a dependência entre causas e efeitos das duas grandezas variáveis. Por exemplo, um dos ensaios possíveis consiste em manter constantes n e H , fazendo a relação causa efeito entre Q e M .

Matematicamente são três as equações que relacionam as grandezas entre si, a primeira determina a potência mecânica no eixo da turbina (P_{mec}), dada em função da velocidade de rotação e momento existente no veio. A velocidade angular é representada por ω .

$$P_{mec} = M.\omega \text{ com } \omega = \frac{\pi.n}{30} \quad (3.1)$$

Outra fórmula representa esta mesma potência em função das condições de escoamento, cujo as grandezas relacionadas são o caudal e a altura manométrica, multiplicadas pelo rendimento da turbina.

$$P_{mec} = \eta.Q.H \quad (3.2)$$

Igualando as duas equações anteriores resulta uma terceira, que permite determinar o rendimento da turbina em função das grandezas descritas.

$$M.\omega = \eta.Q.H \Leftrightarrow M \frac{\pi.n}{30} = \eta.Q.H \Leftrightarrow \eta = \frac{M.\pi.n}{30.Q.H} \quad (3.3)$$

Tendo por base estas equações e os resultados obtidos experimentalmente é possível determinar a potência fornecida pela turbina, assim como o seu rendimento. Os ensaios experimentais que é possível realizar são os descritos nos tópicos seguintes:

- Variação do rendimento em função da velocidade de rotação, $\eta = f(n)$;
- Variação do rendimento em função do caudal, $\eta = f(Q)$;
- Variação do rendimento em função da potência, $\eta = f(P_{mec})$;
- Variação do caudal em função da velocidade de rotação, $Q = f(n)$;
- Variação do caudal em função da altura manométrica, $Q = f(H)$;
- Variação da potência em função da velocidade de rotação, $P_{mec} = f(n)$;
- Variação da potência em função do caudal, $P_{mec} = f(Q)$.

Dos ensaios experimentais descritos, importa no âmbito desta dissertação aprofundar a variação do rendimento em função da velocidade de rotação, $\eta = f(n)$. [4]

3.1.1 Variação do Rendimento em Função da Velocidade de Rotação

Para determinar experimentalmente a variação do rendimento em função da velocidade de rotação do eixo da turbina, é necessário manter constantes as condições do escoamento Q e H , e traçar a relação causa efeito entre n e M . O rendimento é determinado pela fórmula 3.3.

Na prática, para manter a altura manométrica constante, é necessário manter fixo o nível da coluna de fluido a montante da turbina. Para definir H para o valor pretendido, é necessário ajustar o nível da coluna. No caso de se utilizar uma bomba para simular uma dada altura manométrica, esta deverá funcionar de forma a obter a pressão desejada.

Para manter Q constante durante a realização do ensaio, é necessário fazer a sua manutenção sempre que se defina um novo valor de n . O controlo de caudal é feito, regulando uma válvula de admissão de fluido.

O par M e n , pode ser controlado através da aplicação de uma carga variável no eixo da turbina. Esta carga, que actua como um travão, permite em situações limite, bloquear o eixo de forma que a velocidade de rotação seja nula e o momento resistente seja máxima, ou libertar completamente o eixo atingindo a velocidade máxima e o momento nulo.

Para realizar este ensaio, inicialmente coloca-se um momento resistente suficientemente elevado, de forma que o eixo da turbina permaneça bloqueado. Reduzindo sucessivamente o valor da carga, realizam-se várias medições para diferentes valores de n e M . O ensaio dá-se por terminado quando a carga aplicada é nula e o eixo da turbina roda livremente.

A cada par de valores de Q e H , corresponde a curva característica $\eta = f(n)$, figura 3.1. Realizando vários ensaios para diferentes valores de Q , com H constante, é possível obter diversas curvas de rendimento, figura 3.2.

Designa-se por velocidade de rotação nominal $n_{nominal}$, (nas figuras 3.1 e 3.2 representado por n_{normal}) ao valor da velocidade para o qual o rendimento é máxima. Na

3 Grandezas Características do Funcionamento das Turbinas

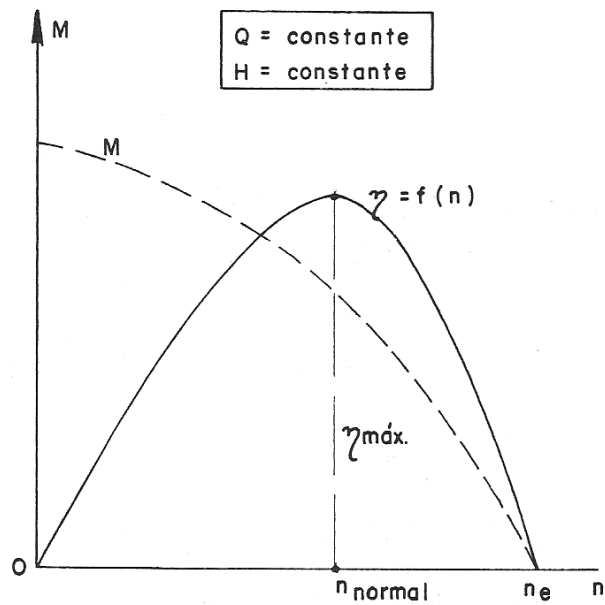


Figura 3.1: Variação do rendimento em função da velocidade de rotação do eixo da turbina.[4]

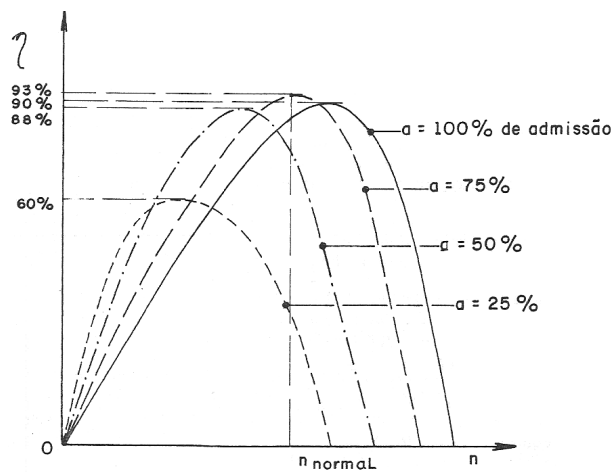


Figura 3.2: Curvas de rendimento para diferentes caudais e altura manométrica fixa.[4]

figura 3.2, para o caudal equivalente a 75% da admissão, à velocidade de rotação nominal corresponde um rendimento da turbina de 93%. [4]

3.2 Análise Dimensional

Para conhecer as características de uma turbomáquina, é necessário recorrer a resultados experimentais, dado que analiticamente é muito difícil prever as condições de funcionamento do dispositivo que interage com o fluido. Sendo necessário efectuar trabalho de laboratório para obter resultados experimentais, é importante estar ciente dos recursos disponíveis, a nível de tempo, dinheiro, equipamento, limitações do banco de ensaios e espaço.

Experimentalmente é impraticável determinar todos os pontos de funcionamento da turbomáquina. Por exemplo no ensaio de uma turbina, considerando os parâmetros H , n , Q e M , um ensaio possível consiste em manter H e n constantes e determinar 10 relações entre Q e M . Repetindo o ensaio 10 vezes para diferentes alturas H e para cada valor de H combinando 10 velocidades distintas, matematicamente seriam necessários 1000 ensaios. Fica ainda por relacionar um grande número de possibilidades.

Para contornar esta dificuldade, foi desenvolvida a análise dimensional. O objectivo é obter a maior quantidade de informação possível, com o menor número de ensaios. Esta análise possibilita ainda relacionar dados, para que a informação seja apresentada de forma sucinta. Outra aplicação muito comum, consiste em utilizar a análise dimensional para relacionar um modelo à escala com o protótipo e vice-versa.

A análise dimensional consiste na determinação de parâmetros, designados por parâmetros adimensionais. Estes definem uma relação entre grandezas, da qual o resultado é um valor constante. Na prática existe uma grande variedade de parâmetros adimensionais, em diversas áreas da ciência, um bom exemplo é a mecânica dos fluidos.

Os parâmetros são obtidos através do teorema dos PI de *Buckingham*, que tem por base a relação entre variáveis dependentes e independentes.

3.2.1 Máquinas Hidráulicas, Parâmetros Adimensionais

A figura 3.3 ilustra uma turbina hidráulica contida num volume de controlo. Considerando a incompressibilidade do fluido, sabe-se que a potência P é uma variável que depende da densidade do fluido (ρ), da velocidade (ω), da viscosidade (μ), do diâmetro (D), do caudal (Q) e da altura (H). Assim P é a variável dependente e os restantes parâmetros são variáveis independentes:

$$P = f(\rho, \omega, \mu, D, Q, H) \quad (3.4)$$

Utilizando o teorema dos PI de *Buckingham*, obtêm-se os diferentes parâmetros adimensionais:

$$\bar{P} = f(Re, \phi, \psi) \quad (3.5)$$

em que \bar{P} é o coeficiente de potência, Re o número de *Reynolds*, ϕ o coeficiente de caudal e ψ o coeficiente de altura. Os parâmetros adimensionais, tal como o nome indica

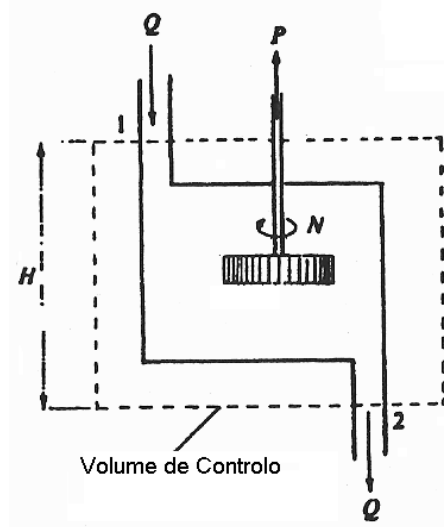


Figura 3.3: Turbina Hidráulica contida num volume de controlo.[5]

não têm unidades. Segundo o teorema, estes correspondem às seguintes expressões:

$$\bar{P} = \frac{P}{\rho\omega^3 D^5} \quad (3.6)$$

$$Re = \frac{\rho\omega D^2}{\mu} \quad (3.7)$$

$$\phi = \frac{Q}{\omega D^3} \quad (3.8)$$

$$\psi = \frac{H}{\omega^2 D^2} \quad (3.9)$$

Note-se que na equação 3.6, P corresponde à potência de saída. Assim, para as turbinas este valor corresponde à potência mecânica disponível no veio e nas bombas à potência contida na massa de fluido. Note-se ainda que o termo $\rho\omega D^2/\mu$ da equação 3.7 equivale ao número de *Reynolds* $\rho VD/\mu$, desde que a velocidade periférica V seja proporcional a ωD .

Nas máquinas hidráulicas, sabe-se que o valor do número de *Reynolds* é muito elevado, conseqüentemente a acção da viscosidade do fluido é muito baixa, não influenciando significativamente as condições de operação da máquina. Por este motivo, o parâmetro adimensional do número de *Reynolds* é desprezado nestes casos.

Através da análise dimensional, é possível determinar para as máquinas hidráulicas as curvas das alturas manométricas, das potências etc. No entanto, o rendimento da máquina para os diferentes pontos de funcionamento não se pode prever analiticamente. Por esta razão, o rendimento é determinado experimentalmente.

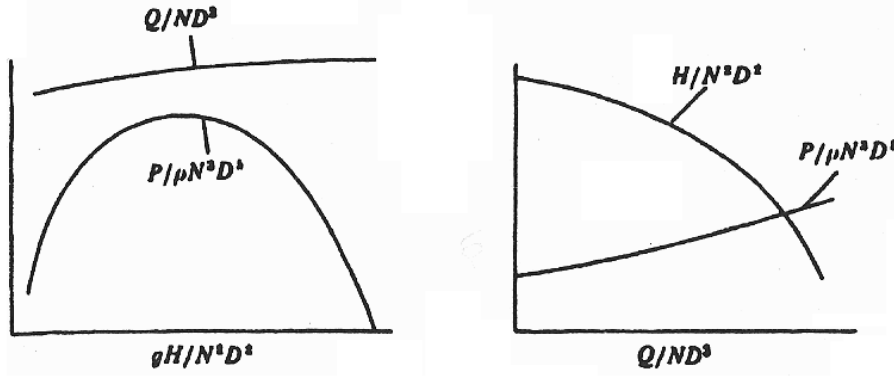


Figura 3.4: Representação gráfica dos parâmetros adimensionais: coeficiente de caudal, de altura e de potência.[5]

Matematicamente é possível demonstrar que o rendimento se mantém constante ao utilizar a análise dimensional. Numa turbina, o rendimento hidráulico é dado por:

$$\eta = \frac{\bar{P}\rho\omega^3 D^5}{\rho g Q H} = \bar{P} \frac{\omega D^3}{Q} \frac{\omega^2 D^2}{H} = \frac{\bar{P}}{\phi\psi} \quad (3.10)$$

Seguindo um raciocínio idêntico, para as bombas vem:

$$\eta = \frac{\phi\psi}{\bar{P}} \quad (3.11)$$

Quer para as turbinas, quer para as bombas, o rendimento pode ser descrito apenas em função dos parâmetros adimensionais. Como estes são constantes, o rendimento não varia.

As curvas características dos parâmetros adimensionais podem ser representadas graficamente segundo a figura 3.4, de forma a condensar a máxima quantidade de informação num só gráfico.[6, 5]

3.2.1.1 Funcionamento da Mesma Turbina Sob Quedas Diferentes

Utilizando parâmetros adimensionais é possível determinar, conhecendo todas as variáveis para um ponto de funcionamento (obtido experimentalmente), para alturas de queda diferentes as variáveis correspondentes. Obtêm-se as seguintes relações:

$$\frac{H_1}{\omega_1^2 D_1^2} = \frac{H_2}{\omega_2^2 D_2^2} \Leftrightarrow \omega_2 = \omega_1 \frac{D_1}{D_2} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{1/2} \quad (3.12)$$

$$\frac{Q_1}{\omega_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{\omega_2 D_2^3} \Leftrightarrow Q_2 = Q_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{1/2} \quad (3.13)$$

$$\frac{P_1}{\rho_1 \omega_1^3 D_1^5} = \frac{P_2}{\rho_2 \omega_2^3 D_2^5} \Leftrightarrow P_2 = P_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{3/2} \quad (3.14)$$

3 Grandezas Características do Funcionamento das Turbinas

$$P_2 = P_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{3/2} \Leftrightarrow M_2 = M_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3 \frac{H_2}{H_1} \quad (3.15)$$

Como a turbina e o fluido correspondente aos dois pontos de funcionamento são os mesmos, vem $D_1 = D_2$ e $\rho_1 = \rho_2$. Assim é possível simplificar as expressões:

$$\omega_2 = \omega_1 \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{1/2} \quad (3.16)$$

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{1/2} \quad (3.17)$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{3/2} \quad (3.18)$$

$$M_2 = M_1 \frac{H_2}{H_1} \quad (3.19)$$

4 Máquinas Eléctricas

As máquinas eléctricas permitem fazer a conversão entre energia mecânica e eléctrica. Designam-se por geradores as máquinas que convertem energia mecânica em eléctrica, fazendo a conversão no sentido inverso, as máquinas são designadas por motores. A esta conversão está sempre associado o rendimento da máquina.

No funcionamento da máquina como gerador, a rotação é fornecida por uma fonte de energia mecânica, designada por máquina primária. Esta cria movimento relativo entre os condutores e o campo magnético da máquina, gerando energia eléctrica.

No funcionamento como motor, a energia eléctrica fornecida pelos condutores produz movimento relativo entre estes e o campo magnético, produzindo energia mecânica.

No mercado existem diversas famílias de máquinas eléctricas, entre elas as mais utilizadas são:

- Máquina de corrente contínua (CC), com armadura rotativa e campo fixo;
- Máquina síncrona (CA), com armadura rotativa e campo fixo;
- Máquina síncrona (CA), com campo rotativo e armadura fixa;
- Máquina assíncrona (CA), que permite enrolamentos da armadura fixos e rotativos.

4.1 Acção Motora e Geradora

A acção motora consiste no aparecimento de uma força que resulta da corrente que atravessa um condutor exposto à acção de um campo magnético, figura 4.1a). Tendo em conta o sentido da corrente e do campo magnético, pela regra da mão esquerda, determina-se o sentido da força resultante. Por outro lado, a força resultante de sentido ascendente, faz com que o condutor se movimente relativamente ao campo magnético, originando uma força electromotriz induzida no condutor. Dado que a f.e.m. tem sentido contrario ao da circulação de corrente (e f.e.m.) que originou a força ou o movimento, esta é designada por *força contra-electromotriz*. A força contra-electromotriz é representada a traço interrompido na figura 4.1a). Em suma, quando ocorre a acção motora, é simultaneamente desenvolvida uma acção geradora em pequena escala. Esta afirmação vai de encontro à lei de *Lenz*, “*o sentido da corrente induzida, é tal que os efeitos que ela produz se opõem à causa que a origina*”.

Quando ocorre a acção geradora, à semelhança do caso anterior, é desenvolvida uma acção motora. Na figura 4.1b) uma força mecânica move o condutor no sentido ascendente, induzindo uma força electromotriz. Quando uma corrente circula no condutor

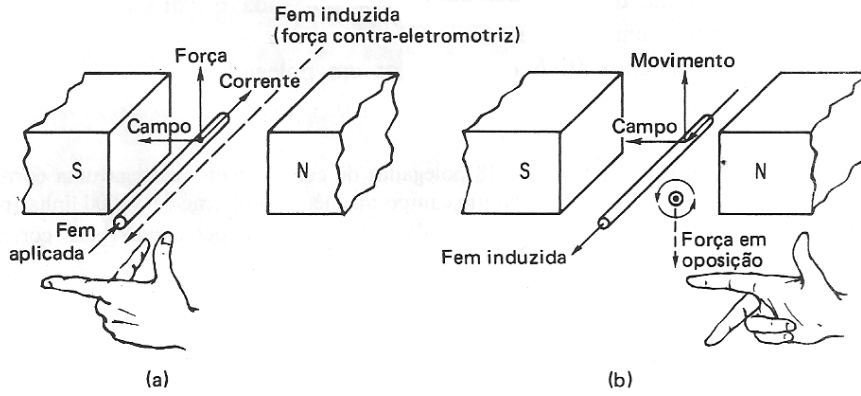


Figura 4.1: Acção motora: consiste no aparecimento de uma força que resultada da corrente que atravessa um condutor exposto á acção de um campo magnético, a). Acção geradora: consiste no aparecimento de uma f.e.m. devido à acção do campo magnético e do movimento imposto, b). [7]

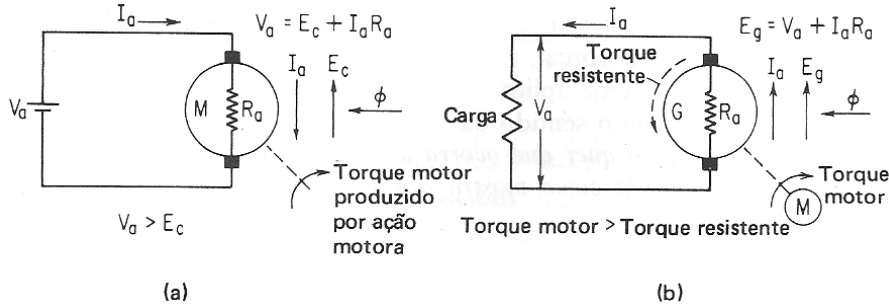


Figura 4.2: Na acção motora em a), a tensão aplicada V_a , é superior à força contra-electromotriz desenvolvida, E_c . Na acção geradora em b), a f.e.m. gerada, E_g , é superior á queda de tensão nos terminais da carga, V_a . [7]

(resultado da f.e.m.), este está sob acção de um campo magnético, originando uma força com sentido contrário ao do movimento, força de oposição. Assim ocorre a acção motora.

Pode concluir-se que, a acção geradora e motora ocorrem simultâneamente nas máquinas eléctricas girantes. Este conceito reforça a ideia que, a mesma máquina pode funcionar como motor ou gerador.

A figura 4.2 ilustra esquematicamente a acção motora e geradora, respectivamente. Tendo em conta o sentido da tensão, V_a , aplicada e da corrente, I_a , figura 4.2a), a acção motora que resulta produz uma força que gira no sentido horário. O sentido da força contra-electromotriz induzida, E_c , é oposto ao da tensão aplicada, assim:

$$V_a = E_c + R_a I_a \quad \text{com} \quad V_a > E_c \quad (4.1)$$

Para que a corrente produza uma rotação no sentido horário, é necessário que a tensão

aplicada aos terminais da armadura, V_a , seja maior que a força contra-electromotriz desenvolvida, E_c .

Considerando que os condutores do gerador, figura 4.2b), rodam no sentido horário, uma f.e.m., E_g , é induzida no sentido mostrado. Quando o gerador alimenta uma carga, a corrente resultante, I_a , produz um binário resistente, representado na figura a tracejado. Este binário opõe-se ao binário da máquina primária, assim, quando a máquina é operada como gerador, a corrente resultante I_a tem o mesmo sentido da f.e.m. gerada, E_g e a f.e.m. gerada é maior que a tensão nos terminais da carga, V_a . Comparando a acção motora e geradora observa-se que, para o mesmo sentido de rotação dos condutores e do campo magnético, o sentido de circulação de corrente é invertido.

$$E_c = V_a + R_a I_a \quad \text{com} \quad V_a > E_c \quad (4.2)$$

Noto-se que, R_a representa a resistência do enrolamento, no qual circula a corrente I_a . [8, 7]

4.2 Máquina de Corrente Contínua CC

A figura 4.3 mostra em corte uma máquina CC típica. O rotor, parte móvel da máquina, é constituído pelo eixo que permite a sua rotação, pelo núcleo constituído por camadas de chapas de aço laminadas, que reduzem as correntes parasitas no núcleo e o aço utilizado possibilita a diminuição das perdas por histerese. As chapas são ranhuradas axialmente na periferia, onde são colocadas as bobinas que constituem o enrolamento da armadura. Por sua vez, os terminais das bobinas são ligados ao colectore, o qual, devido à rotação do eixo comuta a ligação às bobinas. O colectore é constituído por segmentos de cobre isolados entre si e o eixo, electricamente ligados ao enrolamento da armadura.

Em suma, o rotor na máquina CC permite rotação, este movimento origina a combinação necessária no colectore que ligado às bobinas induz tensão ou origina um binário.

O estator, parte fixa da máquina, é constituído pelos enrolamentos de campo ou bobinas indutoras, com poucas espiras de fio grosso na excitação em série (campo-série) e muitas espiras de fio fino na excitação em derivação (campo-shunt). Com a inserção dos enrolamentos de campo em torno dos pólos indutores, constituídos por ferro laminado fixo na estrutura da máquina, é originado o campo magnético necessário para a criação da f.e.m. ou força mecânica. Este conjunto descreve a constituição de um electroíman. Existem ainda os pólos auxiliares ou interpolos situados na região interpolar, ou seja, entre os pólos indutores. O enrolamento dos pólos auxiliares é constituído por poucas espiras de fio grosso, dado que é ligado em série com o circuito da armadura. Estes pólos têm por objectivo eliminar o arco eléctrico entre o colectore e as escovas sempre que se dá a comutação.

As escovas e os porta-escovas, suportados pela estrutura do estator, são constituídos por carvão e grafite. Estas mantêm o contacto com os segmentos do colectore, permitindo a alimentação do enrolamento da armadura. Na estrutura do estator são ainda fixos os mancais, que suportam o rotor e os suportes porta-escovas.

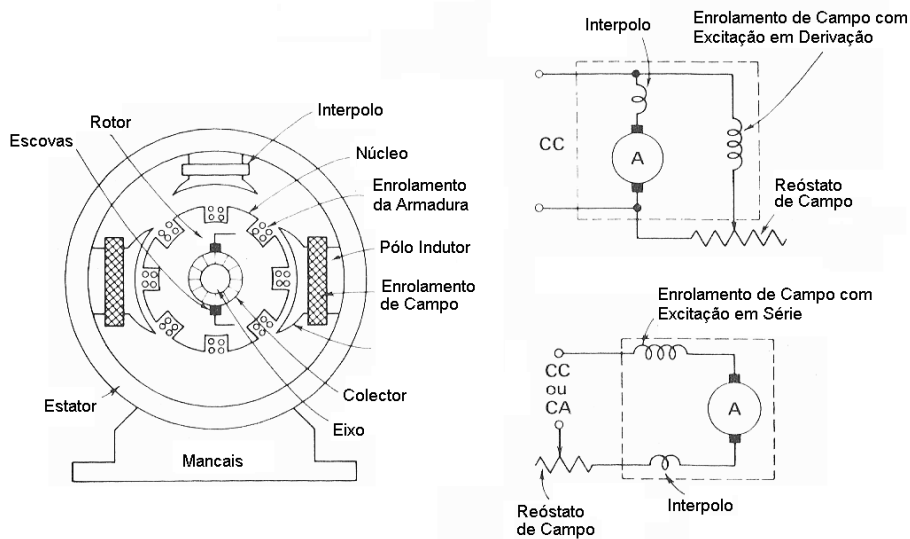


Figura 4.3: Máquina de corrente contínua e respectivas ligações de excitação em derivação ou em série.[7]

Nos motores CC, o tipo de ligação entre os enrolamentos da armadura e os enrolamentos de campo dos pólos principais (ou pólos indutores) e auxiliares, caracteriza o tipo de excitação em derivação ou série. Na excitação em derivação, os enrolamentos de campo estão em paralelo com o circuito da armadura, na excitação em série esta ligação é feita em série. Existe ainda a possibilidade de fazer a excitação independente, ou ainda combinar a excitação em derivação e série, o que se designa por excitação composta.

Note-se que os enrolamentos dos interpolos, quando empregues, fazem parte do circuito da armadura, assim como as escovas. Outro aspecto é o facto de as ligações na excitação em derivação da figura 4.3 empregarem reóstato de campo no circuito de campo.

É importante observar que, a máquina CC com excitação em série pode funcionar como máquina CC ou CA.[7, 9]

4.3 Máquina Síncrona CA

Como foi descrito anteriormente, as máquinas síncronas podem ser de dois tipos, armadura rotativa e campo fixo ou campo rotativo e armadura fixa. Na máquina síncrona de campo fixo, a estrutura do estator é a mesma da máquina de corrente contínua e o enrolamento de campo é da mesma forma excitado por uma fonte CC. A principal diferença consiste no facto de, no rotor, os terminais do enrolamento da armadura em vez de serem ligados a um colector de segmentos isolados, são ligados a colectores em forma de anel.

A construção da máquina síncrona de campo fixo é relativamente limitada se com-

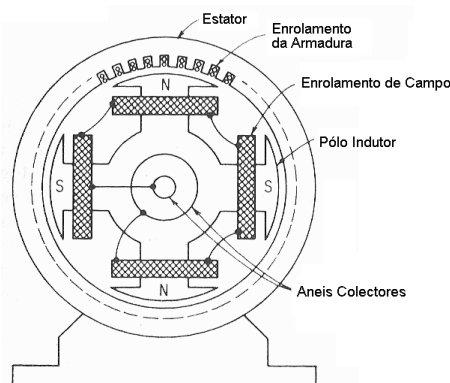


Figura 4.4: Máquina síncrona de campo rotativo e armadura fixa. A máquina caracteriza-se pela utilização de anéis colectores.[7]

parada com a máquina síncrona de campo móvel, por este motivo esta é mais utilizada. Nesta máquina o enrolamento de campo, situado no rotor (figura 4.4), é alimentado por uma fonte CC através de dois anéis colectores isolados entre si e a armadura é ligada directamente à fonte polifásica CA ou à carga.

Alimentando o enrolamento do estator com uma fonte CA monofásica ou polifásica, a máquina funciona como motor síncrono. Estes caracterizam-se por terem uma velocidade de rotação constante, em função da frequência da rede. Os pólos do rotor seguem o campo girante imposto ao estator pela rede de alimentação, assim a velocidade do motor é igual à do campo girante (velocidade síncrona):

$$n_s = 60 \frac{f}{p_p} \quad (4.3)$$

Onde n_s é a velocidade síncrona, f a frequência [Hz] e p_p o número de pares de pólos.

Se o rotor gira com velocidade síncrona através da máquina primária, a máquina funciona como gerador de corrente alternada (alternador). A máquina síncrona é fundamentalmente utilizada como alternador, embora possa igualmente ser utilizada como motor.[7]

4.4 Máquina Assíncrona CA

Do ponto de vista construtivo, o estator da máquina assíncrona (figura 4.5) é idêntico ao da máquina síncrona de campo móvel. O rotor, constituído por lâminas de aço ranhuradas permite alojar o enrolamento rotórico. Existem dois tipos de rotor, o rotor bobinado com enrolamentos rotóricos ligados em estrela, cujo as extremidades estão conectadas a anéis colectores e o rotor em curto-circuito ou em gaiola de esquilo, que não tem colector e por isso não tem escovas. O rotor em gaiola de esquilo é constituído por cobre ou alumínio fundido nas ranhuras de aço laminado, os terminais das barras fundidas são curto-circuitados por anéis terminais colocados nas extremidades.

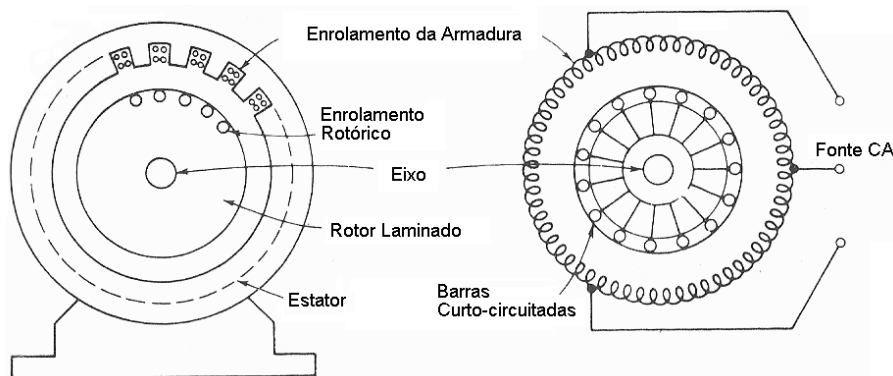


Figura 4.5: Máquina assíncrona com rotor em curto-circuito alimentada por uma fonte CA.[7]

O funcionamento da máquina assíncrona baseia-se na interacção entre o campo girante criado pela corrente estatórica fornecida ao estator e a corrente no enrolamento rotórico quando os condutores deste último são cortados pelo campo girante. A velocidade do campo girante é dada por:

$$n_s = 60 \frac{f}{p_p} \quad (4.4)$$

A interacção electromagnética entre o rotor e o estator só é possível quando a velocidade do campo girante é diferente da do rotor (n). Existe assim um deslizamento s entre as duas partes dado por:

$$s = \frac{n_s - n}{n} \quad (4.5)$$

A máquina assíncrona funciona como motor quando $n < n_s$ e como gerador quando $n > n_s$. O motor de indução torna-se um gerador de indução quando o rotor é movimentado por uma máquina primária a uma velocidade que excede a velocidade síncrona. O deslizamento está contido entre 0 e 100% no funcionamento como motor e tem valores negativos no funcionamento como gerador.

Note-se que, independentemente do sentido em que se dá a conversão de energia, a máquina de indução assíncrona tem necessidade de estar ligada a uma fonte CA.[7, 10]

4.5 Curvas Características e Ponto de Funcionamento

Qualquer dispositivo dotado de movimento de rotação, tem a potência mecânica no eixo dada por:

$$P_{mec} = M.\omega \quad (4.6)$$

onde ω é a velocidade angular do movimento em $[rad/s]$. A velocidade angular é obtida em função da velocidade de rotação n pela equação:

$$\omega = \frac{\pi.n}{30} \quad (4.7)$$

Relacionando as duas expressões anteriores vem:

$$P_{mec} = M \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (4.8)$$

Matematicamente existem infinitas combinações entre M e n de forma a obter o mesmo valor de potência mecânica, mas na realidade isso não se verifica. Para uma carga mecânica específica, corresponde apenas um par de valores de M e n .

Ao sujeitar um eixo a diferentes momentos, obtêm-se diferentes velocidades de rotação, impostas por esse binário. Por outro lado, controlando o eixo definindo velocidades de rotação diferentes, obtêm-se os correspondentes binários. Este procedimento permite traçar a curva característica de qualquer dispositivo dotado com movimento de rotação. O dispositivo, no sentido da conversão de energia eléctrica em mecânica, pode ser um motor ou a carga que este acciona, no sentido da conversão de energia mecânica em eléctrica, pode ser o gerador ou o sistema de accionamento do gerador.

Definidas as curvas características do motor e da respectiva carga que este acciona, é possível determinar, interceptando as duas curvas, qual a velocidade de rotação e binário com que o conjunto opera. Esta coordenada é designada por ponto de funcionamento.

Quando a carga é variável, o ponto de funcionamento altera-se, nesta situação é importante garantir que as variações de carga não ultrapassem certos limites, a partir dos quais o conjunto é instável. O conjunto é estável quando se verifica a seguinte condição:

$$\frac{dM_{motor}}{dn} > \frac{dM_{carga}}{dn} \quad (4.9)$$

O exemplo da figura 4.6 a) representa um ponto de funcionamento estável; nesta situação o aparecimento de um transitório pode deslocar o ponto P da velocidade inicial n para n_1 ou n_2 . Deslocando o ponto P para n_1 o binário do motor aumenta, enquanto o binário solicitado pela carga diminui, desta forma o conjunto tende a aumentar a velocidade de rotação, reajustando a velocidade inicial. De forma semelhante, deslocando o ponto P para n_2 o binário do motor diminui enquanto a carga aumenta, assim, a velocidade tende a diminuir.

A figura 4.6 b) representa um caso de instabilidade, se o transitório deslocar o ponto P para a velocidade n_1 , os binários aumentam, mas em diferentes proporções. A pequena variação do binário do motor contribui, como acontece na situação anterior, para a estabilização do sistema, no entanto esta é pouco significativa se comparada com o aumento do binário da carga, que entrando em situação de instabilidade leva o conjunto a parar. Se o transitório deslocar o ponto P para a velocidade n_2 , a diminuição do binário do motor, que contribui para a estabilidade do sistema, é insignificante relativamente á diminuição do binário da carga, nesta situação o sistema dispara.[11]

4.5.1 Curva Característica de Motores Eléctricos

A curva característica de motores eléctricos é a dependência entre o momento desenvolvido pela máquina e a sua velocidade de rotação. Esta relação depende das características de cada motor, sendo que cada família de motores tem uma curva característica com uma configuração típica, sendo possível apresentar as curvas de forma genérica.

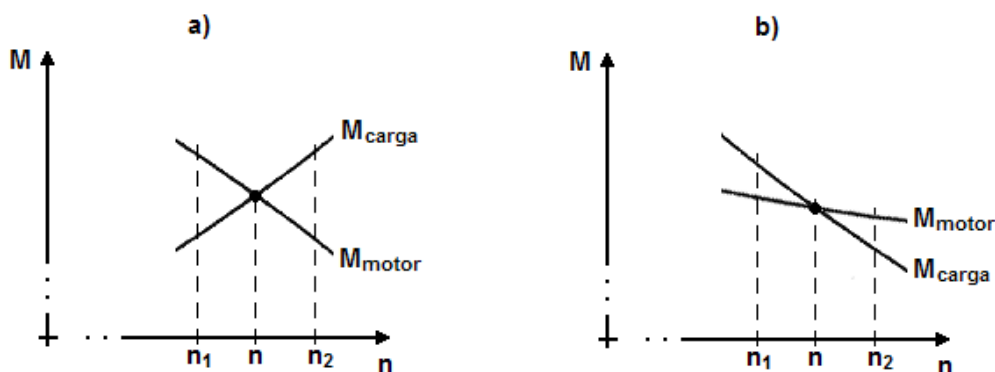


Figura 4.6: O gráfico a) representa um ponto de funcionamento estável, deslocando o ponto P para n_1 ou n_2 , este tende a regressar á sua posição inicial. O gráfico b) representa um ponto de funcionamento instável, deslocando o ponto P para n_1 ou n_2 , o sistema pára ou embala.

Na família dos motores síncronos, a velocidade de rotação do motor é imposta pela frequência de alimentação (velocidade de sincronismo), assim a velocidade é invariável em função do momento ou potência mecânica que solicita a máquina.

Os motores assíncronos ou de indução com rotor em gaiola de esquilo, na zona de funcionamento estável, tendem a diminuir o binário em função do aumento da velocidade de rotação. No caso dos motores assíncronos com rotor bobinado, a configuração da curva característica é semelhante. No entanto, há a possibilidade de inserir uma resistência externa no enrolamento rotórico. Aumentando esta resistência diminui a rotação à qual corresponde o binário máximo, figura 4.7. A partir do instante em que ao ponto de binário máximo corresponde a velocidade nula, é ainda possível aumentar a resistência do rotor, no entanto a partir deste ponto o binário máximo reduz-se.

Na família dos motores de corrente contínua com excitação em paralelo, a velocidade é praticamente constante, tendo tendência a aumentar ligeiramente com a diminuição do momento. Estes motores permitem variar a tensão na armadura de forma a obter a velocidade de rotação desejada, deslocando a curva característica que não altera de configuração.

Nos motores de corrente contínua com excitação em série, a velocidade de rotação e o momento são inversamente proporcionais; desta relação resulta sempre um valor de potência constante.

A figura 4.8 compara as curvas características das diferentes famílias de motores descritos; genericamente os valores do momento tendem a diminuir com a variação crescente da velocidade.

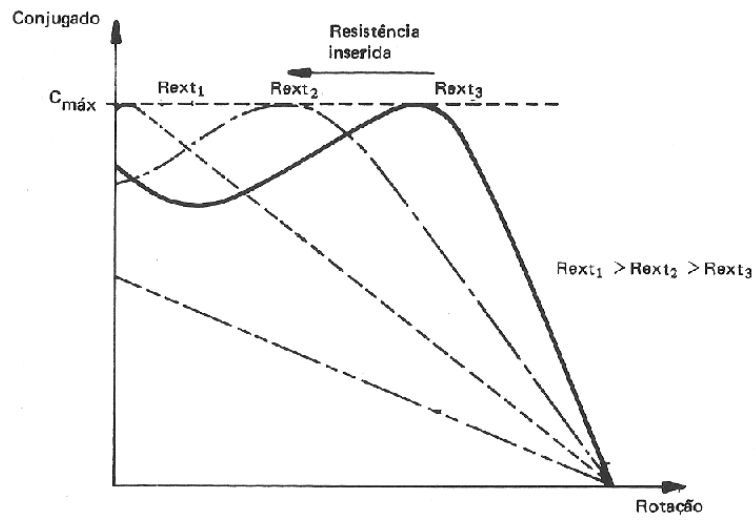


Figura 4.7: Curvas características, momento (conjugado) versus rotação, de motores assíncronos de rotor bobinado para diferentes valores de resistência externa.[11]

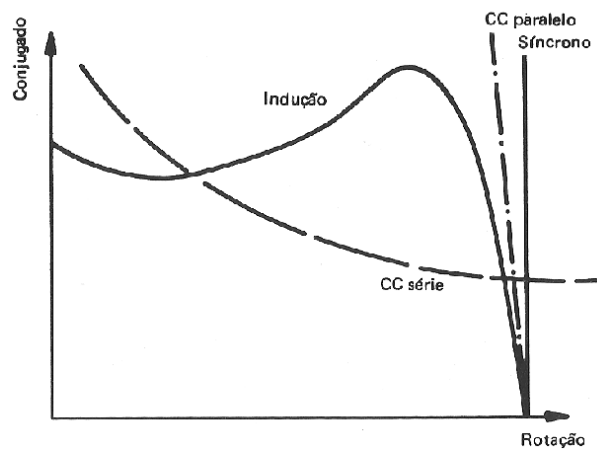


Figura 4.8: Configuração das curvas características, momento (conjugado) versus rotação, para diversas famílias de motores eléctricos.[11]

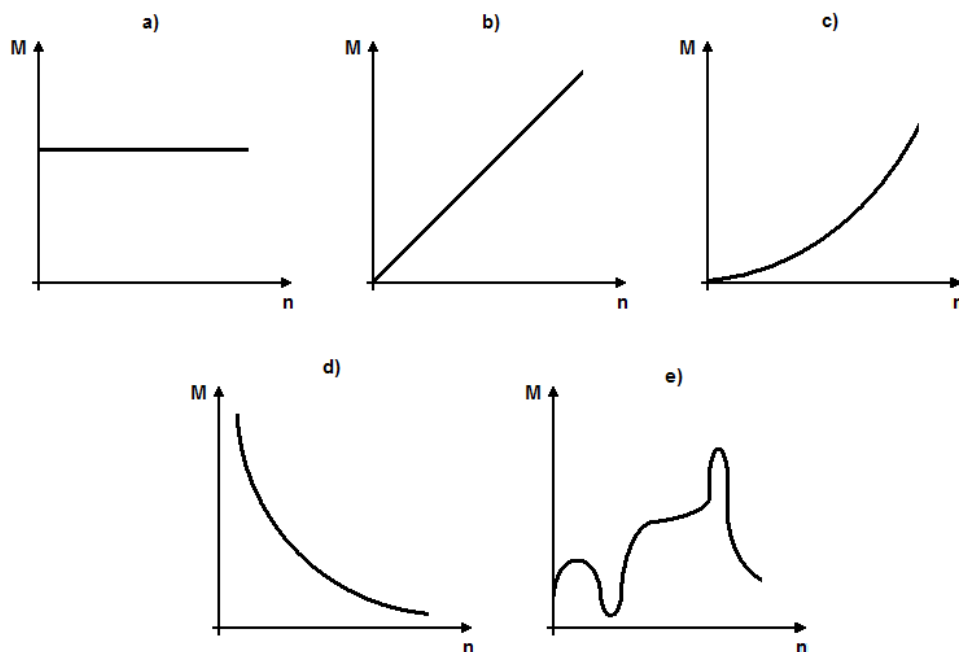


Figura 4.9: Configuração das curvas características em função da carga.

4.5.2 Curva Característica de Cargas Mecânicas

Na prática, num accionamento eléctrico, é importante conhecer não só a curva característica do motor, disponibilizada pelo fabricante, mas também a característica do ponto de vista da solicitação de potência, ou seja, a curva característica da carga que o motor acciona. Dependendo da carga, as curvas características podem adoptar configurações muito distintas, assim, estas são separadas em cinco principais grupos, figura 4.9:

- a) Momento praticamente constante em função da velocidade de rotação, por exemplo um guindaste que transporta uma carga fixa;
- b) Variação linear entre momento e velocidade de rotação, por exemplo um moinho de rolos;
- c) Variação do momento com o quadrado da rotação, variação exponencial, por exemplo um misturador;
- d) Variação inversa entre momento e velocidade de rotação resultando uma potência constante, por exemplo uma fresa;
- e) Variação irregular do momento em função da velocidade de rotação, não sendo possível integrar a configuração da curva em nenhum dos conjuntos anteriores, por exemplo um forno rotativo.

As curvas descritas são modelos puramente teóricos, dos quais as curvas características reais tendem a aproximar-se. Na prática, por exemplo, uma carga com a característica da curva b) ou c), tem sempre um binário diferente de zero quando a velocidade é nula, devido à existência de atrito estático. Esta mesma consideração física faz com que a curva a) tenha um binário igual a zero quando a velocidade é igualmente nula. Pode ainda dar-se o caso de a curva característica não se identificar com nenhuma das curvas modelo descritas.[11]

4.6 Escolha do Gerador

Para escolher o gerador a acoplar à máquina primária que fornece o binário mecânico, é necessário ter em conta vários aspectos, tais como: grandeza das potências, velocidade nominal, tipos de regulação, rendimentos entre outros. No caso dos sistemas de geração de energia hídricos, a escolha do gerador coloca-se entre o gerador síncrono ou assíncrono.

Genericamente, o gerador assíncrono é uma opção robusta no sentido em que a máquina não requer muita manutenção, e economicamente é mais viável, relativamente ao gerador síncrono. No entanto, em dispositivos de geração de energia, muitas vezes é necessário optar por soluções ligeiramente mais elaboradas, de modo a permitir o controlo de alguns parâmetros da máquina. Por esta razão, o gerador síncrono é muitas vezes a opção preferencial. Em centrais hídricas de grande potência, a conversão de energia é sempre feita através de alternadores, dado que os aspectos económicos são menos relevantes.

Em Portugal, a maior parte das centrais mini-hídricas que se começaram a distribuir pelo país, na década de oitenta, estão equipadas com geradores síncronos. Uma razão que leva muitas vezes os projectistas a optar pelo gerador síncrono é o facto de este ter méritos comprovados. Por outro lado, o gerador assíncrono não tem um historial tão vasto no que diz respeito há experiência de operação com este tipo de máquinas. Ao contrário do que se tem verificado nos últimos anos, com o crescimento dos aproveitamentos eólicos, a utilização de geradores assíncronos têm-se desenvolvido bastante, motivando em muitas situações a utilização dos geradores de indução.

Em muitas situações, a utilização de geradores síncronos não é viável, no sentido em que a sua escolha implica a integração de sistemas de desmultiplicação de velocidade. No mercado não existe uma grande variedade de geradores assíncronos equipados com múltiplos, desta forma, para aplicações em que se pretenda uma velocidade de rotação mais baixa, a desmultiplicação é indispensável. Por outro lado, os custos dos geradores de indução aumentam consideravelmente em função do aumento do número de pólos.[12, 13]

5 Gerador Síncrono

O gerador síncrono, também designado por alternador, é um conversor mecano-eléctrico. A designação *síncrona* resulta de este tipo de máquina rotativa funcionar com velocidade e frequência constantes.

Este capítulo visa descrever o gerador síncrono monofásico e trifásico, assim como os respectivos circuitos equivalentes que representam de forma esquemática o funcionamento da máquina. Analisam-se as características de funcionamento da máquina, através dos ensaios em vazio e em curto-circuito. Analisa-se o funcionamento da máquina quando esta alimenta uma carga, tendo em conta o factor de potência da mesma.

5.1 Circuito Equivalente

A força electromotriz, E_g , é a tensão induzida internamente pelo gerador síncrono numa das fases. Quando o gerador não alimenta uma carga receptora, os seus terminais estão em aberto, não havendo circulação de corrente, nesta situação a tensão E_g corresponde ao valor da tensão medida nos terminais da máquina, V_a . Quando o gerador alimenta uma ou varias cargas, a afirmação anterior já não se verifica, nesta situação E_g e V_a assumem valores distintos.

Esta diferença de valores é originada pela *reacção do induzido*, pela *reactância indutiva* (também designada por indutância) e *resistência interna* do enrolamento do induzido (estator). No gerador síncrono com pólos salientes, existe ainda um quarto factor relacionado com a forma do rotor, que contudo não será abordado nesta dissertação.

Tendo em conta que a reacção do induzido é o factor predominante na diferença de valores entre E_g e V_a , é importante a sua compreensão. Quando a máquina primária imprime movimento de rotação no rotor, constituído por um ou mais pares de pólos, o movimento e o campo magnético existentes originam o aparecimento da força electromotriz, E_g , no enrolamento do estator. Se o gerador alimentar uma carga, irá circular uma corrente, I_a , no enrolamento. Por sua vez, I_a produz um campo magnético que origina a força electromotriz E_{ar} . Este membro, que representa a queda de tensão devida à reacção no estator, caracteriza a reacção do induzido.

Da relação entre E_g e E_{ar} resulta a tensão V_a disponível nos terminais por fase:

$$V_a = E_g \pm E_{ar} \quad (5.1)$$

O sinal da f.e.m. E_{ar} , é função do factor de potência da carga aplicada ao gerador. O efeito da reacção do induzido pode produzir uma tensão que aumenta a tensão gerada, E_g , ou tende a tornar mais elevada a tensão nos terminais, V_a . Este assunto é abordado detalhadamente na secção 5.1.1.

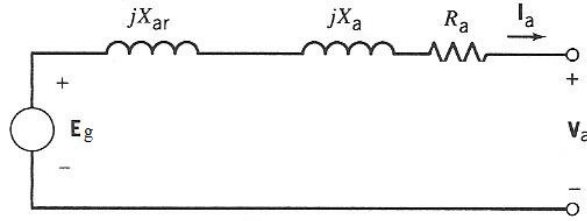


Figura 5.1: Circuito equivalente de um gerador síncrono monofásico. A tensão medida nos terminais, V_a , é função da f.e.m gerada E_g , e das quedas de tensão devidas à reacção do induzido $jX_{ar}I_a$, à reactância induzida jX_aI_a e à resistência interna R_aI_a . [14]

Para além do efeito do induzido, falta considerar a reactância indutiva X_a e a resistência interna R_a , no enrolamento do induzido, quando este é percorrido pela corrente I_a . A reactância indutiva é reponsavel pela queda de tensão na reactância do enrolamento do estator associado ao fluxo disperso por fase, jX_aI_a . De forma semelhante, a resistência interna é responsável pela queda de tensão no enrolamento por fase, R_aI_a .

A relação entre E_g e E_{ar} , da equação 5.1, pode agora ser reescrita tendo em conta os efeitos da reactância indutiva e da resistência interna:

$$V_a = E_g \pm E_{ar} - jX_aI_a - R_aI_a \quad \text{com} \quad E_{ar} = jX_{ar}I_a \quad (5.2)$$

ou seja:

$$V_a = E_g \pm jX_{ar}I_a - jX_aI_a - R_aI_a \quad (5.3)$$

A f.e.m. que representa a variação do induzido, E_{ar} , é determinada em função da corrente I_a que circula no enrolamento do induzido e da reactância X_{ar} . A reactância, em função da carga aplicada, pode ser indutiva (indutância) ou capacitiva (capacitância).

Com base nas leis de *Kirchhoff*, é possível representar o circuito equivalente à equação 5.3, figura 5.1.

Visualizando o circuito, facilmente se compreende que se os terminais do gerador estão abertos, não havendo circulação de corrente, E_g é igual a V_a , dado que todas as causas que originam a diferença de valores depende da corrente I_a , que é zero. O raciocínio semelhante, no caso da aplicação de uma carga, também se verifica. Havendo circulação de corrente, I_a , a relação aos terminais do gerador, V_a e a f.e.m. gerada E_g , são função dos parâmetros descritos, $jX_{ar}I_a$, jX_aI_a e R_aI_a . [15, 14]

5.1.1 Relação Entre a f.e.m. Gerada e a Tensão nos Terminais para Vários Factores de Potência da Carga

A relação entre a f.e.m. gerada E_g e a tensão nos terminais V_a , é função do factor de potência da carga $\cos\theta$ aplicada ao gerador. As três situações possíveis são: carga com factor de potência unitário, $\cos\theta = 1$, factor de potência em atraso, que é característica das cargas indutivas, ou seja, a corrente alternada no induzido I_a por fase está em

5 Gerador Síncrono

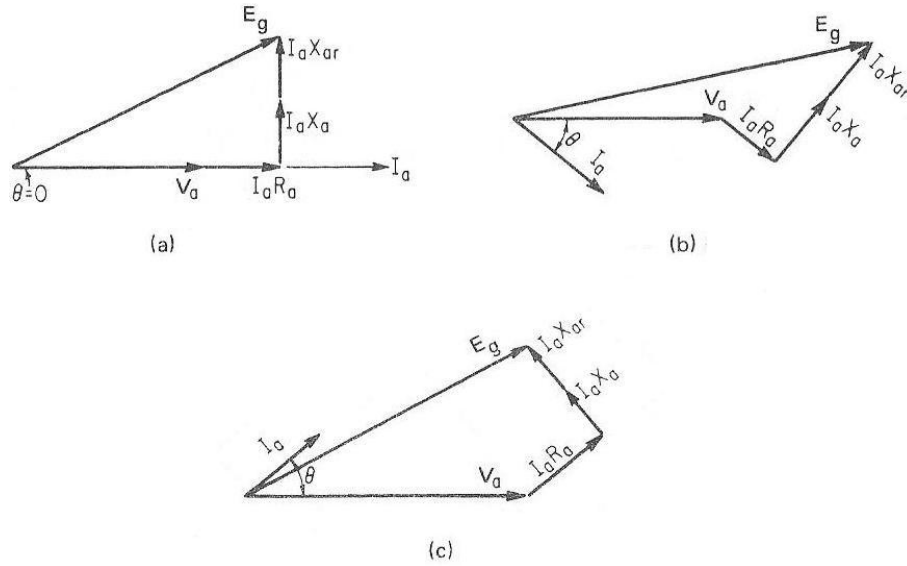


Figura 5.2: Diagramas fasoriais que representam a relação entre a f.e.m. gerada, E_g e a tensão medida nos terminais da máquina, V_a , para os três tipos de cargas: a) com factor de potência unitário, b) indutivas e c) capacitivas.[7]

atraso relativamente à tensão V_a e o factor de potência em avanço, característica das cargas capacitivas, quando a corrente alternada no induzido, I_a , por fase está em avanço relativamente à tensão V_a . Para compreender a relação entre E_g e V_a em função do factor de potência, são utilizados diagramas fasoriais. Estes representam, através de fasores, a amplitude e o desfasamento entre as várias grandezas. A figura 5.2 representa os diagramas fasoriais correspondentes às situações descritas.

Para facilitar a sua compreensão, é importante ter em conta que:

- a queda de tensão no enrolamento do induzido, $R_a I_a$, está sempre em fase com a corrente I_a ;
- a queda de tensão na reactância do enrolamento, $jX_a I_a$, está sempre em avanço 90° (quadratura) em relação á corrente I_a , uma vez que a corrente se atrasa 90° em relação à tensão num circuito que possua apenas reactância indutiva, como sucede no estator do gerador;
- a queda de tensão devida á reacção do induzido, $jX_{ar} I_a$, está sempre em fase com $jX_a I_a$.

Para cargas com factor de potência unitário, figura 5.2a), com $\cos\theta = 1$, resulta que $\theta = 0$, assim, por definição I_a está em fase com a tensão dos terminais V_a . Aplicando conceitos trigonométricos, tendo por base os diagramas fasoriais e os termos definidos na equação 5.3, a equação do gerador é dada por:

$$E_g = (V_a + R_a I_a) + j(X_a I_a + X_{ar} I_a) \quad (5.4)$$

5 Gerador Síncrono

Comparando as equações 5.3 e 5.4, verifica-se que a expressão é a mesma, a única diferença é o facto de o membro da reacção do induzido, E_{ar} , assumir um valor positivo. Conclui-se que a tensão nos terminais por fase, V_a , é menor que a f.e.m. E_g .

Para simplificar a expressão anterior, é definida a *reactância síncrona* X_s , da seguinte forma:

$$X_s = X_a + X_{ar} \quad (5.5)$$

ou seja, reescrevendo a equação 5.4:

$$E_g = (V_a + R_a I_a) + j X_s I_a \quad (5.6)$$

Na prática, a grande maioria das cargas aplicadas são indutivas, caracterizando-se por um factor de potência em atraso. Dito de outra forma, a corrente da fase I_a , está em atraso em relação à tensão nos terminais, V_a , de um ângulo θ , como se representa na figura 5.2b). De forma semelhante ao raciocínio anterior, resulta:

$$E_g = (V_a \cos\theta + R_a I_a) + j(V_a \sin\theta + X_s I_a) \quad (5.7)$$

se a corrente I_a está em avanço em relação à tensão V_a , de um ângulo θ , com base na figura 5.2c) vem:

$$E_g = (V_a \cos\theta + R_a I_a) + j(V_a \sin\theta - X_s I_a) \quad (5.8)$$

neste caso, a tensão nos terminais por fase, V_a , é maior que a f.e.m. E_g . [14, 7]

5.1.2 Circuito Equivalente Trifásico

Tendo em conta os conceitos referidos anteriormente, é agora possível compreender o circuito equivalente para o gerador trifásico. Considere-se a situação mais usual, em que a carga aplicada é indutiva, com um factor de potência em atraso.

Nos circuitos trifásicos, o valor da tensão e da corrente estão desfasados 120° e as três fases são idênticas.

O circuito equivalente trifásico é o representado na figura 5.3. Esta representa uma fonte de tensão dc, V_{exc} , que alimenta o rotor, o seu enrolamento, tal como acontece no estator, é caracterizado por uma resistência, R_{exc} e por uma reactância, neste caso indutiva, X_{exc} . Existe ainda um reóstato, R_{aj} , para permitir ajustar a corrente de excitação I_{exc} . O restante circuito equivalente, consiste no modelo descrito na figura 5.1, para cada fase.

Note-se que, considerando a carga indutiva, o efeito da reacção do induzido do estator, X_{ar} , e da reactância indutiva do estator, X_a , estão implícitos na reactância síncrona, X_s .

As três fases podem estar ligadas em estrela ou em triângulo, segundo a figura 5.4. Na ligação em estrela, V_a corresponde à tensão simples ou de fase, esta representa em cada fase a queda de tensão entre a fase e o neutro. A tensão composta, V_C , corresponde à queda de tensão entre os condutores de fase. A corrente que circula na linha e na fase é a mesma, I_a .

$$V_C = \sqrt{3}V_a \quad (5.9)$$

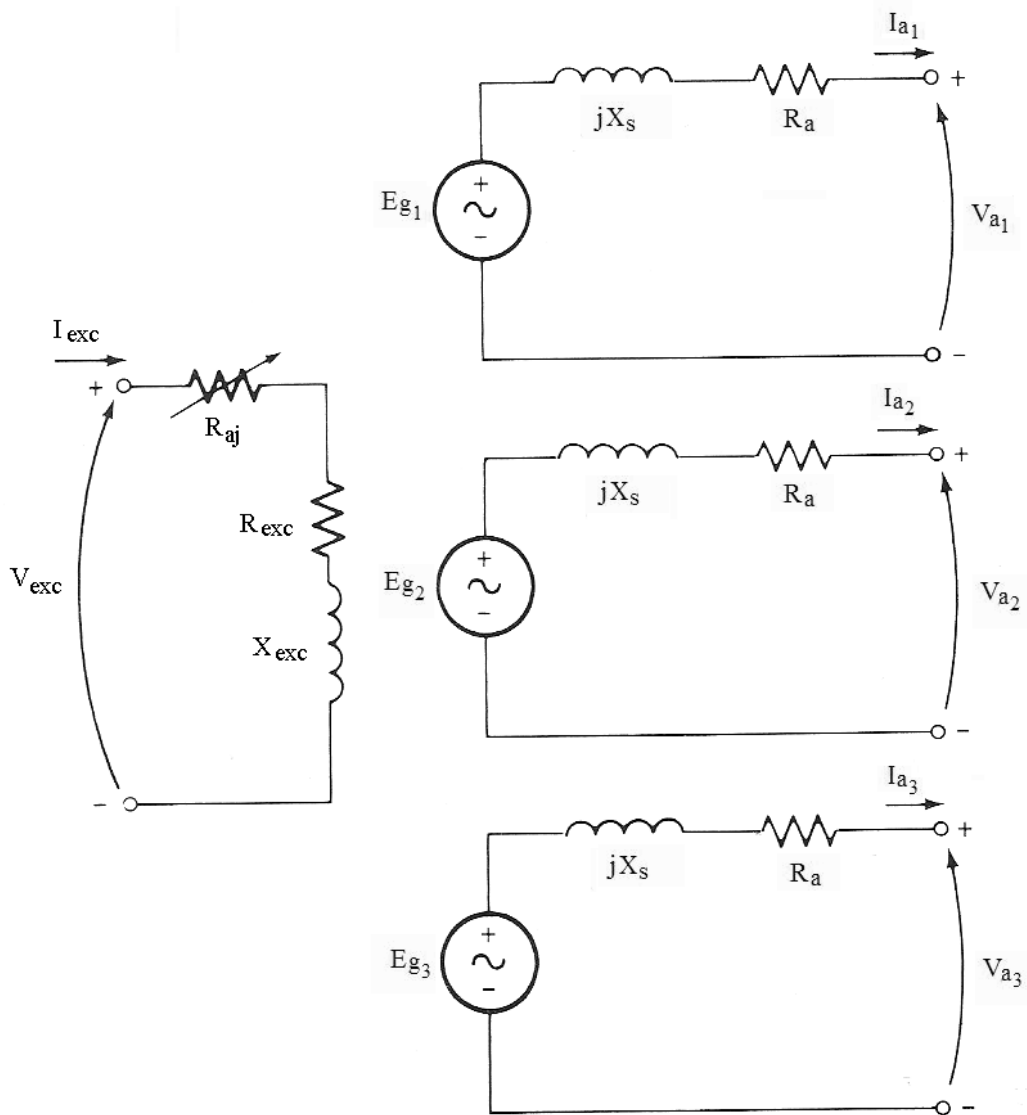


Figura 5.3: Circuito equivalente do gerador síncrono trifásico, constituído pelas três fases. Representação do circuito de excitação do indutor (rotor), alimentado por uma tensão dc V_{exc} . [15]

5 Gerador Síncrono

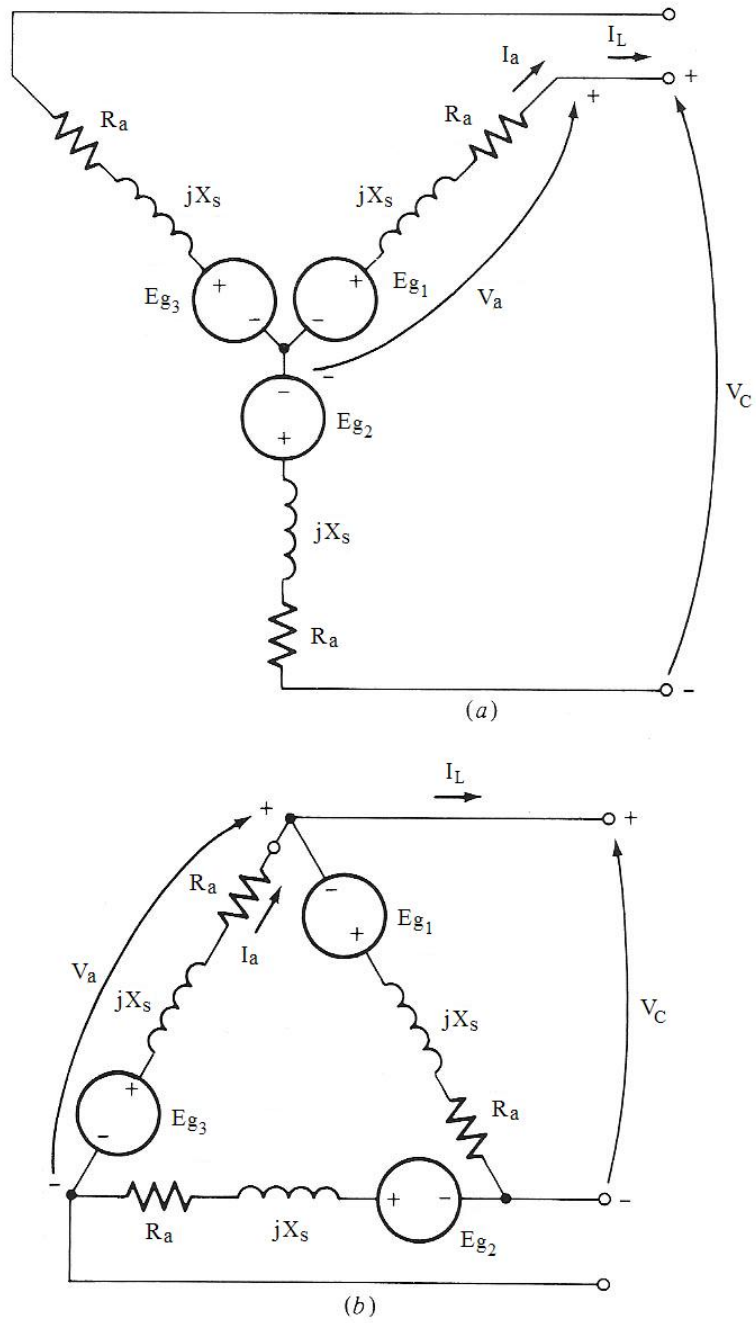


Figura 5.4: Circuito equivalente do gerador síncrono trifásico, a) ligação em estrela e b) ligação em triângulo.[15]

Na ligação em triângulo, é importante definir a corrente que circula na linha, I_L e a corrente na fase, I_a .

$$I_L = \sqrt{3}I_a \quad (5.10)$$

Neste caso não é relevante fazer a distinção entre tensão simples, V_a e tensão composta V_C , dado que estas correspondem à mesma queda de tensão. É importante definir a corrente que circula na linha, I_L e a corrente na fase, I_a . [15, 16]

5.2 Características de Funcionamento

O método da reactância síncrona permite determinar a grandeza X_s , com base no ensaio do gerador síncrono em vazio e em curto-circuito. Conhecidos os resultados dos ensaios experimentais e o valor da reactância síncrona, determina-se a tensão nos terminais da máquina e posteriormente a regulação de tensão, $R\%$.

5.2.1 Método da Reactância Síncrona, Ensaio em Vazio e em Curto-circuito

O ensaio em vazio ou em circuito aberto permite determinar a f.e.m. gerada por fase, E_g , em função da corrente de excitação que circula no circuito do rotor, I_{exc} , estando a máquina a rodar à velocidade nominal (de sincronismo). Para realizar este ensaio, é ligado um amperímetro ao circuito indutor para medir a corrente de excitação, I_{exc} e um voltímetro entre quaisquer dois terminais do circuito induzido, medindo a tensão composta entre terminais, V_C . Através da equação 5.9 calcula-se a tensão simples V_a , que neste caso é igual à f.e.m. gerada por fase, E_g .

O ensaio em curto-circuito permite determinar, em função da corrente de excitação, I_{exc} , a corrente que circula no enrolamento do induzido, I_a , mantendo a máquina primária a rodar à velocidade síncrona. À semelhança do caso anterior, para realizar este ensaio é ligado um amperímetro ao circuito indutor para medir a corrente de excitação, I_{exc} . Para medir a corrente que circula no enrolamento do induzido, I_a , coloca-se um amperímetro numa das fases. Considerando que as bobinas do estator estão ligadas em estrela, a corrente de linha, I_L e na fase, I_a , são iguais. Na prática, para determinar I_a , é usual colocar três amperímetros, um por cada fase, fazendo posteriormente a média das correntes obtidas.

As curvas características do ensaio em vazio e em curto-circuito por fase, são as representadas na figura 5.5. Verifica-se para o ensaio em vazio uma zona linear, cuja tangente coincide com a recta do entreferro, para baixos valores de corrente de excitação e uma zona de não linearidade para valores mais elevados. Nesta zona, quando o fluxo magnético excede um determinado valor limite, resulta a saturação do ferro. No ensaio em curto-circuito a característica é linear, independentemente do valor da corrente de excitação. Para compreender esta linearidade veja-se a equação 5.7, para cargas com factor de potência em atraso. Eliminando na equação o parâmetro V_a , vem:

$$E_g = R_a I_a + j X_s I_a \quad (5.11)$$

5 Gerador Síncrono

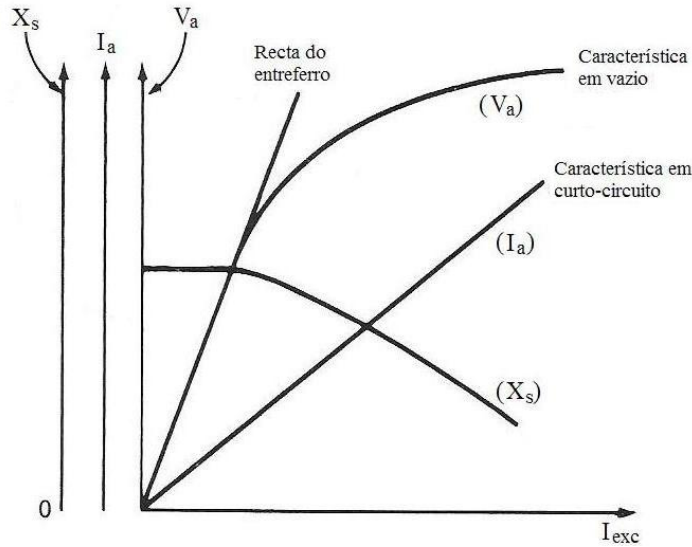


Figura 5.5: A característica em vazio determina em função da corrente de excitação I_{exc} , a f.e.m. E_g , igual á tensão nos terminais, V_a . A característica de curto-circuito, determina em função de I_{exc} a corrente do induzido I_a . A reactância síncrona X_s , é função dos parâmetros anteriores.[15]

Note-se que, desprezando a resistência do condutor, a tensão nos terminais V_C é zero e consequentemente V_a .

Como a reactância síncrona assume valores muito superiores, quando comparada com a resistência interna do induzido, R_a , é uma prática usual desprezar este último parâmetro, assim a equação 5.11 é simplificada:

$$E_g = X_s I_a \Leftrightarrow X_s = \frac{E_g}{I_a} \quad (5.12)$$

Para um valor fixo de corrente de excitação, I_{exc} , determina-se a f.e.m. E_g do ensaio em vazio e a corrente no induzido, I_a , do ensaio em curto-circuito. Determinados estes dois valores, calcula-se a reactância síncrona, X_s .

Caso não se queira desprezar a resistência interna, R_a , é possível determina-la realizando um procedimento simples. Fazendo circular uma pequena corrente contínua entre dois terminais do estator, mede-se o valor da tensão contínua e da corrente, a resistência é determinada pela fórmula $V = 2R_a I$. Note-se que, estando o estator ligado em estrela, a queda de tensão dá-se em duas bobinas do estator, daí o facto de se considerar que a resistência total é $2R_a$. Determinada a resistência R_a , utiliza-se a equação 5.11 descrita anteriormente.

A utilização do método da impedância síncrona tem implícita uma aproximação que se prende com a zona de saturação descrita no ensaio em vazio. Considerando R_a desprezável, a reactância síncrona, X_s , dada na equação 5.12, é função da f.e.m. gerada, E_g , a dividir pela corrente que circula no induzido, I_a . para reduzidos valores de corrente

de excitação, I_{exc} , quando as características são lineares, pela fórmula, X_s é constante. Assim, para uma dada corrente de excitação, a f.e.m. E_g determinada experimentalmente no ensaio em vazio é igual à f.e.m. em curto-circuito. Na zona de saturação, como a característica do ensaio em vazio perde linearidade, a reactância síncrona, X_s , para os dois ensaios é ligeiramente diferente. Ou seja, o valor da f.e.m. E_g medida no ensaio em vazio, considerada válida na situação de curto-circuito, sofre na verdade uma aproximação.[15, 7, 17]

5.2.2 Funcionamento em Carga

Descritos os ensaios experimentais em vazio e curto-circuito do gerador síncrono, é agora possível descrever o funcionamento do dispositivo em função da carga aplicada aos seus terminais. Como foi descrito na secção 5.1.1, os parâmetros que caracterizam o gerador dependem do tipo de carga aplicada (indutiva ou capacitiva) e do factor de potência.

Normalmente as cargas são alimentadas pelo gerador a tensão constante, assim, pretende-se nesta análise que V_a seja uma grandeza de valor constante. Para isso é necessário regular a corrente de excitação, I_{exc} , que irá condicionar a f.e.m. E_g . A velocidade da máquina primária é fixa, com velocidade de sincronismo, assume-se ainda que para uma dada carga, o factor de potência é constante. Recorrendo à equação 5.7, para o caso da carga indutiva, são constantes as grandezas: factor de potência, $\cos\theta$, (consequentemente $\sin\theta$) pois a carga é fixa, a reactância síncrona, X_s , como se verificou na secção 5.2.1, tensão nos terminais da máquina, V_a , pelos motivos descritos anteriormente e a resistência do induzido, R_a . Esta última, como já foi referido, pode ser desprezada, bastando para isso igualar o valor a zero.

Da equação 5.7 resultam como variáveis: corrente no induzido, I_a e a f.e.m. gerada, E_g . Através da equação determina-se qual a f.e.m. necessária para manter a tensão V_a constante, em função da corrente I_a .

O gráfico da figura 5.6 exemplifica, para diferentes factores de potência, a f.e.m. E_g necessária para manter a tensão nos terminais da máquina ($V_a = 2660V$), a uma dada corrente no induzido ($I_a = 125A$). Verifica-se que quanto mais baixo for o factor de potência em avanço, maior será o acréscimo de tensão desde o vazio, E_g , até à plena carga (visualizar a inclinação da curva). Por outro lado, quanto mais baixo for o factor de potência em atraso, maior a diminuição de tensão desde o vazio, E_g , até à plena carga. Para o factor de potência unitário, a tensão aos terminais ainda apresenta uma queda quando a carga aplicada é puramente resistiva.

Nesta análise estão implícitas algumas hipóteses. O funcionamento do gerador com tensão V_a constante, só é possível através da regulação da corrente de excitação, I_{exc} . Acontece que, esta variação de corrente altera ligeiramente o factor de potência. Para o efeito despreza-se esta pequena variação.

Para determinar em percentagem a relação entre a f.e.m. gerada, E_g e a tensão nos terminais V_a , vem:

$$R\% = \frac{E_g - V_a}{V_a} \cdot 100 \quad (5.13)$$

Este parâmetro é denominado *regulação de percentagem* e é usualmente calculado em

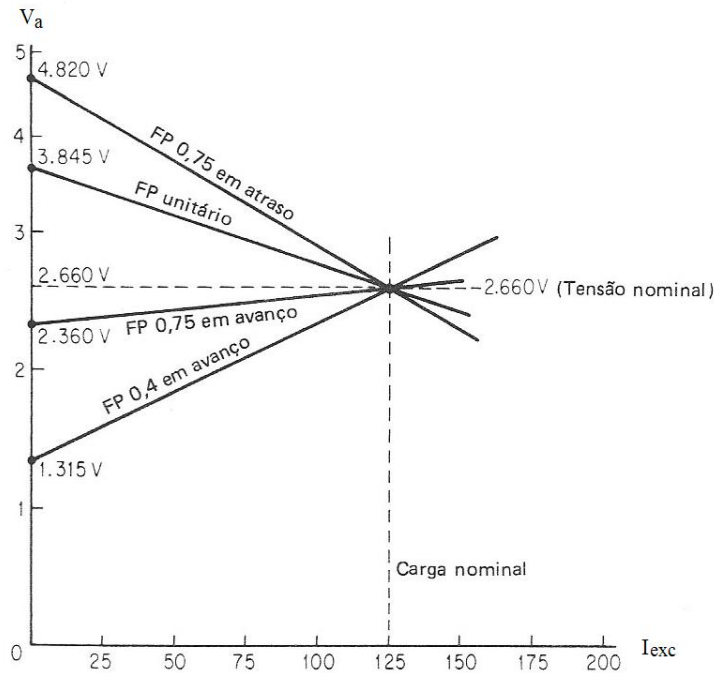


Figura 5.6: F.e.m. necessária para manter a tensão nos terminais ($V_a = 2660V$), a uma dada corrente no induzido ($I_a = 125A$), para vários factores de potência.[7]

valores por fase.[15, 7, 17]

5.3 Potência Activa e Reactiva

A máxima potência que o gerador síncrono pode fornecer está condicionada pelo binário mecânico máximo que a máquina primária pode disponibilizar ao gerador, sem perda de velocidade de sincronismo.

Nesta análise considere-se desprezável a resistência do enrolamento, R_a , cujo valor é muito pequeno relativamente à reactância síncrona. Considere-se ainda a aplicação de uma carga indutiva, ou seja, com a corrente desfasada em atraso relativamente á tensão nos terminais. Com base nestas condições, o circuito equivalente e o diagrama fasorial por fase são os representados na figura 5.7 e 5.8 respectivamente. Note-se que o circuito equivalente da figura 5.7, corresponde a uma versão simplificada do circuito da figura 5.1. Assim, a equação 5.3 é apresentada da seguinte forma:

$$V_a = E_g + jX_s I_a \Leftrightarrow I_a = \frac{E_g - V_a}{jX_s} \quad (5.14)$$

O diagrama fasorial da figura 5.8, corresponde a uma versão simplificada do diagrama da figura 5.2b). No diagrama, é possível observar o ângulo de desfasagem δ , entre a

5 Gerador Síncrono

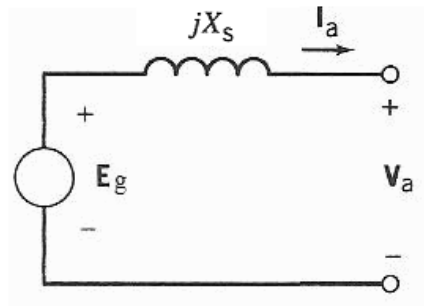


Figura 5.7: Circuito equivalente simplificado por fase. Despreza-se a resistência do induzido, R_a . [14]

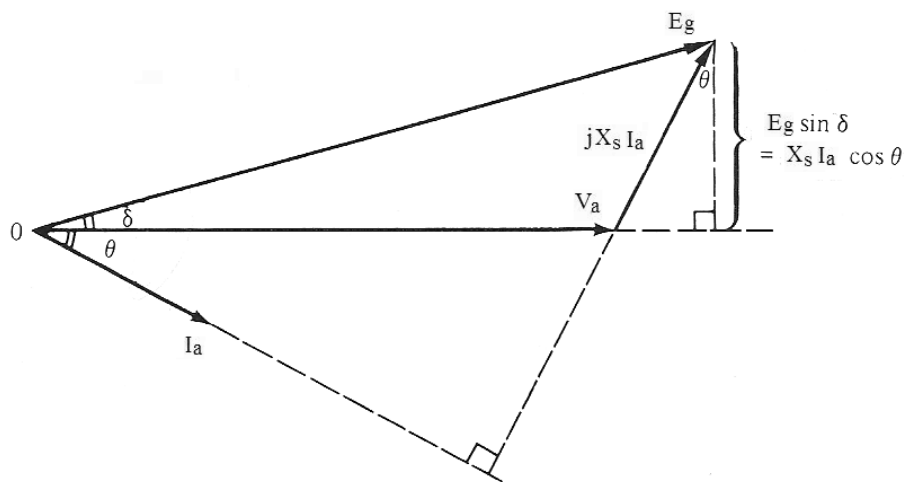


Figura 5.8: Diagrama fasorial simplificado para uma carga indutiva. Representação do ângulo de potência, obtido entre a tensão V_a e a f.e.m. gerada E_g . [15]

tensão V_a e a f.e.m. E_g , denominado *ângulo de potência*. Através deste ângulo, com base nos diagramas fasoriais, podem deduzir-se as seguintes equações:

$$E_g \sin \delta = X_s I_a \cos \theta \quad (5.15)$$

$$E_g \cos \delta = V_a + X_s I_a \sin \theta \quad (5.16)$$

Sabendo que a potência aparente S , fornecida pelo gerador à carga externa, é dada por:

$$S = P + jQ \quad (5.17)$$

as potências activa P e reactiva Q , são respectivamente:

$$P = V_a I_a \cos \theta \quad (5.18)$$

5 Gerador Síncrono

$$Q = V_a I_a \text{sen}\theta \quad (5.19)$$

substituindo as equações 5.15 e 5.16 nas equações 5.18 e 5.19 respectivamente vem:

$$P = \frac{E_g V_a}{X_s} \text{sen}\delta \quad (5.20)$$

$$Q = \frac{V_a}{X_s} (E_g \text{cos}\delta - V_a) \quad (5.21)$$

Dado que as expressões descritas são válidas para uma das fases, para o gerador trifásico, com as três fases equilibradas, multiplica-se a potência activa e reactiva por 3.

A potência activa máxima por fase ocorre quando o ângulo de potência, δ , é igual a $\pi/2$, assim:

$$P_{mx} = \frac{E_g V_a}{X_s} \quad (5.22)$$

O ângulo de potência, δ , não é uma variável de controlo, no entanto, este depende da f.e.m. E_g e consequentemente da corrente de excitação, I_{exc} . A potência reactiva, admitindo a tensão V_a constante, depende da diferença $E_g \text{cos}\delta - V_a$. O aumento da corrente de excitação, I_{exc} , permite aumentar o primeiro membro, $E_g \text{cos}\delta$, situação em que a máquina fica sobreexcitada e fornece potência reactiva, $E_g \text{cos}\delta > V_a$. [17, 14]

6 Controlo do Gerador Síncrono

O gerador síncrono pode ser controlado por meio de duas forças, a corrente de excitação I_{exc} e o binário mecânico M_{mec} . Variando uma destas forças, variam as quatro grandezas: potência activa P , potência reactiva Q , tensão nos terminais V_a e frequência f . Genericamente, o gerador síncrono pode ser representado por um sistema de duas entradas e quatro saídas, figura 6.1. Do ponto de vista do sistema, o ideal seria ter o número de entradas igual ao número de saídas, para que cada entrada controla-se uma e apenas uma das saídas, não influenciando as restantes. No gerador síncrono, tendo em conta o número de entradas e saídas do sistema, esse controlo não é possível. Acontece que, variando uma das entradas as quatro saídas são afectadas, ou seja, o controlo é iterativo. As entradas podem afectar as saídas em diferentes proporções, dependendo do tamanho da estrutura (rede) e do sistema (gerador).

As melhores condições de não-iteração ocorrem quando o tamanho da estrutura é muito superior ao sistema. No caso limite, a estrutura designa-se por *rede infinitamente forte*. Na realidade há muitas situações próximas deste conceito teórico. A rede infinitamente forte tem uma grande inércia relativamente ao gerador, assim a variação da entrada relativa ao momento M_{mec} , não produz uma variação significativa na velocidade do sistema, ou seja na frequência f . Por outro lado, a corrente de excitação I_{exc} não afecta a tensão nos terminais V_a .

Tendo em conta a figura 6.1, quando a rede é infinitamente forte, a frequência e a tensão nos terminais não são influenciadas pelas entradas, desta forma, o sistema fica reduzido a duas entradas e duas saídas. As grandezas f e V_a são impostas, estando fora do controlo das entradas do sistema. Neste caso, as condições de não-iteração, são praticamente satisfeitas. A corrente de excitação I_{exc} , afecta a potência reactiva Q , enquanto o momento M_{mec} afecta a potência activa P . Note-se que as relações entre I_{exc} e P são desprezáveis, o mesmo sucede entre M_{mec} e Q .

A rede infinitamente forte, descreve uma situação extrema na relação entre a estrutura e o sistema. Outra situação extrema diz respeito à utilização de um único gerador a

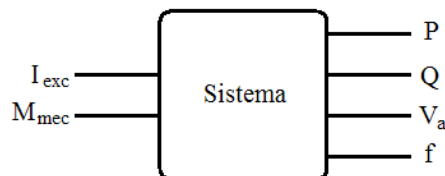


Figura 6.1: Representação genérica de um gerador síncrono por um sistema de duas entradas e quatro saídas.

alimentar uma carga. Esta situação é um pouco mais complexa, no sentido em que não há um sistema externo a controlar alguns dos parâmetros do sistema, este é mais iterativo. Por exemplo, considerando a carga com reactância indutiva (factor de potência em atraso), aumentando o momento M_{mec} , ocorre o aumento da velocidade de rotação do sistema, aumentando a frequência f . Este aumento de velocidade implica um aumento da força electromotriz induzida, e consequentemente da tensão aos terminais V_a . Esta variação de tensão afectará a potência activa P e reactiva Q . Este exemplo, que está de acordo com a figura 6.1, ilustra bem como a variação de uma das entradas do sistema afecta as quatro saídas.

Quando o gerador síncrono opera isoladamente, existe ainda a particularidade de a variação da potência activa e reactiva, que são função da carga aplicada ao gerador, variarem a tensão nos terminais da máquina e a frequência do conjunto. Na rede infinitamente forte o mesmo não se verifica, dado que a tensão aos terminais e a frequência são constantes, como descrito anteriormente.[18]

6.1 Operação do Gerador Síncrono Isoladamente

Nesta secção pretende-se descrever o funcionamento do gerador síncrono, quando este alimenta uma carga isolada. Para compreender de que forma a carga aplicada aos terminais da máquina afecta os parâmetros da mesma, veja-se o que acontece quando se aumenta a carga aplicada aos terminais. Considere-se para o efeito que a velocidade e a corrente de excitação são constantes. Considere-se ainda a resistência interna R_a desprezável.

O aumento da carga, aumenta a potência activa e/ou reactiva que o gerador disponibiliza à carga, assim como a corrente que circula no enrolamento do induzido, I_a . Como a corrente I_{exc} é um valor fixo, consequentemente o fluxo ϕ é constante, por outro lado, mantendo a velocidade mecânica fixa, a velocidade angular ω assume um valor constante. Pela equação 6.1, sendo K uma grandeza constante, a f.e.m. gerada, E_g é constante.

$$E_g = K\phi\omega \quad (6.1)$$

Tendo em conta esta informação e as considerações iniciais, é possível descrever, recorrendo aos diagramas fasoriais, as consequências do aumento da carga nos terminais do gerador. Para cargas indutivas, se for adicionada carga com o mesmo factor de potência, I_a aumenta mas com o mesmo ângulo θ em relação à tensão V_a . Consequentemente, a queda de tensão devida à reactância síncrona $jX_s I_a$ aumenta com o mesmo ângulo. Observando o diagrama fasorial da figura 6.2a), verifica-se que existe apenas uma situação em que a reactância síncrona é paralela à sua posição inicial. Nesta situação verifica-se a diminuição de tensão nos terminais do gerador, V_a .

Na situação em que o gerador alimenta uma carga com factor de potência unitário, fazendo um raciocínio semelhante ao caso anterior, através do diagrama fasorial da figura 6.2b) verifica-se que a tensão V_a diminui com o aumento de carga, mas de forma muito menos acentuada relativamente ao caso anterior. Se o gerador alimenta uma carga com factor de potência em atraso, com o aumento de carga a tensão nos terminais diminui significativamente, figura 6.2c).

6 Controle do Gerador Síncrono

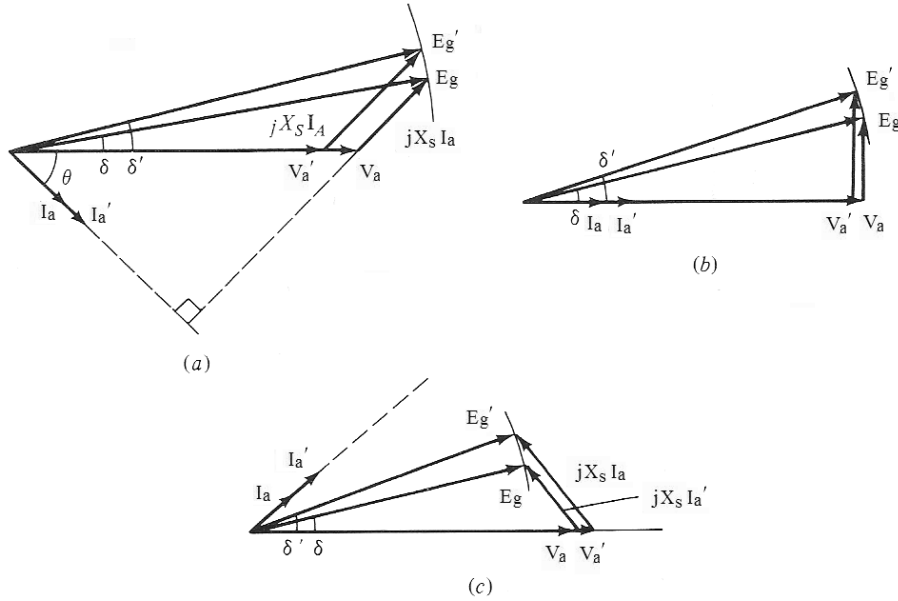


Figura 6.2: O aumento da carga aplicada ao gerador com factor de potência constante, varia a tensão nos terminais. a) factor de potência em atraso, b) unitário e c) em avanço.[15]

Na prática, os geradores alimentam as cargas com tensões constantes, independentemente do seu factor de potência e da corrente que estas fazem circular no enrolamento do induzido, I_a . Para isso, é necessário regular a corrente de excitação I_{exc} , através do reóstato R_{aj} , (figura 5.3). Para aumentar a tensão nos terminais, diminui-se a resistência R_{aj} que aumenta a corrente I_{exc} , por sua vez esta aumenta o fluxo ϕ , que aumenta a f.e.m. gerada E_g (equação 6.1). O aumento da f.e.m. gerada aumenta a tensão nos terminais, V_a (figura 5.6). O procedimento é semelhante para se diminuir a tensão nos terminais da máquina.[15]

6.2 Operação do Gerador Síncrono em Paralelo

A operação de geradores síncronos em paralelo é mais usual e vantajosa, relativamente à operação de um gerador isoladamente. Embora um único gerador de maior dimensão possibilite um rendimento maior quando carregado com a capacidade nominal, a utilização de várias unidades geradoras menores apresenta as seguintes vantagens:

- Se uma única unidade de geração de potência por qualquer motivo pára, por exemplo tem uma avaria ou necessita de manutenção, não é possível fornecer energia às cargas. Na ligação em paralelo, a paragem de um gerador é compensada pelos restantes;
- Para uma unidade geradora funcionar com rendimento máximo, esta deve ser

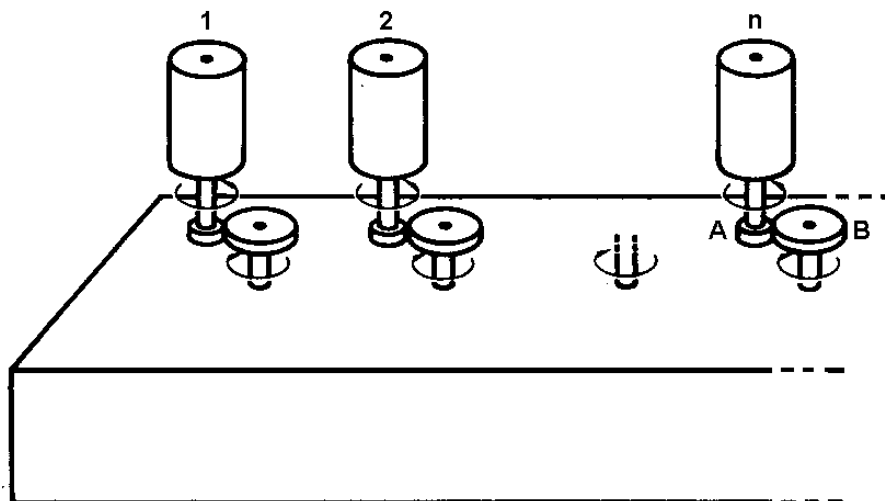


Figura 6.3: Analogia mecânica, representação de vários mecanismos interligados a uma caixa de engrenagens.[18]

carregada à carga nominal. Não é economicamente viável uma grande unidade geradora fornecer pequenas potências. Assim, é vantajosa a utilização de várias unidades de menor dimensão ligadas em paralelo, podendo ser adicionadas ou removidas conforme a necessidade do fornecimento de energia. Cada unidade mais pequena pode funcionar à sua capacidade nominal, ou próxima dela;

- Ao nível da manutenção, as intervenções nos geradores de menor dimensão são mais simples. É ainda possível nestes casos ter peças de reserva, para substituição;
- Na utilização de várias unidades geradoras em paralelo, existe a possibilidade de aumentar o sistema de geração gradualmente, consoante o aumento dos consumos, sem fazer um investimento demasiado elevado na fase inicial.[7]

6.2.1 Analogia Mecânica

A operação do gerador síncrono em paralelo pode ser exemplificada através de uma analogia mecânica. Esta permitirá compreender melhor a necessidade de fazer o sincronismo entre o gerador a integrar na rede e o restante sistema. Depois do gerador sincronizado é possível controlar o gerador de modo a fornecer ou receber energia da rede a que este se encontra ligado.

A figura 6.3 representa vários mecanismos que, por meio de uma caixa de engrenagens, accionam no seu todo uma carga mecânica (a carga não visível na figura). Admita-se que, inicialmente um dos mecanismos está desligado do sistema e pretende-se ligá-lo. Para fazer essa ligação, ou *sincronização* com o sistema em funcionamento, é necessário respeitar algumas condições:

6 Controle do Gerador Síncrono

- A roda dentada A , no mecanismo, deve rodar com velocidade igual à roda B do sistema e com sentidos apropriados;
- Os dentes das rodas devem ser coincidentes;
- As rodas dentadas devem ter uma posição relativa coincidente (fase).

Se as três condições anteriores forem respeitadas, a sincronização do novo mecanismo pode ser efectuada, bastando para isso juntar a respectiva engrenagem, neste caso a roda A e B .

Depois de realizada a sincronização, é possível controlar o momento, M_{mec} , de cada um dos mecanismos, de modo a fornecer potência ao sistema, ou receber potência do mesmo. Se o momento tende a aumentar a velocidade do sistema, então o mecanismo funciona como gerador, por outro lado, se o momento tende a desacelerar o sistema, o mecanismo funciona como motor.

Tal como acontece na analogia mecânica, para ligar um gerador a um sistema em funcionamento é necessário respeitar algumas condições:

- A velocidade do gerador deve ser igual à do sistema, ou seja, devem ter a mesma frequência;
- Os valores da tensão eficaz, do gerador e do sistema, devem ser os mesmos;
- A sequência de fases deve ser a mesma;
- As fases devem ter o mesmo ângulo.

Se estas condições não forem minimamente respeitadas, o gerador pode ser danificado. Se as tensões entre os condutores do gerador e do sistema, não são as mesmas quando estes são sincronizados, surgem correntes indesejadas, devidas à diferença de potencial. Estas condições são asseguradas por um dispositivo designado *sincronizador*. [18]

6.2.2 Controle da Frequência-Potência Activa e Tensão-Potência Reactiva

Quando uma carga é ligada ao gerador, suposto em vazio, com tensão e velocidade nominal, a corrente no induzido I_a , dá lugar a um binário resistente M_{res} , no eixo da máquina síncrona. Este tem sentidos oposto ao do movimento, pelo que, tende a desacelerar o rotor. Dado que a frequência é proporcional à velocidade do rotor, a mesma vai baixar. Este efeito é corrigido aumentando o binário motor da máquina primária.

Ao aumento do binário motor corresponde um aumento da potência mecânica, P_{mec} desenvolvida:

$$P_{mec} = M_{res}n \quad (6.2)$$

Note-se que n representa a velocidade de rotação, que na grande maioria das aplicações tem que ser praticamente constante, para manter a frequência no seu valor de referência.

Em termos energéticos, a potência activa fornecida pelo gerador, igual à potência activa requerida pela carga, é assegurada pela máquina primária que aumenta o binário

6 Controlo do Gerador Síncrono

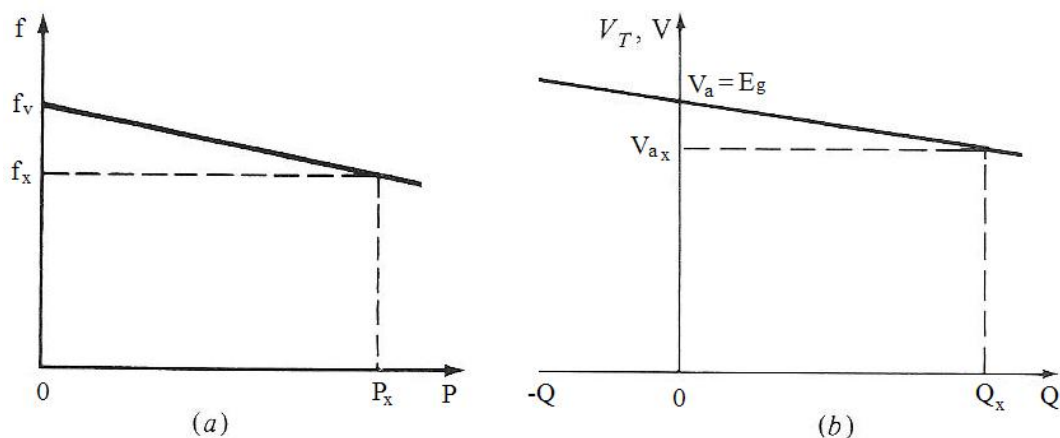


Figura 6.4: Controlo da frequência-potência activa feito através de um regulador de velocidade, que permite um pequeno decréscimo da frequência em função do aumento de P . O controlo da tensão-potência reactiva, feito através de um regulador de tensão, permite um pequeno decréscimo de V_a em função de Q . [17]

mecânico desenvolvido para compensar o aumento do binário resistente, M_{res} . Este desiderato, é na prática assegurado por *reguladores de velocidade*. Através da equação anterior, depreende-se que regulando a velocidade é possível controlar a potencia mecânica P_{mec} que é necessário desenvolver para compensar o binário resistente M_{res} .

A ligação de uma carga origina também uma variação de tensão nos terminais do gerador, devida à reactância síncrona da máquina. Esta tem de ser compensada por uma variação da corrente de excitação I_{exc} , que tem implícita uma variação da f.e.m. gerada E_g . Este desiderato é assegurado por *reguladores de tensão*. Os reguladores de tensão, são de facto reguladores de tensão-potência reactiva, que pode ser fornecida ou consumida pelo gerador. Os reguladores de velocidade e tensão são genericamente designados por *mecanismos de governo*.

Independentemente do tipo de máquina primária que acciona o gerador, sempre que aumenta o binário resistente M_{res} , devido ao aumento de carga, a velocidade do dispositivo tende a diminuir. O binário e a velocidade da máquina primária variam inversamente e de forma não linear. Os reguladores de velocidade actuam de modo a manter a velocidade do dispositivo praticamente constante e linear, independentemente da potência fornecida pelo gerador. Na verdade, os reguladores de velocidade não fixam o valor da velocidade, estes permitem um pequeno decréscimo da velocidade do dispositivo à medida que aumenta a potência fornecida, como se verifica na figura 6.4a). Na figura é ilustrada a relação entre a frequência e a potência activa; note-se que a frequência e a velocidade são directamente proporcionais, em função do número de pólos do gerador. A inclinação da recta, SD (*speed droop*) é de aproximadamente 2 a 4%, podendo ser determinada pela

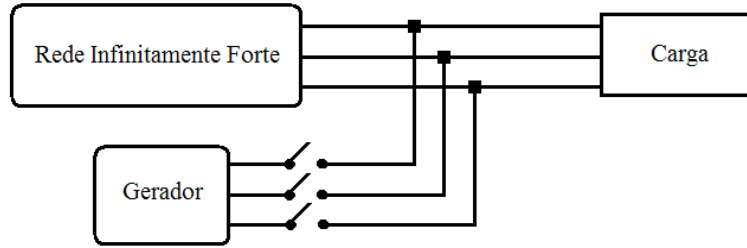


Figura 6.5: Gerador síncrono ligado em paralelo com uma rede infinitamente forte, a alimentar uma carga.

equação:

$$SD = \frac{f_v - f_x}{f_x} \times 100\% \quad (6.3)$$

A frequência f_v , representa o valor da grandeza em vazio, f_x é a frequência num ponto genérico x . Os reguladores de velocidade, através de um *set point*, permitem ajustar a frequência f_v , fazendo subir ou descer a característica do gráfico da figura 6.4a). A configuração da figura 6.4a), é uma característica essencial na operação de geradores em paralelo. Este aspecto será descrito detalhadamente, numa fase posterior deste capítulo.

A relação frequência-potência activa descrita, é similar à relação tensão-potência reactiva. Como foi descrito na secção 5.2.2, para cargas em atraso a tensão aos terminais V_a diminui, para cargas em avanço a tensão aos terminais aumenta. A característica entre a tensão V_a e a potência reactiva Q pode não ser linear, no entanto, os reguladores de tensão tornam-na linear e praticamente constante, figura 6.4b). A relação tensão-potência reactiva, pode ser equacionada de forma semelhante à equação 6.3.

Quando o gerador síncrono alimenta uma carga isoladamente, a potência total fornecida à carga, que é a soma da potência activa P e da potência reactiva Q , corresponde à potência total exigida pela carga. Note-se que P e Q não são parâmetros definidos pelos mecanismos de governo, sendo definidos pela própria carga. A variação do *set point* do regulador de velocidade irá controlar a frequência do dispositivo, enquanto a variação do *set point* do regulador de tensão varia a apenas a tensão nos terminais V_a . Quando o gerador opera em paralelo, a regulação do *set point* permite definir a potência activa e reactiva que cada gerador fornece à carga.[15, 17]

6.2.3 Operação em Paralelo com Rede Infinitamente Forte

Quando um gerador é sincronizado a uma rede infinitamente forte, a rede é tão extensa relativamente ao gerador que a tensão V_a e a frequência f não variam, independentemente da potência activa e reactiva que está a ser consumida pelas cargas.

Analise-se a situação em que, um gerador ligado em paralelo com uma rede infinitamente forte, alimentam uma carga, figura 6.5. Considere-se que o gerador possui um regulador de velocidade, mas a corrente de excitação I_{exc} é mantida constante pelo reóstato de ajuste R_{aj} (não tem regulador de tensão).

6 Controle do Gerador Síncrono

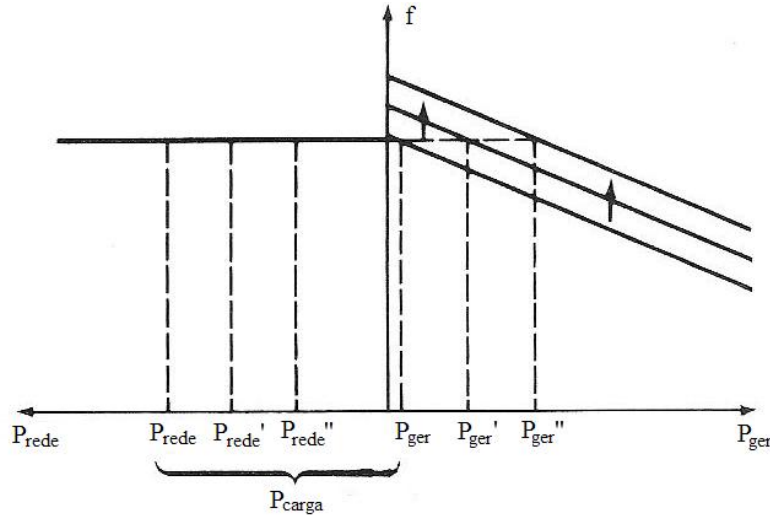


Figura 6.6: Através do ajuste do *set point* do regulador de velocidade regula-se f , controlando a potência fornecida pelo gerador P_{ger} . Sendo a potência consumida pela carga P_{carga} constante, a potência que não é fornecida pelo gerador, é assegurada pela rede infinitamente forte P_{rede} . [15]

Depois de sincronizar o gerador com a rede, este nem fornece nem absorve potência, ou seja, o dispositivo flutua na rede. Nesta situação, a frequência da rede e a frequência em vazio f_v , são iguais. Aumentando o *set point* do regulador de velocidade, a frequência em vazio aumenta. De acordo com a figura 6.6, o gerador fornece potência activa à carga. Inicialmente a rede fornece a potência activa P_{rede} e o gerador fornece P_{ger} , depois da alteração passa a fornecer P'_{rede} e P'_{ger} , respectivamente. Aumentando novamente o *set point*, o gerador aumenta a potência activa fornecida à carga, passando para P''_{ger} . Conclui-se que regulando o *set point*, controla-se a potência activa fornecida pelo gerador à carga. Sendo que a carga consome a mesma potência, a potência que não é fornecida pelo gerador é assegurada pela rede infinitamente forte. Estando o dispositivo a flutuar na rede, diminuindo o *set point* do regulador de velocidade, a máquina síncrona funciona como motor, consumindo a potência activa necessária para manter a frequência da rede.

A figura 6.7 representa o diagrama fasorial, correspondente ao procedimento descrito anteriormente. No diagrama verifica-se que a f.e.m. E_g é constante, dado que a velocidade e a corrente de excitação são mantidas constantes (equação 6.1). A potência activa gerada P_{ger} é proporcional á grandeza $E_g \sin \delta$, pela equação 5.20. O aumento de potência, implica um aumento da corrente que circula no induzido, I_a , que por sua vez esta aumenta a queda de tensão devida à reactância síncrona $jX_s I_a$.

Em relação à potência reactiva, o gerador síncrono pode consumi-la ou fornecê-la, dependendo da corrente de excitação I_{exc} (secção 5.3). Tanto a geração como o consumo de potência reactiva, são limitados pela máxima corrente de excitação I_{exc} ou pelo enrolamento do induzido I_a . Quando subexcitado, o gerador consome potência reactiva, dito de

6 Controlo do Gerador Síncrono

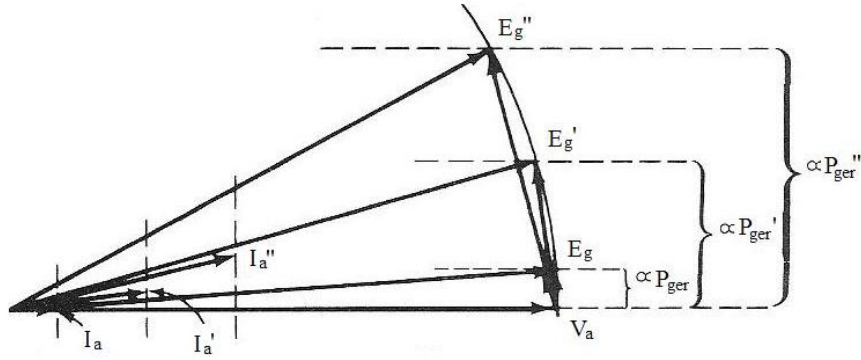


Figura 6.7: Diagrama fasorial que ilustra, através de fasores, o aumento da potência activa gerada P_{ger} . [15]

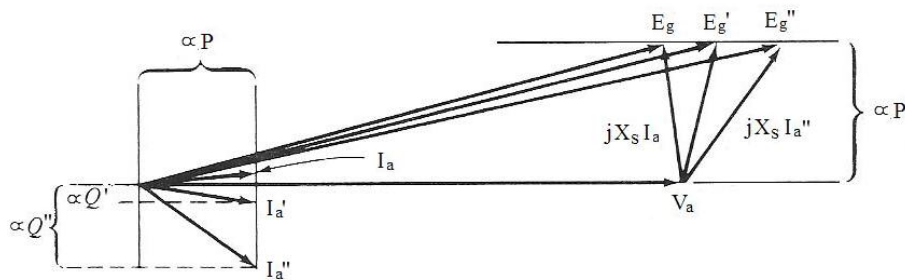


Figura 6.8: Diagrama fasorial que ilustra, através de fasores, a variação de potência reactiva Q , mantendo a potência P fixa. [15]

outra forma, o gerador fornece potência reactiva negativa $-Q$, figura 6.4b). Aumentando a corrente de excitação, o gerador passa a fornecer potência reactiva positiva Q .

Considere-se que a potência fornecida pelo gerador, ligado à rede infinitamente forte, é constante e que se varia a corrente I_{exc} através do *set point* do regulador de tensão. Tendo em conta que a potência activa é constante, $I_a \cos \theta$ e $E_a \sin \delta$ pelas equações 5.18 e 5.20, são igualmente constantes. Como a corrente de excitação aumenta, conseqüentemente aumenta a f.e.m. gerada E_g , o fasor que representa esta grandeza desloca-se ao longo de uma linha horizontal, dado que $E_a \sin \delta$ é constante, diagrama fasorial da figura 6.8. Como a tensão nos terminais V_a é imposta pela rede, o ângulo de $jX_s I_a$ altera-se, implicando a alteração do ângulo e da amplitude da corrente induzida I_a . Pela equação 5.19, a potência reactiva aumenta com o aumento de $I_a \sin \theta$.

Em suma, quando um gerador síncrono está ligado em paralelo a uma rede infinitamente forte, a tensão aos terminais V_a e a frequência f são controlados pela própria rede. O controlo do *set point* do regulador de velocidade permite controlar a potência activa P fornecida pelo gerador à carga. Controlando o *set point* do regulador de tensão, controla-se a potência reactiva Q fornecida pelo gerador ao sistema. [15, 17]

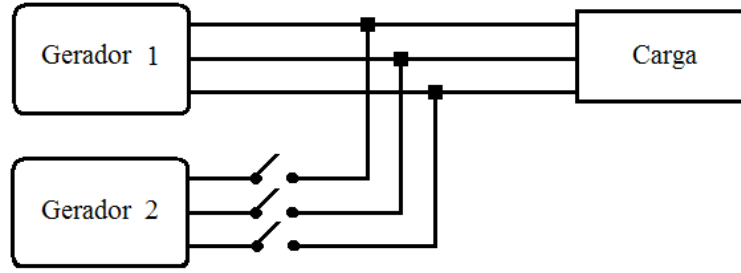


Figura 6.9: Esquema de dois geradores síncronos semelhantes, ligados em paralelo, a alimentar uma carga.

6.2.4 Operação em Paralelo com Gerador Semelhante

Nesta secção observa-se o que acontece quando são regulados os *set point's* dos mecanismos de governo, quando dois geradores semelhantes estão ligados em paralelo. Considere-se a figura 6.9, em que um gerador 2 está ligado em paralelo com o gerador 1, idêntico ao anterior.

Nesta situação, a potência activa e reactiva total pedida pela carga ao par de geradores é igual ao total da potência activa e reactiva fornecida pelos dois geradores. A potência activa total P_{total} é dada por:

$$P_{total} = P_{carga} = P_{ger1} + P_{ger2} \quad (6.4)$$

a potência reactiva total Q_{total} é dada por:

$$Q_{total} = Q_{carga} = Q_{ger1} + Q_{ger2} \quad (6.5)$$

Suponha-se que inicialmente o gerador 1 alimenta a carga, estando o gerador 2 apenas sincronizado com o sistema. Nesta situação, a potência total P_{total} , é igual à potência fornecida pelo gerador 1, P_{ger1} , enquanto P_{ger2} é igual a zero. Aumentando o *set point* do regulador de velocidade do gerador 2, aumenta a potência fornecida por este gerador à carga P_{ger2} , sendo P_{total} constante para uma carga fixa, a potência fornecida pelo gerador 1, P_{ger1} diminui. Analisando a característica da figura 6.10, verifica-se que a frequência do conjunto aumenta. Note-se que é fundamental para haver sincronismo, que os dois geradores funcionem com a mesma frequência.

Em suma, o aumento do *set point* do regulador de velocidade aumenta a frequência do sistema, aumenta a potência activa fornecida à carga por esse gerador e diminui a potência activa fornecida à carga pelos restantes geradores.

Fazendo um raciocínio semelhante, aumentando o *set point* do regulador de tensão do gerador 2, que inicialmente se encontra a flutuar no sistema, aumenta a corrente de excitação I_{exc} . Consequentemente, aumenta a tensão no sistema, aumenta a potência reactiva fornecida à carga pelo gerador 2 e diminui a potência activa fornecida à carga pelo gerador 1.

Como do ponto de vista das cargas, na grande maioria das situações é necessário manter a frequência e a tensão aos terminais V_a constante, é relevante descrever o procedimento

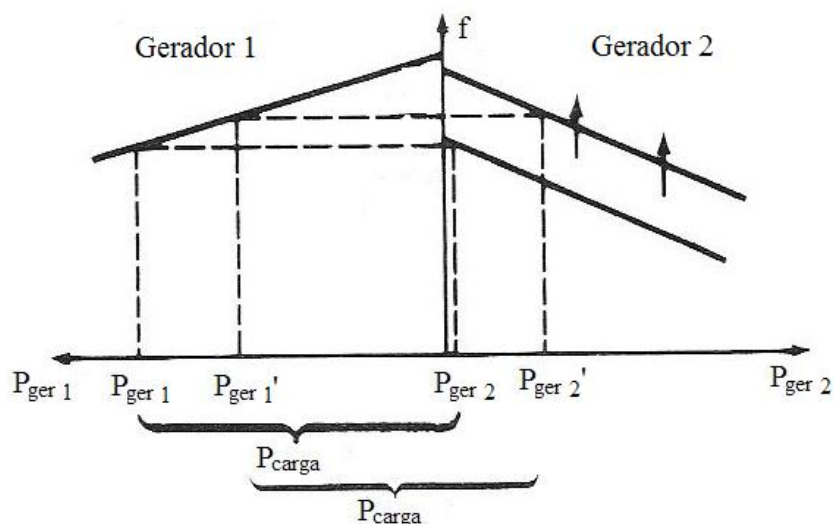


Figura 6.10: Aumentando o *set point* do regulador de velocidade do gerador 2, aumenta a potência fornecida por este gerador, $P_{ger\ 2}$ e diminui a potência fornecida pelo gerador 1, $P_{ger\ 1}$. [15]

necessário para regular a potência fornecida pelos geradores, sem variar estas grandezas. Alterando em simultâneo os mecanismos de governo dos dois geradores é possível manter a potência activa, fornecida por cada gerador constante, variando a frequência, ou variar a potência mantendo a frequência constante.

Para ajustar a potência activa fornecida por cada gerador, mantendo constante a frequência, aumenta-se o *set point* do gerador que se pretende que aumente o fornecimento de potência e diminui-se o *set point* do outro gerador. Para ajustar a frequência do sistema, mantendo as potências fornecidas por cada gerador constante, aumenta-se ou diminui-se os *set point's* dos dois geradores, consoante se pretende aumentar ou diminuir a frequência, respectivamente.

Para ajustar a potência reactiva fornecida por cada gerador, mantendo constante a tensão V_a , aumenta-se o *set point* do gerador que se pretende que aumente o fornecimento de potência reactiva e diminui-se o *set point* do outro gerador. Para ajustar a tensão V_a do sistema, mantendo as potências reactiva fornecidas por cada gerador constante, aumenta-se ou diminui-se os *set point's* dos dois geradores, consoante se pretende aumentar ou diminuir a tensão aos terminais, respectivamente. [15, 17]

6.2.5 Mecanismos de Governo: Princípios de Funcionamento

Os mecanismos de governo utilizados nos geradores síncronos são: o regulador de tensão e o regulador de velocidade. Nesta secção, descreve-se de forma mais detalhada o funcionamento de cada um destes dispositivos.

Cada gerador síncrono dispõe de um regulador de velocidade que actua directamente no sistema de geração. Este tipo de regulação é designada por *controlo primário*. Em

6 Controlo do Gerador Síncrono

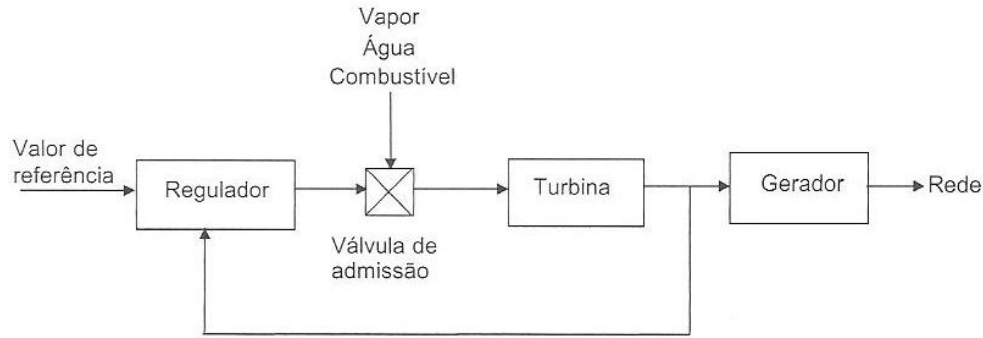


Figura 6.11: Representação esquemática de um sistema de regulação de velocidade de um gerador isolado que alimenta uma carga.[17]

grandes sistemas de geração, constituídos por vários geradores existe ainda o *controlo secundário*, efectuado a partir de centros de controlo distantes da zona de geração.

A figura 6.11 representa esquematicamente o sistema de regulação de velocidade de um gerador isolado que alimenta uma carga local. Na figura é possível visualizar o sistema de geração, constituído por uma turbina conectada a um gerador, que por sua vez fornece energia eléctrica a uma rede. A velocidade de rotação deste conjunto é medida por sensores e enviada para um regulador. Por sua vez, este compara a velocidade de rotação do conjunto, com um valor de referência previamente estipulado. Comparando estes valores, o regulador actua sobre a válvula de admissão de fluido. Esta operação permite variar a potência mecânica fornecida pela turbina ao gerador.

Um regulador de velocidade clássico, é o desenvolvido por *Watt* para a máquina a vapor, ilustrado na figura 6.12. As duas massas metálicas ligadas por uma mola rodam com velocidade proporcional à do conjunto, devido à força centrífuga, afastando-se tanto mais quanto maior a velocidade. Assim, o ponto *B* converte num movimento linear vertical, a velocidade de rotação do conjunto.

Tendo em conta a aplicação do dispositivo, o movimento da válvula de admissão requer uma força elevada, razão pela qual é utilizado um amplificador hidráulico. A energia necessária é fornecida pelo óleo sob pressão que actua sobre o pistão.

Considere-se que inicialmente o gerador alimenta uma carga isolada, rodando à velocidade nominal. Se esta diminuir, os pontos *B*, *C* e *D* deslocam-se para cima. A deslocação do ponto *D* faz subir os dois pistões de pequena dimensão, permitindo a admissão do óleo sobre pressão na parte superior do pistão principal, empurrando-o para baixo. Nestas condições a válvula de admissão abre, facilitando a passagem de fluido, e consequentemente a potência gerada aumenta.

Se o gerador estiver ligado a uma rede de grande potência, cuja frequência é sensivelmente constante e determina a velocidade de rotação, a posição do variador de velocidade corresponde de facto a uma referência de potência.

O regulador de tensão tem como principal objectivo manter a tensão aos terminais das cargas dentro de certos limites, a partir dos quais pode haver decréscimo acentuado de

6 Controlo do Gerador Síncrono

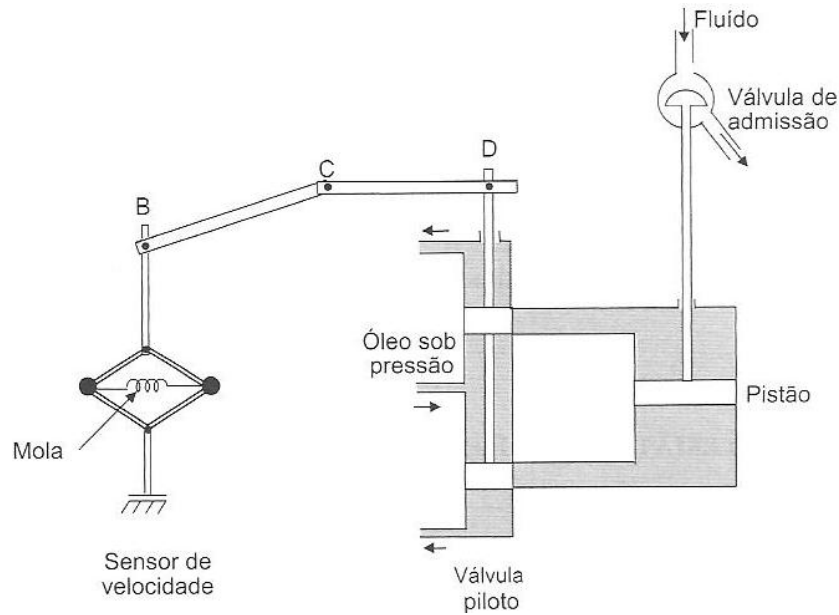


Figura 6.12: Regulador de velocidade desenvolvido por *Watt* para a máquina a vapor.[17]

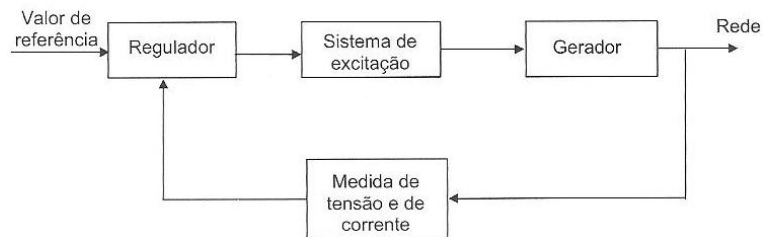


Figura 6.13: Representação esquemática de um sistema de regulação de tensão de um gerador síncrono.[17]

desempenho e danos nos dispositivos. Estando o gerador ligado à rede, o regulador permite reduzir as perdas de potência reactiva, maximizando a capacidade de transferência de potência activa.

A figura 6.13, representa esquematicamente o sistema de regulação de tensão de um gerador síncrono. A tensão e a corrente de saída do gerador são medidas e enviadas para um regulador. Tal como na situação anterior, este compara as duas grandezas com valores de referência, enviando um comando ao sistema de excitação. Este sistema, que tem implícito o controlo do reóstato do circuito indutor, permite controlar a tensão.

Os tipos de sistemas de excitação são variados e têm evoluído ao longo do tempo. Em geradores de grande dimensão, é usual a utilização de excitatrizes. Nos últimos anos, a electrónica de potência tem demonstrado um papel de relevo no desenvolvimento desta área.[17, 19]

7 Ensaio Experimental do Sistema de Aproveitamento Hídrico

O ensaio experimental do sistema de aproveitamento hídrico, tem por objectivo determinar a curva característica que relaciona o momento e a velocidade de rotação do eixo da turbina. Como a potência mecânica disponível no eixo da turbina é dada pelo momento e pela velocidade de rotação, é ainda possível determinar a curva característica que relaciona a potência mecânica fornecida pelo dispositivo com a velocidade de rotação do mesmo.

A fim de obter laboratorialmente os resultados pretendidos, realizou-se no *Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior*, nos dias 28, 29 e 30 de Dezembro de 2008, uma instalação experimental da qual não foi possível obter a medição das grandezas. O impedimento foi causado pelas condições de funcionamento da instalação hidráulica do laboratório, que foram adaptadas para o efeito. Posteriormente, entre os dias 12 e 16 de Janeiro de 2009, realizou-se no Laboratório da *Valcon*, um ensaio experimental que surge como alternativa ao primeiro.

Os dois ensaios referidos, embora tenham o mesmo objectivo, têm procedimentos e características muito distintas. De modo geral, o ensaio a realizar na *Valcon*, por questões de versatilidade do banco de ensaios e de espaço, permite uma instalação experimental mais rápida e prática. Outro ponto relevante é a possibilidade de, para a mesma altura manométrica obter diferentes caudais, bastando para isso regular a abertura de uma válvula a jusante da turbina. A principal desvantagem prende-se com o facto de a pressão máxima possível neste laboratório gravítico ser de 1.2bar , valor baixo, quando comparado com a pressão máxima de 8bar possível no *Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior*.

Do ensaio realizado na *Valcon* obtiveram-se os valores pretendidos, com base nos quais foi possível traçar as curvas características descritas.

7.1 Instalação Experimental

A válvula *FLUCON 200* com turbina integrada ensaiada laboratorialmente, é ligeiramente diferente do dispositivo que se pretende aplicar nas condutas, descrito na secção 2.3. No modelo laboratorial, a válvula não tem conjunto obturador nem regulador de velocidade. O que equivale a considerar que, num dispositivo completo, o conjunto obturador está totalmente aberto, permitindo a máxima passagem de fluido.

A potência mecânica disponível no eixo da turbina, é dada pelo momento e pela velocidade de rotação. Utilizando uma carga variável, que trava ou liberta o eixo da turbina, é possível controlar os dois parâmetros para obter diversos pontos de funcionamento.

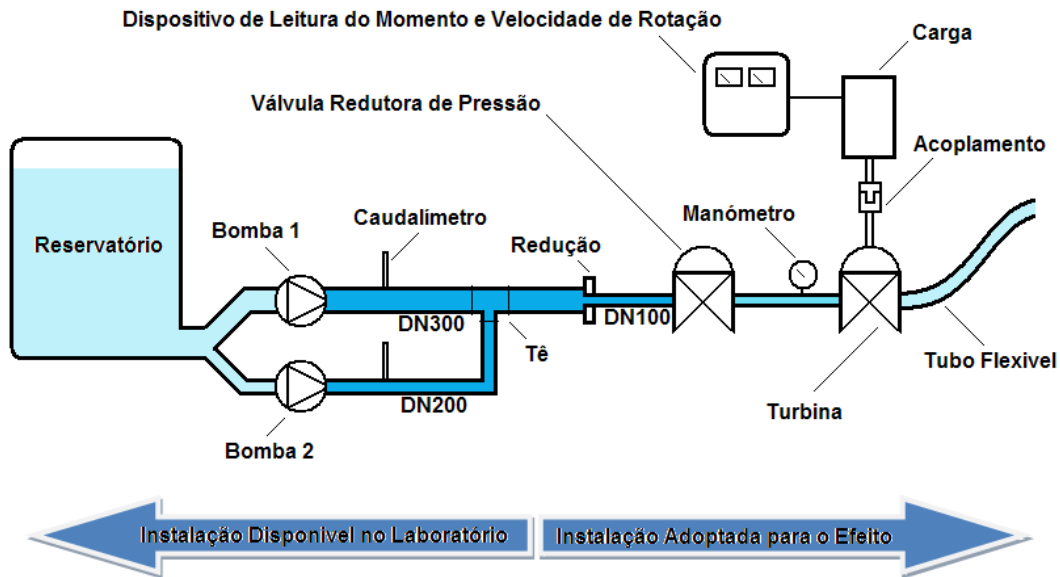


Figura 7.1: Representação esquemática da instalação experimental do *Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior*.

Note-se que, para um dado binário corresponde uma única velocidade de rotação e vice-versa, desta forma é possível caracterizar o comportamento da turbina. É associado a esta carga um dispositivo analógico de leitura do momento e da velocidade de rotação. Para fazer a ligação entre os eixos da turbina e da carga, é utilizado o acoplamento *Huco Flex-P*.

O eixo da válvula a ensaiar é ligado mecânicamente à carga regulável com o respectivo dispositivo de leitura, sendo a instalação comum aos dois ensaios. Tendo em conta as diferentes condições laboratoriais, a restante instalação é distinta. Desta forma, é necessário descrever cada uma delas separadamente.

7.1.1 Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior

A figura 7.1 representa esquematicamente a instalação experimental utilizada para fazer o ensaio no *Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior*. O laboratório é composto por duas bombas colocadas em paralelo à saída de um reservatório. A bomba 1, instalada numa conduta $DN300$, tem capacidade para bombear $648m^3/h$ à pressão máxima de $4bar$ e a bomba 2, instalada numa conduta $DN200$, permite bombear caudal de $324m^3/h$ à pressão máxima de $4bar$. O laboratório é ainda composto por dois caudalímetros e uma ligação em tê, instalados de acordo com a figura.

A instalação adoptada para o efeito é constituída por uma redução de $DN300/DN100$, uma válvula redutora de pressão *FLUCON 200*, um manómetro, pela turbina ligada à carga e respectivo dispositivo de leitura de momento e velocidade de rotação e pelo tubo flexível utilizado para escoar a água. A válvula redutora de pressão permite regular a

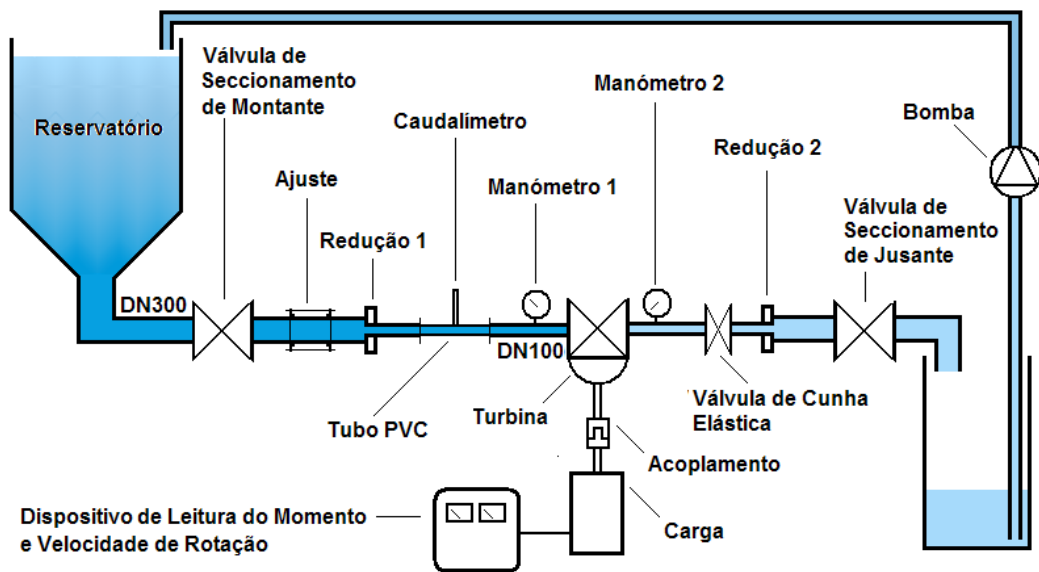


Figura 7.2: Representação esquemática da instalação experimental do laboratório da *Valcon*.

pressão a montante da turbina para o valor visualizado no manómetro.

Tendo em conta o pouco espaço disponível para realizar este ensaio, houve necessidade de construir uma estrutura em ferro para colocar a carga na vertical, que tem que estar bem fixa para não haver vibrações no eixo da turbina e tem que permitir ajustes para fazer coincidir o eixo da turbina e da carga.

7.1.2 Laboratório da *Valcon*

A instalação experimental representada na figura 7.2, ilustra de forma esquemática o dispositivo utilizado no ensaio de laboratório da *Valcon*. O banco de ensaios é constituído por um reservatório gravítico, que permite obter na conduta pressões entre 0 e 1.2bar. A bomba permite fazer a recirculação de água para dentro do reservatório, controlando assim a altura manométrica do mesmo. O banco de ensaios é constituído por duas válvulas de seccionamento pneumáticas que permitem controlar a circulação de fluido na conduta, um ajuste para adaptar o comprimento da instalação ao banco de ensaios e duas reduções de DN300/DN100 (reduções 1 e 2).

Tendo em conta as condições do laboratório da *Valcon*, para realizar o ensaio pretendido, são ainda acoplados dois manómetros nas extremidades da turbina (manómetros 1 e 2), uma válvula de cunha elástica para regular manualmente a admissão de fluido e uma pequena secção de tubo PVC com as respectivas flanges, na qual está inserido um caudalímetro.

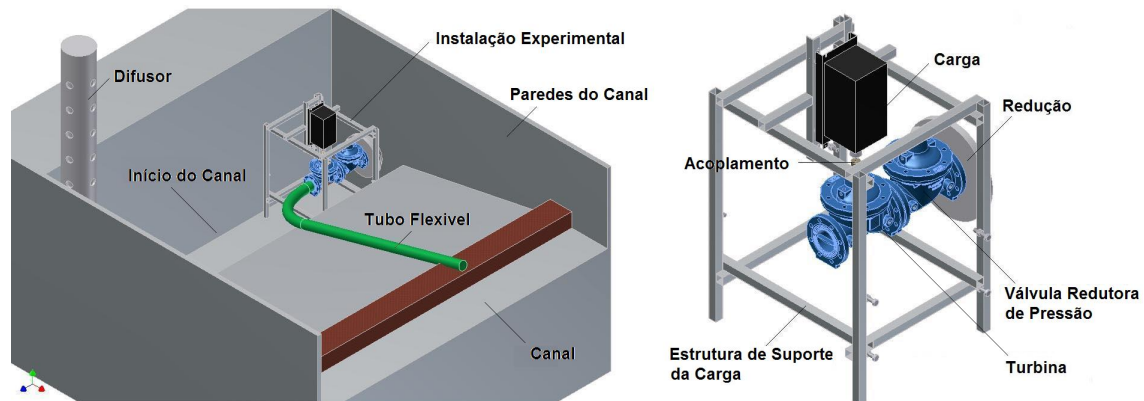


Figura 7.3: Pormenor da unidade experimental.

7.2 Procedimento Experimental

Nesta secção descreve-se o procedimento necessário à realização dos ensaios, que têm como finalidade o registo de um conjunto de grandezas que permitem posteriormente traçar a característica da turbina em função do escoamento. As descrições dos procedimentos que se seguem estão de acordo com as figuras 7.1 e 7.2 para cada ensaio.

É importante considerar que, o ensaio a realizar no *Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior* tem o prazo possível de três dias, obrigando a otimizar o tempo da melhor forma. O ensaio a realizar na *Valcon*, não tem um limite temporal restrito, sendo no entanto idealizado para o prazo de uma semana.

7.2.1 Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior

O ensaio a realizar no prazo de três dias é constituído por três fases distintas, uma por cada dia. A primeira fase é a instalação experimental, a segunda o ensaio experimental e a terceira a remoção da instalação experimental.

O *Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior* consiste num canal alimentado por um sistema de bombagem, no qual se simula um rio. No ensaio que se pretende realizar aproveita-se este sistema de bombagem, não para fazer circular água no canal como normalmente acontece, mas para fazer circular água na turbina. Posteriormente, a água é desviada para um ralo ou para o próprio canal através do tubo flexível. Como o laboratório é adaptado à realização do ensaio, inicialmente é necessário retirar o difusor (utilizado para uniformizar a saída de água da conduta de bombagem). Para compreender a instalação experimental, a figura 7.3 ilustra em pormenor a unidade experimental.

Primeira fase, instalação experimental:

1. Retirar a água que resta no canal da instalação;

7 Ensaio Experimental do Sistema de Aproveitamento Hídrico

2. Desacoplar o difusor da conduta e colocá-lo cuidadosamente na posição vertical, sem que este seja retirado do canal;
3. Na flange da conduta, acoplar por esta ordem, redução ($DN300/DN100$), válvula redutora de pressão e turbina;
4. Colocar no canal a estrutura que suporta a carga;
5. A jusante da turbina colocar o tubo flexível, de forma a permitir escoar a água da conduta para o canal principal;
6. Fazer um pequeno ensaio para verificar a instalação hidráulica:
 - a) Regular a válvula redutora de pressão para uma redução de pressão máxima (válvula fechada);
 - b) Accionar a bomba 1 (pressão de $4bar$);
 - c) Regular a válvula redutora de pressão de forma a permitir a passagem de água;
 - d) Confirmar que a instalação hidráulica não tem fugas;
 - e) Desligar a bomba 1 (pressão de $4bar$).
7. Fixar a carga na estrutura;
8. Colocar o acoplamento entre a carga e a turbina;
9. Ajustar a estrutura, de forma a alinhar os eixos da carga e da turbina;
10. Testar a instalação:
 - a) Regular a válvula redutora de pressão para uma redução de pressão máxima (válvula fechada);
 - b) Regular a carga para um binário resistente máximo;
 - c) Accionar a bomba 1 (pressão de $4bar$);
 - d) Regular a válvula redutora de pressão para a pressão a jusante de $1bar$;
 - e) Reduzir o valor da carga, até a turbina atingir uma velocidade de rotação baixa;
 - f) Verificar se os dois eixos estão alinhados. Se o sistema apresentar vibração é necessário reajustar os eixos.
11. Repetir os passos 9 e 10, por forma a conseguir o máximo alinhamento entre os dois eixos.

Depois de finalizada a instalação experimental, é iniciada a segunda fase do procedimento, o ensaio experimental. As condições iniciais do ensaio são: regular a válvula redutora de pressão para uma redução de pressão máxima (válvula fechada) e regular a carga para um binário resistente máximo.

7 Ensaio Experimental do Sistema de Aproveitamento Hídrico

1. Accionar a bomba 1 (pressão de $4bar$);
2. Regular a válvula redutora de pressão para a pressão a jusante de $1bar$;
3. Reduzir o valor da carga, até ao ponto em que a turbina está na eminência de iniciar a rotação;
4. Depois de o sistema estabilizar, registar na respectiva tabela os valores dos parâmetros (caudal, velocidade de rotação e momento);
5. Reduzir sucessivamente a carga de forma a efectuar diversas leituras;
6. Quando a velocidade de rotação do eixo for satisfatória (consequência da redução da carga), finalizar a sequência de medições iniciadas no ponto 5;
7. Retroceder ao passo 2, regulando a válvula para uma nova pressão. O ensaio será realizado com a pressão de 1 a $5bar$, sendo que para as pressões de 4 e $5bar$, é necessário accionar a bomba 2.

Na terceira e última fase que consiste na remoção da instalação experimental, não menos importante que as fases anteriores, é necessário ter o cuidado de deixar o laboratório nas mesmas condições que este foi encontrado inicialmente. Numa primeira fase é necessário desmontar e retirar do canal todo o equipamento trazido propositadamente para a realização do ensaio experimental. Numa segunda fase, recoloca-se o difusor na sua posição original.

7.2.2 Laboratório da *Valcon*

O procedimento correspondente ao ensaio de laboratório da *Valcon*, a realizar no prazo de uma semana, não tem estipuladas datas fixas para a realização das várias tarefas. Desta forma é mais fácil conciliar a realização do ensaio experimental com a disponibilidade das pessoas intervenientes no projecto que trabalham na *Valcon*. Assim é importante avaliar, durante a realização do ensaio, o tempo disponível para cumprir as várias tarefas. Note-se que, ao contrario do primeiro ensaio, não existe uma restrição temporal; se necessário o ensaio pode prolongar-se para além da primeira semana.

O procedimento é constituído pela instalação experimental e pelo ensaio experimental. Descrição da instalação experimental:

1. Na flange da redução 2, acoplar a válvula borboleta e a turbina, por esta ordem. Ao acoplar a turbina ter o cuidado de deixar o eixo da mesma na posição horizontal;
2. Desapertar o ajuste de forma a introduzir o troço de tubo PVC na instalação;
3. Acoplar o troço de tubo PVC entre a redução 1 e a turbina. Nesta fase é necessário apertar o ajuste para acondicionar a instalação;
4. Colocar na turbina os dois manómetros;

7 Ensaio Experimental do Sistema de Aproveitamento Hídrico

5. Fazer um pequeno ensaio para verificar a instalação hidráulica:
 - a) Abrir a válvula de seccionamento de montante;
 - b) Confirmar que a instalação hidráulica não tem fugas;
 - c) Verificar que os manómetros indicam o valor da pressão na conduta;
 - d) Abrir a válvula de seccionamento de jusante;
 - e) Confirmar visualmente o funcionamento da turbina.
 - f) Fechar a válvula de seccionamento de montante e de jusante (a ordem é indiferente).
6. Alinhar verticalmente o eixo da turbina e da carga. Note-se que é necessário para o alinhamento, subir a carga aproximadamente $4cm$;
7. Colocar o acoplamento entre a carga e a turbina;
8. Alinhar segundo os três referenciais o eixo da carga e da turbina;
9. Testar a instalação:
 - a) Regular a carga para um binário resistente elevado;
 - b) Abrir a válvula de seccionamento de montante;
 - c) Abrir a válvula de seccionamento de jusante, permitindo a circulação de água pela conduta;
 - d) Reduzir o valor da carga, até a turbina atingir uma velocidade de rotação baixa;
 - e) Verificar se os dois eixos estão alinhados. Se o sistema apresentar vibrações, é necessário reajustar os eixos;
10. Repetir os passos 6 e 7, por forma a conseguir o máximo alinhamento entre os dois eixos.

Depois de finalizada a instalação experimental, dá-se início à segunda fase, o ensaio experimental:

1. Fechar totalmente a válvula de cunha elástica;
2. Controlar a altura do reservatório para obter na conduta a pressão de $1bar$;
3. Regular a carga para um binário resistente elevado;
4. Abrir a válvula de seccionamento de montante;
5. Abrir a válvula de seccionamento de jusante;
6. Regular a válvula de cunha elástica para a abertura desejada;

7. Reduzir o valor da carga, até ao ponto em que a turbina está na eminência de iniciar a rotação;
8. Depois de o sistema estabilizar, registar na respectiva tabela os valores dos parâmetros (caudal, pressões, velocidade de rotação e momento);
9. Reduzir sucessivamente a carga de forma a efectuar diversas leituras;
10. Quando a velocidade de rotação do eixo for satisfatória (consequência da redução da carga), finalizar a sequência de medições iniciadas no ponto 7;
11. Sempre que necessário reestabelecer o nível no depósito;
12. Fechar a válvula de seccionamento de montante e de jusante;
13. Repetir todo o procedimento iniciado no ponto 2, fechando ligeiramente a válvula de cunha elástica no ponto 6, de forma a diminuir o caudal para o mesmo valor de pressão. Como exemplo, a abertura da válvula pode ser de 75%, 50% e 25%.
14. Repetir todo o procedimento, definindo uma pressão diferente em 2. Os valores a definir serão próximos de *1bar*, por exemplo 0.8 e 1.2*bar*.

7.3 Descrição do Ensaio Experimental

Esta secção visa descrever, com algum rigor, todos os procedimentos realizados laboratorialmente. O ensaio realizado no *Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior* não correu segundo o previsto, não sendo possível finalizar a instalação necessária à medição das grandezas pretendidas. O ensaio realizado no laboratório da *Valcon* permitiu cumprir o objectivo proposto, sendo assim apresentados os resultados obtidos no ensaio, assim como as respectivas curvas características, variação da potência mecânica em função da velocidade de rotação e rendimentos da turbina.

7.3.1 *Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior*

No primeiro dia foi transportado para o laboratório todo o equipamento e material necessário há realização do ensaio experimental. Seguidamente, iniciou-se o procedimento experimental descrito para este dia. Desacoplou-se o difusor, e instalou-se a redução, a válvula redutora de pressão e a turbina. Colocou-se no canal a estrutura que suporta a carga (para medição das características do veio), nesta fase foi necessário fazer um pequeno acerto na altura da estrutura.

Já na parte da tarde, colocou-se a jusante da turbina o tubo flexível. Finalizada a primeira parte da instalação, realizou-se o ensaio para verificar a instalação hidráulica. Primeiro regulou-se a válvula para uma redução de pressão máxima (válvula fechada) e accionou-se a bomba 1 para um dado caudal. Seguidamente regulou-se a válvula redutora de pressão de forma a permitir a passagem da água.

7 Ensaio Experimental do Sistema de Aproveitamento Hídrico

Nesta fase, em que se esperava o aumento do caudal, verificou-se que este era sempre nulo, embora a bomba 1 estivesse em funcionamento. Tendo em conta este estranho comportamento, colocou-se a possibilidade de a bomba 1 ter ficado desferrada, possivelmente ao ter sido retirada toda a água que restava no canal da instalação.

Tentou-se pôr o dispositivo em funcionamento com a bomba 2, menos potente, mas este também não funcionou. Acontece que a pressão que chega à válvula redutora é muito baixa, concluindo-se que, a perda de carga criada pelo dispositivo é tal que esta bomba não é suficiente.

Não restando muito mais tempo neste primeiro dia, ficou definido para o dia seguinte rectificar o problema da bomba 1, sendo necessário encher a bomba de água. Para isso seria necessário abrir uma válvula anti-retorno, existente a jusante da bomba 1.

No segundo dia de trabalho laboratorial, fez-se o planeado no dia anterior, desmontou-se a válvula anti-retorno enchendo-se de água e fechou-se novamente, por forma a ferrar a bomba 1. Ao ensaiar-se novamente a instalação, verificou-se que este procedimento não resultou.

Experimentou-se então desacoplar todo o dispositivo instalado para a realização do ensaio, accionou-se a bomba 1 e verificou-se a passagem do caudal pretendido na conduta. O que permite concluir que, ao contrário do que se pensou, a bomba 1 não estava desferrada. O que sucede é algo análogo à situação da bomba 2, a perda de carga criada pelo dispositivo é tal que a bomba 1 não é suficiente para impor um caudal na conduta.

Tentando compreender melhor esta situação, acoplou-se apenas a redução, verificando-se a passagem de fluido pela conduta. De seguida acoplou-se a turbina e o tubo flexível, deixando de fora a válvula redutora de pressão. Ao accionar a bomba, a água circula na conduta, no entanto o caudal é muito reduzido em relação ao pretendido.

Por exemplo, ao fixar no painel 40 l/s , a bomba 1 entra em funcionamento, mas o caudal real fica a oscilar entre os 4 e 6 l/s , não atingindo o valor desejado. Se se fixar no painel outro caudal, diferente deste, o caudal real mantém-se nestes valores. Experimentou-se subir o tubo flexível, cerca de 2 m , com a bomba 1 a funcionar. Verificou-se que aumentando ligeiramente a altura manométrica da instalação o caudal chega a zero.

No início da tarde, experimentou-se pôr a turbina a funcionar, accionando a bomba 1. Experimentaram-se diferentes caudais, verificou-se que o caudal nunca ultrapassou os 6 l/s e a pressão a montante da turbina, nunca atingiu o valor mínimo de 1 bar . Fazendo o mesmo procedimento para a bomba 2, os resultados obtidos foram idênticos. Accionando as duas bombas em simultâneo, acontece que apenas a bomba 2 debita algum caudal.

Visualizou-se as curvas características das duas bombas, verificando-se que embora a bomba 2 seja menos potente, esta permite uma maior altura manométrica para o mesmo caudal. Note-se que o diâmetro da tubagem da bomba 2 é menor que o da bomba 1.

Apesar de não se conhecer a curva característica da instalação, coloca-se a possibilidade de as duas curvas (da bomba e da instalação) terem um ponto de funcionamento de caudal muito reduzido. Levantou-se a questão se o problema não advém do dispositivo de controlo das bombas, já que estas têm potência suficiente para obter pressões e caudais superiores.

Uma possibilidade é, na altura em que se fez a instalação do laboratório de hidráulica, ter-se verificado qual o caudal máximo que é necessário no canal hidráulico. A este caudal

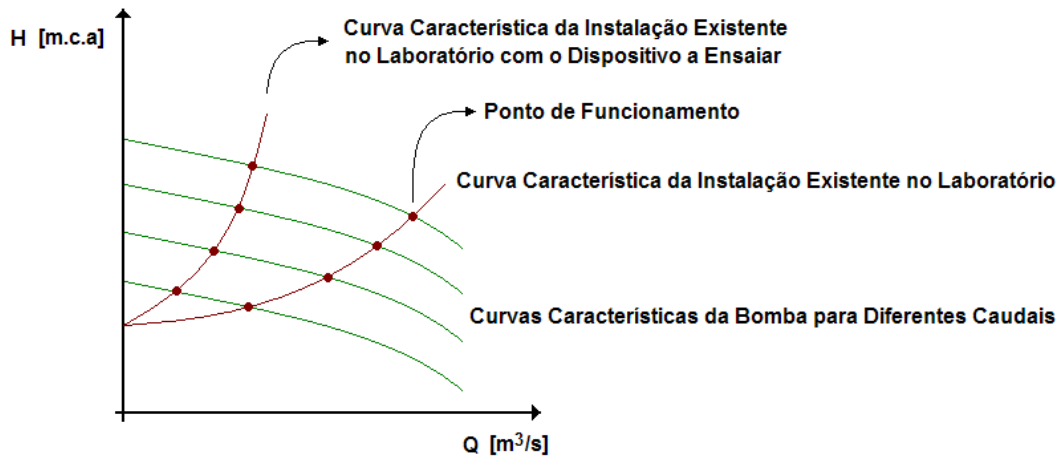


Figura 7.4: O gráfico representa esquematicamente as curvas características da instalação e da bomba.

corresponde uma velocidade máxima de rotação da bomba, uma possibilidade é terem limitado a velocidade de rotação da bomba acima deste valor.

No terceiro e último dia, como estava previsto fez-se a remoção de todo equipamento e recolocou-se o difusor.

7.3.1.1 Conclusão

A instalação existente no *Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior* tem uma curva característica própria. Nesta instalação está acoplada uma bomba que permite obter diferentes pontos de funcionamento. Na prática, o que se faz é digitar num painel de comando o caudal de água que se pretende na conduta, implicitamente este ajusta o funcionamento da bomba para o ponto de funcionamento pretendido.

Quando à instalação existente se acopla o dispositivo que se pretende ensaiar, dá-se um aumento significativo das perdas de carga na conduta, desta forma obtém-se uma nova curva característica da instalação. Analogamente ao que sucede na situação anterior, é possível obter diferentes pontos de funcionamento definindo diferentes caudais, figura 7.4.

Na prática, ao digitar no painel de comando um caudal de 180 l/s , verificou-se que a curva da bomba intercepta a curva da instalação num ponto de caudal muito reduzido, entre 4 e 6 l/s , desta forma, este é o máximo caudal que se consegue obter.

Não sendo possível determinar teoricamente a curva característica da instalação, pode aceitar-se a possibilidade de as perdas de carga, singulares e em linha, impostas pelo dispositivo a ensaiar, sejam de tal maneira elevadas, que o caudal máximo possível é 6 l/s . No entanto, esta possibilidade não justifica o facto de a pressão a montante da turbina e da válvula redutora, nunca ter atingido o valor mínimo de 1 bar .

Com a bomba 1 em funcionamento, seria de esperar, independentemente do caudal

possível, pressões máximas entre 3 e 4bar, como se pode visualizar na figura 7.4. Note-se que a altura manométrica da instalação, está directamente relacionada com o valor da pressão a jusante da bomba 1.

Tendo em conta esta explicação, assim como as características e robustez da bomba 1 ($648m^3/h$, 4bar, 700Kg), existe a forte possibilidade de haver no dispositivo de controlo da bomba uma limitação, fazendo que a bomba fique sub-aproveitada. Desta forma garante-se que o canal hidráulico do laboratório nunca atinge uma pressão excessiva, que possa por em risco toda a estrutura laboratorial. Tendo em conta o tempo disponível à realização do ensaio, não foi possível diagnosticar melhor esta possibilidade.

Os objectivos estipulados para este ensaio não foram alcançados, no entanto é importante salvaguardar que tal facto não se deveu a um erro humano, já que a perda de carga da turbina não é teoricamente previsível e porque não há qualquer informação acerca da possibilidade de existir um dispositivo que imponha um sub-aproveitamento nas bombas.

7.3.2 Laboratório da Valcon

Inicialmente, como estava descrito no procedimento, instalaram-se os dispositivos necessários à realização do ensaio. Seguidamente, ainda antes de acoplar a carga (componente eléctrico), ensaiou-se a instalação hidráulica que teve de ser rectificadas, pois apresentava uma fuga. O problema foi solucionado com a substituição de uma junta de vedação anelar colocada entre as flanges.

Para proceder ao acoplamento entre a carga e a turbina, foi necessário construir uma pequena estrutura em ferro para elevar a carga aproximadamente 4cm. Ao tentar alinhar os eixos, verificou-se que estavam desalinhados angularmente porque o eixo da turbina, ao contrario do que se esperava, não estava na posição horizontal. Para fazer o alinhamento do eixo utilizou-se um macaco manual.

Depois de alinhar visualmente os eixos, colocou-se o dispositivo em funcionamento, este apresentou vibração e alguma irregularidade na rotação, sendo por isso necessário fazer alguns reajustes na estrutura até minimizar o desalinhamento.

Finalizada a primeira fase do ensaio iniciou-se o ensaio experimental, depois de realizadas as primeiras medições, verificou-se que o nível do reservatório descia ligeiramente, influenciando o valor da pressão a montante. Adoptou-se o procedimento de reestabelecer o nível no reservatório cada vez que se fazia uma medição para uma dada velocidade de rotação. A solução apresentada garante resultados fiáveis, no entanto esta torna o ensaio bastante demorado. Note-se que, embora o banco de ensaios tenha uma bomba para fazer a recirculação de água para dentro do reservatório de forma contínua, o caudal que esta debita é inferior ao utilizado no ensaio. Outra solução possível seria colocar, tal como no ensaio realizado no *laboratório de hidráulica da Universidade da Beira Interior*, uma válvula redutora de pressão a montante da turbina, no entanto o espaço disponível não possibilitou implementar esta alternativa.

A altura máxima do nível do reservatório é de 11.85m.c.a., correspondente à pressão de 1.16bar a montante da turbina, desprezando perdas de carga na conduta. Tendo em conta estas condições, optou-se por realizar o ensaio para a pressão máxima de 1.10bar. No entanto verificou-se que apenas era possível obter esta pressão quando a válvula a

jusante da turbina estava fechada. Fazendo circular a água pela turbina, a pressão reduziu para 1.05bar , assim esta foi a pressão máxima utilizada na realização do ensaio. O ensaio realizou-se ainda para as pressões de 1.00 e 0.95bar , de modo a que o gradiente de pressão seja o valor fixo de 0.05bar , correspondente a uma variação de 0.51m.c.a. no reservatório.

Tendo em conta o procedimento experimental, para uma dada pressão seriam determinadas quatro curvas características para diferentes caudais. Durante a medição das várias grandezas, verificou-se que para caudais de 75, 50 e 25% do caudal máximo, os valores de momento e velocidade de rotação eram muito reduzidos, não justificando a determinação da curva característica para estas condições de escoamento. Experimentalmente, registaram-se apenas os valores máximos de momento e velocidade para cada caudal.

Para o caudal máximo, o ensaio decorreu segundo o previsto, determinando-se os valores das grandezas para diversos pontos de funcionamento.

7.3.2.1 Resultados Obtidos

Os resultados obtidos para a pressão de 0.95bar e nível de admissão máximo, são os representados na tabela 7.1. De forma semelhante, para as pressões de 1.00bar e 1.05bar e níveis de admissão máximos, os resultados obtidos são os apresentados nas tabelas 7.2 e 7.3, respectivamente.

Durante o ensaio verificou-se que era difícil manter a velocidade constante para baixas rotações, nomeadamente 250 , 500 e 750rpm , não sendo possível, para as pressões de 1.00 e 1.05bar , realizar medições para $n = 250\text{rpm}$.

A tabela 7.4 apresenta valores de momento e velocidade de rotação máximos para diferentes pressões e níveis de admissão.

7.3.2.2 Análise de Resultados

Tendo em conta os resultados obtidos para níveis de admissão máximos, é possível traçar as curvas características para as pressões de 0.95 , 1.00 e 1.05bar , figura 7.5.

Graficamente, observando as linhas de tendência, verifica-se que a velocidade de rotação e o momento no eixo da turbina variam inversamente. À medida que a velocidade aumenta o momento diminui e vice-versa, no entanto a variação é não-linear.

Comparando as curvas características entre si, verifica-se que estas têm uma configuração muito semelhante, embora para o mesmo número de rotações, quanto maior a pressão a montante maior o momento correspondente. Os valores máximos de momento e velocidade de rotação da turbina, obtidos com a pressão de 1.05bar , são 9.8N.m e 2800rpm , respectivamente.

Determinando a potência mecânica em cada ponto pela fórmula, tabela 7.5:

$$P_{mec} = M.\omega \quad (7.1)$$

é possível traçar a linha de tendência que caracteriza esta grandeza. À semelhança das curvas anteriores, é representado graficamente o valor da potência mecânica correspondente às pressões de 0.95 , 1.00 e 1.05bar .

7 Ensaio Experimental do Sistema de Aproveitamento Hídrico

p=0.95bar, abertura 100%				
M [N.m]	n [rpm]	Q [m3/h]	p1 [bar]	p2 [bar]
8.2	0	121 - 127	0.95	0
8.0	250	118 - 130	0.95	0
7.8	500	127 - 135	0.95	0
7.4	750	123 - 133	0.95	0
6.8	1000	125 - 131	0.95	0
6.2	1250	122 - 125	0.95	0
5.4	1500	124 - 132	0.95	0
4.8	1750	108 - 113	0.95	0
3.6	2000	109 - 115	0.95	0
2.4	2250	101 - 108	0.95	0
1.6	2500	98 - 102	0.95	0
1.6	2550	94 - 103	0.95	0

Tabela 7.1: Valores para a pressão de 0.95bar e abertura de 100%.

p=1.00bar, abertura 100%				
M [N.m]	n [rpm]	Q [m3/h]	p1 [bar]	p2 [bar]
9.0	0	115 - 122	1.00	0
	250			
8.2	500	116 - 120	1.00	0
7.8	750	125 - 138	1.00	0
7.0	1000	123 - 128	1.00	0
6.6	1250	122 - 133	1.00	0
5.8	1500	116 - 123	1.00	0
5.0	1750	120 - 131	1.00	0
4.0	2000	112 - 120	1.00	0
3.0	2250	111 - 121	1.00	0
2.0	2500	102 - 109	1.00	0
1.6	2530	98 - 103	1.00	0

Tabela 7.2: Valores para a pressão de 1.00bar e abertura de 100%.

7 Ensaio Experimental do Sistema de Aproveitamento Hídrico

p=1.05bar, abertura 100%				
M [N.m]	n [rpm]	Q [m3/h]	p1 [bar]	p2 [bar]
9.8	0	127 - 133	1.05	0
	250			
9.2	500	121 - 123	1.05	0
8.6	750	118 - 124	1.05	0
8.0	1000	128 - 135	1.05	0
7.4	1250	123 - 128	1.05	0
6.6	1500	130 - 138	1.05	0
5.8	1750	117 - 124	1.05	0
4.8	2000	121 - 132	1.05	0
3.6	2250	108 - 113	1.05	0
2.6	2500	107 - 118	1.05	0
1.4	2800	95 - 104	1.05	0

Tabela 7.3: Valores para a pressão de 1.05bar e abertura de 100%.

p=0.95bar				
Q [m3/h]	124	124x(3/4)	124x(1/2)	124x(1/4)
M_{mx} [N.m]	8.2	5.6	2.6	0.8
n_{mx} [rpm]	2550	2360	1550	800

p=1.00bar				
Q [m3/h]	118.5	118.5x(3/4)	118.5x(1/2)	118.5x(1/4)
M_{mx} [N.m]	9.0	6.0	2.4	0.4
n_{mx} [rpm]	2530	2500	1650	800

p=1.05bar				
Q [m3/h]	130	130x(3/4)	130x(1/2)	130x(1/4)
M_{mx} [N.m]	9.8	5.8	2.4	0.4
n_{mx} [rpm]	2800	2800	1900	700

Tabela 7.4: Valores de n e M máximos para diferentes níveis de admissão.

7 Ensaio Experimental do Sistema de Aproveitamento Hídrico

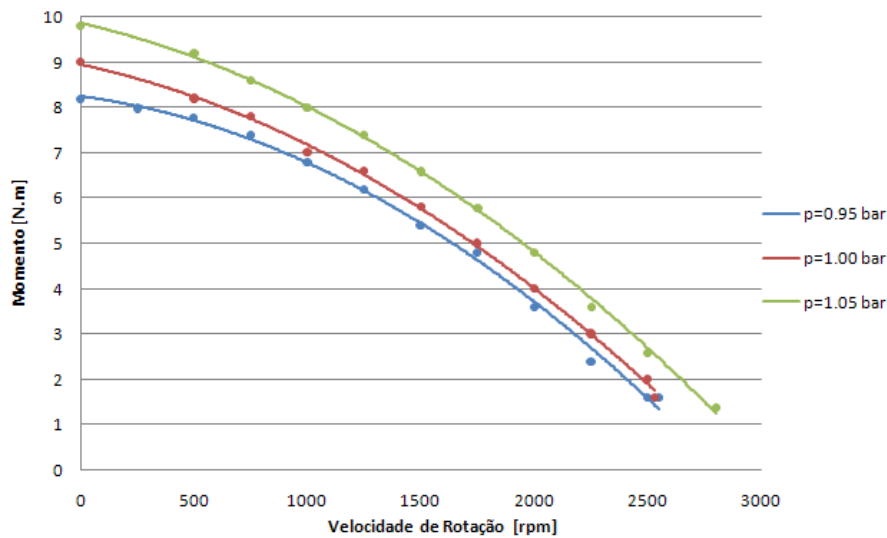


Figura 7.5: Curvas características para as pressões de 0.95, 1.00 e 1.05bar, para níveis de admissão máximos.

Os gráficos obtidos, figura 7.6, têm forma parabólica. Inicialmente a potência mecânica é nula, no instante de velocidade zero. Aumentando a velocidade, aumenta a potência mecânica até atingir o valor máximo. Este aumento é caracterizado por duas fases distintas, a primeira em que o crescimento é praticamente linear e a segunda de crescimento exponencial. Nesta fase a potência mecânica reduz o seu crescimento, até atingir o ponto máximo. Alcançado este ponto, a grandeza diminui de forma semelhante com o aumento da velocidade de rotação. Graficamente verifica-se que a potência mecânica é máxima para velocidades de rotação entre 1500 e 2000rpm aproximadamente.

Comparando as três curvas verifica-se que aumentando a pressão, aumenta a potência mecânica. O valor máximo obtido, à pressão de 1.05bar, é 1063W correspondente à velocidade de 1750rpm. Com o aumento da pressão o ponto de potência máxima tende a deslocar-se para a direita do gráfico, ou seja, tende a coincidir com um valor de velocidade mais elevada.

No ensaio experimental foram registados os caudais correspondentes a cada ponto de funcionamento, para os três valores de pressão. No decorrer do ensaio, verificou-se que o caudalímetro regista diversos valores em curto espaço de tempo, actualizando constantemente a grandeza, assim optou-se por registar nas tabelas 7.1, 7.2 e 7.3, o caudal mínimo e máximo. Por exemplo, considerando a pressão de 1.00bar, para $n = 1000rpm$ o caudal registado variou entre 125 e 131m³/h, para efeito de cálculo, considera-se o caudal médio de 128m³/h, anexo C.

Para uma dada pressão, os caudais obtidos não seguem uma sequência lógica em função da aumento gradual da velocidade de rotação. No entanto os caudais médios obtidos não distam muito entre si, excepto quando a velocidade atinge valores elevados, superiores a 2000rpm. Nesta situação verifica-se uma ligeira diminuição do caudal médio.

7 Ensaio Experimental do Sistema de Aproveitamento Hídrico

p=0.95bar			p=1.00bar			p=1.05bar		
n [rpm]	M [N.m]	P [W]	n [rpm]	M [N.m]	P [W]	n [rpm]	M [N.m]	P [W]
0	8.2	0	0	9.0	0	0	9.8	0
250	8.0	209.4	250			250		
500	7.8	408.4	500	8.2	429.4	500	9.2	481.7
750	7.4	581.2	750	7.8	612.6	750	8.6	675.4
1000	6.8	712.1	1000	7.0	733.0	1000	8.0	837.8
1250	6.2	811.6	1250	6.6	863.9	1250	7.4	968.7
1500	5.4	848.2	1500	5.8	911.1	1500	6.6	1036.7
1750	4.8	879.6	1750	5.0	916.3	1750	5.8	1062.9
2000	3.6	754.0	2000	4.0	837.8	2000	4.8	1005.3
2250	2.4	565.5	2250	3.0	706.9	2250	3.6	848.2
2500	1.6	418.9	2500	2.0	523.6	2500	2.6	680.7
2550	1.6	427.3	2530	1.6	423.9	2800	1.4	410.5

Tabela 7.5: Potência mecânica em função dos momentos e velocidades de rotação obtidas experimentalmente.

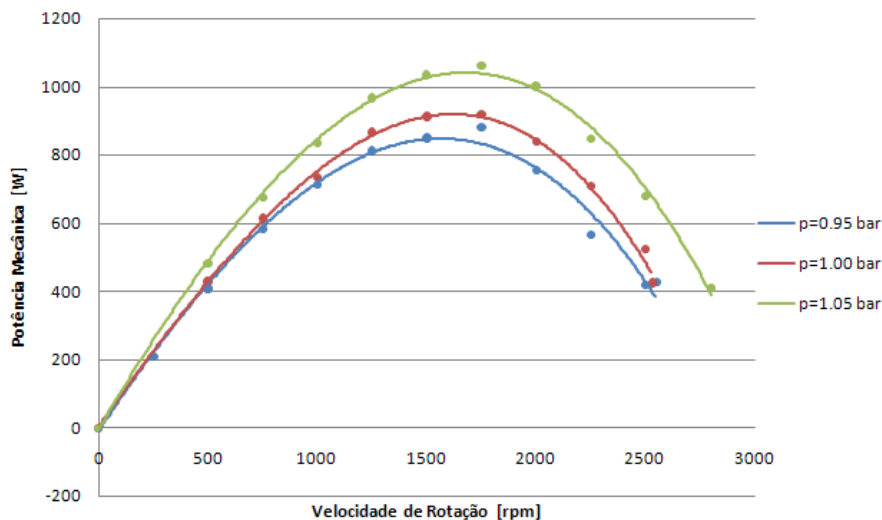


Figura 7.6: Potência mecânica obtida no eixo da turbina em função da velocidade de rotação. Verifica-se que a potência é máxima para velocidades de rotação entre 1500 e 2000rpm aproximadamente.

7 Ensaio Experimental do Sistema de Aproveitamento Hídrico

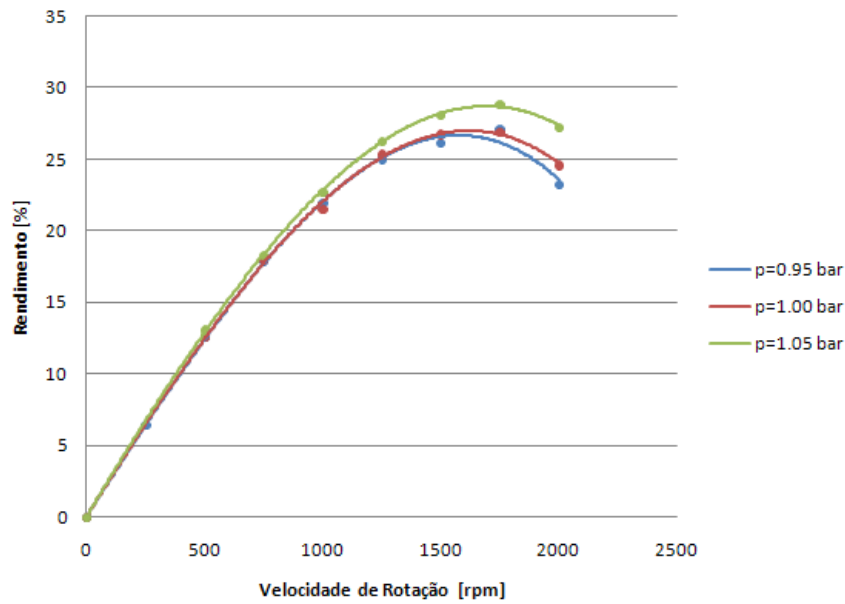


Figura 7.7: Rendimento em função da velocidade de rotação do eixo da turbina, obtido para as diferentes condições de escoamento.

Considerando o caudal constante, para velocidades inferiores ou iguais a $2000rpm$, determina-se o caudal médio total para cada pressão, sendo assim possível fazer uma aproximação dos rendimentos da turbina. Para as pressões de 0.95 , 1.00 e $1.05bar$ os caudais médios totais são respectivamente: $123.2m^3/h$, $122.8m^3/h$ e $126.4m^3/h$, anexo A.

Utilizando para cada situação a fórmula:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{disponivel}} = \frac{M \cdot \pi \cdot n}{30 \cdot Q \cdot H} \quad (7.2)$$

determina-se o rendimento da turbina para as diferentes condições de escoamento. Convertendo para o sistema de unidades S.I. os valores de pressão (altura manométrica H) e caudal vem: $p = 95 \times 10^3 N/m^2$ para $Q = 34.2 \times 10^{-3} m^3/s$, $p = 100 \times 10^3 N/m^2$ para $Q = 34.1 \times 10^{-3} m^3/s$ e $p = 105 \times 10^3 N/m^2$ para $Q = 35.1 \times 10^{-3} m^3/s$.

As curvas de rendimento, representadas na figura 7.7, mostram os rendimentos máximos atingidos pela turbina nas condições de escoamento referenciadas anteriormente. Genericamente, os rendimentos máximos são de aproximadamente 26%, correspondentes a velocidades de rotação próximas das $1500rpm$. O valor de rendimento máximo, obtido para a pressão de $1.05bar$, é de 28.8% correspondente á velocidade de $1750rpm$.

Com base nas curvas de rendimento, para velocidades inferiores a $1250rpm$, o rendimento decresce de forma mais acentuada e praticamente linear, até que atinge o rendimento nulo, para $n = 0rpm$. Como as condições de escoamento não são as mesmas para as três curvas de rendimento, não é possível fazer uma comparação entre elas.

7.3.2.3 Conclusão

Tendo por base as curvas características obtidas a partir das medições efectuadas experimentalmente, figura 7.5, verifica-se que a variação entre o momento e a velocidade de rotação do eixo da turbina é inversamente proporcional. Esta é a configuração típica da curva característica das turbinas, ao aumento de velocidade corresponde a diminuição do binário e vice-versa.

Teoricamente no gráfico das curvas características, as linhas deveriam prolongar-se até o momento ser nulo, instante em que a velocidade é máxima. Na prática é impossível atingir esta velocidade máxima, porque existe sempre um momento resistente associado. Experimentalmente a turbina e a carga, utilizada para medir o binário e a velocidade de rotação, têm um binário resistente mínimo. O gráfico da figura 7.5, permite concluir que este binário é de aproximadamente $1.5N.m$. Da mesma forma, no gráfico da potência mecânica, figura 7.6, as curvas deveriam prolongar o seu decrescimento com o aumento da velocidade, até ao ponto em que a potência é novamente nula.

Experimentalmente verificou-se uma oscilação nos valores de caudal, o principal factor responsável por esta variação é o facto de o troço de tubo PVC com $1m$ de comprimento, no centro do qual está fixo o caudalímetro, não ser suficientemente grande. Desta forma a redução DN300/DN100, situada a montante e a turbina colocada a jusante do caudalímetro, perturbam o escoamento influenciando a medição. Note-se que, o espaço disponível no banco de ensaios não permite a existência de um troço linear de maior comprimento.

A determinação da curva do rendimento da turbina, para condições de escoamento fixas, não é um dos objectivos deste trabalho. A medição do caudal serve para dar uma ordem de grandeza do valor, e permite determinar o rendimento da turbina num ponto específico. Por exemplo, para a queda de pressão de $1.00bar$, se se acoplar um gerador, impondo um binário e uma velocidade de rotação, conhecendo o caudal nesse ponto de funcionamento é possível determinar o rendimento da turbina nesse instante. Este tipo de análise, embora permita determinar o rendimento pontualmente, não permite conhecer a variação do rendimento da turbina em vários pontos de funcionamento para condições de escoamento fixas. Teoricamente, para fazer este tipo de ensaio, é necessário reajustar o caudal da instalação, para que este seja constante cada vez que se define uma nova velocidade de rotação. Determinando a curva do rendimento é possível conhecer, para as condições de escoamento, a zona de rendimento máximo.

Durante o ensaio experimental, para níveis de admissão de 100%, não é feito qualquer ajuste de caudal, possibilitando a variação das condições de escoamento. Analisando os caudais obtidos, verifica-se uma grande proximidade de valores para velocidades inferiores ou iguais a $2000rpm$. Calculando o caudal médio total, considera-se que o caudal não variou, esta aproximação permite determinar a curva de rendimento em condições de escoamento fixo. Desta forma, é possível ter uma ideia das velocidades de rotação a que o conjunto turbina/gerador deve funcionar para um rendimento máximo da turbina. O rendimento óptimo, na ordem dos 26% corresponde a velocidades próximas das $1500rpm$.

Note-se que, embora apenas seja possível traçar a curva de rendimento para velocidades até $2000rpm$, é conhecida a zona de rendimento máximo. Teoricamente, para

7 Ensaio Experimental do Sistema de Aproveitamento Hídrico

velocidades superiores à indicada, o rendimento continuará a decrescer até ao ponto em que é novamente nulo.

Comparando os gráficos da potência mecânica (figura 7.6) e do rendimento (figura 7.7), verifica-se que estes têm pontos de funcionamento óptimos na mesma zona de velocidades de rotação. Esta coincidência de valores apresenta-se como uma grande vantagem, pois permite conciliar um elevado valor de potência mecânica e rendimento da turbina no mesmo ponto de funcionamento.

No procedimento experimental deste ensaio estava previamente definido traçar as curvas características para vários níveis de admissão, mantendo a pressão fixa. Na prática realizou-se apenas o ensaio para o nível de admissão de 100%, pois para os níveis de 25, 50 e 75% verificaram-se valores de momento e velocidade máximos reduzidos. Desta forma as potências mecânicas resultantes são valores pouco relevantes no âmbito deste projecto. Para comprovar este facto, foram medidos experimentalmente os momentos e velocidades máximas, para os níveis de admissão de 25, 50 e 75%, para as diferentes pressões, tabela 7.4.

No decorrer do ensaio, o método de reajustar o nível do reservatório no final de cada medição, embora demoroso revelou-se eficaz. As pressões a montante da turbina mantiveram-se constantes, como se pode ver nas tabelas de resultados obtidos. A pressão a jusante da turbina é *0bar*, correspondente à pressão atmosférica. Desta forma, verifica-se que a instalação colocada a jusante da turbina não tem uma perda de carga suficientemente grande para influenciar esta pressão quando o nível de admissão é máximo.

Os resultados obtidos experimentalmente são conclusivos, permitindo caracterizar o comportamento da turbina com curvas características e curvas da potência mecânica em função da velocidade de rotação. A proximidade dos valores de caudal obtidos, possibilitou ainda traçar um esboço das curvas de rendimento.

8 Curvas Características para Altura Manométrica de 3,00bar

Com base na experiência da *Valcon* na comercialização de válvulas automáticas de controlo, é de todo o interesse conhecer o comportamento do dispositivo para pressões de 1 e 3bar. Estes são valores de quedas de pressão vulgarmente utilizados nas condutas.

Não sendo possível obter resultados experimentais do ensaio realizado no *Laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior*, para pressões de 3bar, realizou-se o ensaio alternativo no laboratório da *Valcon*, com possibilidade de pressão até 1,05bar. Desta forma não foi possível obter experimentalmente qualquer informação acerca do funcionamento do dispositivo à pressão de 3bar. Optou-se assim por recorrer à análise dimensional, descrita na secção 3.2, para obter informação correspondente à queda de pressão de 3bar com base em resultados obtidos no laboratório para pressões inferiores.

Fazendo uma análise dimensional, são determinadas as grandezas correspondentes à altura manométrica de 3,00bar, com base nos resultados experimentais obtidos para a pressão de 1,05bar. Para determinar n_2 , Q_2 , P_2 e M_2 são utilizadas as fórmulas 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19. Note-se que, como os parâmetros são adimensionais e matematicamente as unidades se anulam, é indiferente a unidade utilizada. Optou-se assim por utilizar a velocidade n_2 que tem a unidade [rpm], em vez da velocidade angular ω_2 em [rad/s].

Com base nos resultados obtidos, tabela 8.1, determina-se graficamente a curva característica e a potência mecânica disponível no veio da turbina em função da velocidade de rotação, figuras 8.1 e 8.2.

Como foi descrito na secção 3.2.1, ao fazer a análise dimensional, como o rendimento é constante, implicitamente está-se a considerar que o rendimento correspondente à altura de 1,05bar, é o mesmo para a altura de 3,00bar. Assim, a potência mecânica obtida com 3bar, não corresponde ao valor que se obteria fazendo o ensaio laboratorialmente.

Esta aproximação prende-se com o facto de não ser possível determinar experimentalmente, para 3bar de altura, o rendimento correspondente ao ponto de funcionamento da turbina. Fazer esta aproximação é um procedimento usual, como exemplifica por exemplo o exercício 6.1 da referência bibliográfica [4] na página 108.

Sendo que o ensaio experimental foi realizado para as alturas manométricas de 0,95, 1,00 e 1,05bar, é possível fazer a análise dimensional a partir de qualquer um destes valores. Sabendo que o rendimento da turbina é optimizado entre 0,95 e 1,05bar com o aumento da altura manométrica, figura 7.7, considerando que esta tendência se mantém para a altura de 3bar, optou-se por utilizar a altura a que corresponde o maior rendimento, 1,05bar.

A curva característica adimensionalizada para a pressão de 3bar, figura 8.1, mostra que o binário máximo correspondente à velocidade do eixo nula é de 28N.m. A velocidade

8 Curvas Características para Altura Manométrica de 3,00bar

H ₁ =1.05bar				H ₂ =3.00bar			
n ₁ [rpm]	Q ₁ [m ³ /h]	P ₁ [W]	M ₁ [N.m]	n ₂ [rpm]	Q ₂ [m ³ /h]	P ₂ [W]	M ₂ [N.m]
0	130.0	0	9.8	0	219.7	0	28.0
250							
500	122.0	481.7	9.2	845.2	206.2	2326.4	26.3
750	121.0	675.4	8.6	1267.7	204.5	3262.0	24.6
1000	131.5	837.8	8.0	1690.3	222.3	4045.9	22.9
1250	125.5	968.7	7.4	2112.9	212.1	4678.1	21.1
1500	134.0	1036.7	6.6	2535.5	226.5	5006.8	18.9
1750	120.5	1062.9	5.8	2958.0	203.7	5133.3	16.6
2000	126.5	1005.3	4.8	3380.6	213.8	4855.1	13.7
2250	110.5	848.2	3.6	3803.2	186.8	4096.5	10.3
2500	112.5	680.7	2.6	4225.8	190.2	3287.3	7.4
2800	99.5	410.5	1.4	4732.9	168.2	1982.5	4.0

Tabela 8.1: Análise dimensional, com base nos resultados obtidos experimentalmente para a altura de 1,05bar, permitindo determinar as grandezas correspondentes para uma altura manométrica de 3,00bar.

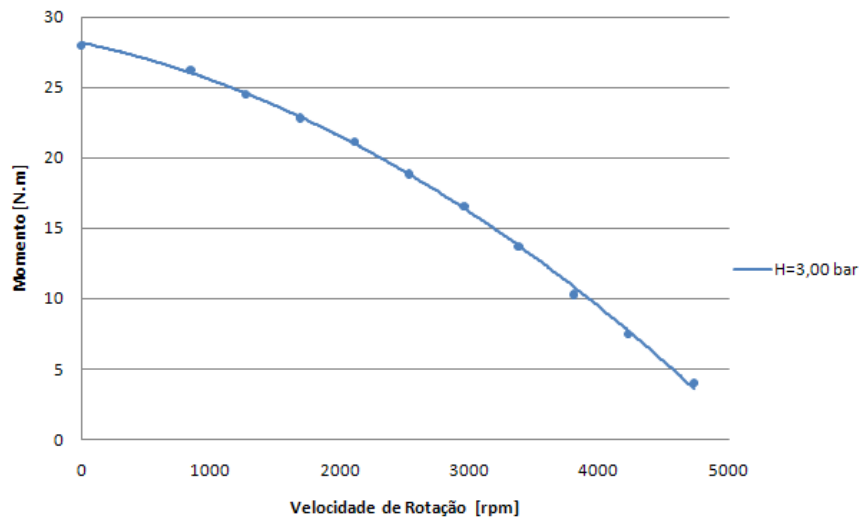


Figura 8.1: Curva característica para a pressão de 3bar.

8 Curvas Características para Altura Manométrica de 3,00bar

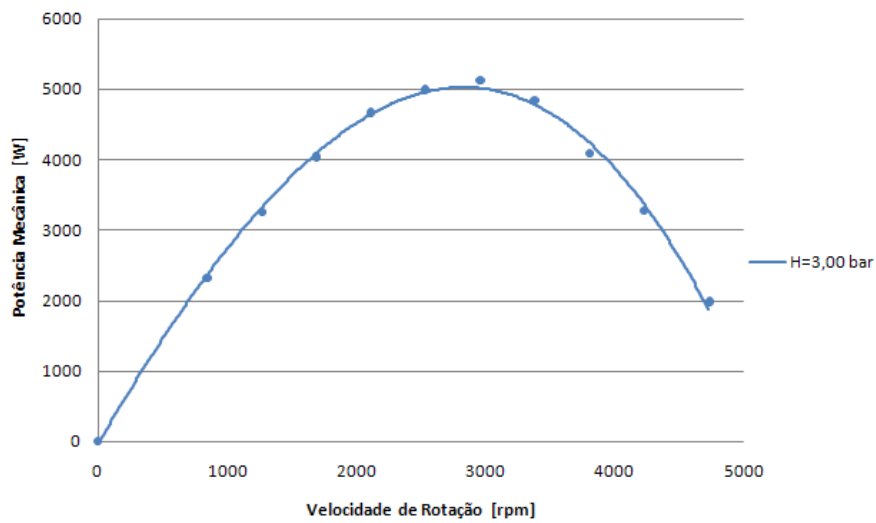


Figura 8.2: Potência mecânica obtida no eixo da turbina em função da velocidade de rotação. Verifica-se que a potência máxima, para uma velocidade de rotação entre 2500 e 3000rpm, é de 5000W.

máxima possível é aproximadamente 4700rpm. À semelhança do que acontece para as outras pressões, figura 7.6, o momento e a velocidade de rotação variam inversamente.

Traçando graficamente a relação entre a potência mecânica obtida no eixo da turbina e a velocidade de rotação, figura 8.2, verifica-se que a potência máxima é de 5000W. Valor que corresponde a uma velocidade de rotação de 2500 e 3000rpm, aproximadamente.

9 Regulação de Velocidade

Como foi descrito na secção 6.2, nos reguladores de velocidade tradicionais, a velocidade do sistema tende a diminuir ligeiramente com o aumento da potência fornecida. Embora a frequência do sistema seja praticamente constante, esta apresenta uma inclinação (SD) de 2 a 4%. No sistema de produção de energia desenvolvido pela *Valcon*, a regulação de velocidade utilizada é uma excepção deste modelo, dado que utiliza um regulador de velocidade com uma característica absolutamente linear. A velocidade do sistema é mantida constante, independentemente da potência solicitada pela carga, a inclinação é de 0%.

É importante nestas condições analisar as diferenças de comportamento do sistema, dado que a inclinação de 2 a 4% vulgarmente utilizada, é um parâmetro fulcral quando se pretende controlar o gerador no funcionamento em paralelo. Para fazer esta análise, é necessário ter em conta o modo como o regulador de velocidade actua sobre a turbina.

Nesta secção, pretende-se analisar a regulação de velocidade utilizada pela *Valcon*, do ponto de vista da estabilidade do sistema. São analisadas três situações distintas: operação do gerador síncrono isoladamente, em paralelo com uma rede infinitamente forte e em paralelo com um gerador semelhante.

9.1 Operação do Gerador Isoladamente

Quando o gerador alimenta uma carga isoladamente, a potência activa e reactiva fornecidas são impostas pela carga, ou seja, P e Q são constantes. Visualizando o esquema da figura 9.1, as duas entradas do sistema I_{exc} e M_{mec} , controlam as duas saídas V_a e f , respectivamente. É necessário ter em conta que, não havendo mecanismos de governo a controlar o sistema, uma variação da carga altera todas as grandezas, excepto I_{exc} que sem regulação de tensão é constante.

Considerando que a carga aplicada aos terminais do gerador, funciona com uma dada

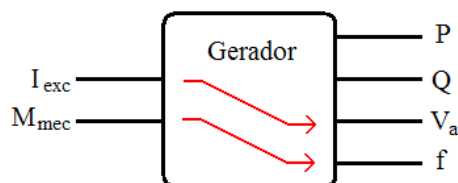


Figura 9.1: Quando o gerador alimenta uma carga isolada, P e Q são impostos pela carga, as entradas I_{exc} e M_{mec} controlam as saídas V_a e f , respectivamente.

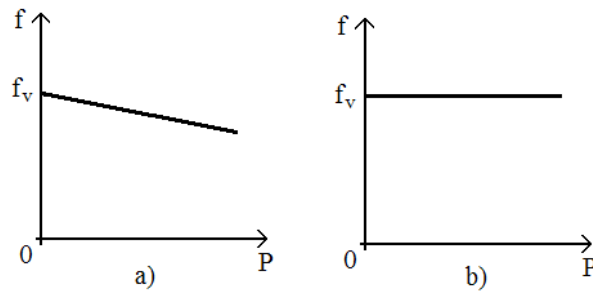


Figura 9.2: Comparação entre o regulador de velocidade tipo a) e o regulador *Valcon* b).

frequência normalizada, é importante garantir o valor da grandeza constante. Para permitir que a frequência seja constante, é essencial a utilização de um regulador de velocidade.

Compare-se agora a utilização do modelo tradicional de regulador de velocidade, para simplificação de linguagem designado por *regulador tipo*, representado na figura 9.2a) e o regulador de velocidade desenvolvido pela *Valcon*, designado por *regulador Valcon*, figura 9.2b).

Verifica-se que, no regulador tipo o aumento da potência solicitada pela carga, reduz ligeiramente a frequência do sistema. Contrariamente, a diminuição da potência solicitada pela carga, aumenta ligeiramente a frequência do sistema. No regulador *Valcon*, a frequência e por consequência a velocidade são sempre constantes, independentemente da variação da potência.

Nesta situação, em que o gerador opera isoladamente, a inclinação característica do regulador tipo não apresenta qualquer vantagem relativamente ao regulador *Valcon*. Apesar de a inclinação do regulador tipo, não afectar significativamente a frequência ao ponto de poder danificar ou alterar o rendimento das cargas, o regulador *Valcon* permite uma linearidade absoluta da grandeza. Neste sentido, esta regulação de velocidade é vantajosa relativamente à anterior.

Note-se que, em qualquer dos casos como existe um único dispositivo que gera energia, toda a potência solicitada pelas cargas é fornecida por ele. Nesta altura ainda não surgem questões relacionadas com a quantidade de potência fornecida pelo gerador, esta é imposta pela carga. O mesmo não se verifica quando o gerador está ligado em paralelo com outro dispositivo, seja ele uma rede infinitamente forte ou outro gerador semelhante.

9.2 Operação do Gerador em Paralelo com Rede Infinitamente Forte

Estando o gerador ligado em paralelo com uma rede infinitamente forte, a tensão aos terminais V_a e a frequência f são impostos pela própria rede. As grandezas são constantes, independentemente da solicitação de potência feita pela carga, ou da potência gerada pela máquina primária. Da visualização do esquema da figura 9.3, as duas entradas do sistema I_{exc} e M_{mec} , controlam as duas saídas das potências Q e P , respectivamente.

9 Regulação de Velocidade

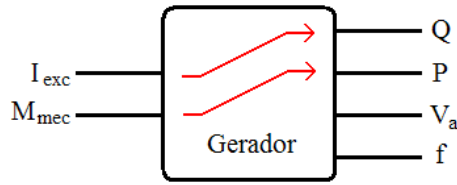


Figura 9.3: Quando o gerador é ligado em paralelo a uma rede infinitamente forte, V_a e f são impostos pela rede, as entradas I_{exc} e M_{mec} controlam as saídas Q e P , respectivamente.

Tendo em conta que o sistema de produção de energia em estudo é muito pequeno, relativamente a grandes centrais que têm maior influência no controlo dos valores de frequência e tensão da rede, não se justifica a utilização de mecanismos de governo, sejam eles de regulação de velocidade ou tensão. Num sistema de produção de energia de grande dimensão, o controlo das entradas I_{exc} e M_{mec} é necessário, para definir as potências fornecidas em função do consumo total das cargas.

No sistema de produção de energia em estudo, como as potências fornecidas são muito pequenas, aproximadamente $5KW$, o dispositivo pode ser regulado para fornecer potência Q constante, bastando para isso fixar inicialmente o valor da corrente I_{exc} . Caso se regulem as entradas para outras potências fornecidas, não há qualquer alteração significativa na rede. Tendo em conta esta característica de dimensão, não se justifica a utilização de mecanismos de governo que possibilitam a constante actualização das entradas do sistema.

Do ponto de vista da implementação, o reóstato de ajuste R_{aj} situado no circuito indutor, permite regular manualmente a corrente I_{exc} que define a potência reactiva Q . O binário M_{mec} é controlado indirectamente pela frequência de rede que define a velocidade do sistema. No entanto, caso se considere necessário, pode colocar-se uma válvula na conduta para controlar o caudal turbinado, desta forma define-se manualmente M_{mec} e regula-se P .

9.3 Operação em Paralelo entre Geradores Semelhantes

Na situação em que dois geradores semelhantes estão ligados em paralelo, a potência P_{total} e Q_{total} solicitada pela carga, corresponde à potência total fornecida pelo par de geradores, equação 6.4. Esta característica é análoga à operação do gerador isoladamente, a única diferença consiste no facto de, quando existe um único gerador, toda a potência solicitada pela carga é fornecida por este.

Havendo mais do que um gerador a alimentar a mesma carga, surge uma questão importante relacionada com o controlo de cada gerador, para definir qual a parcela de energia que cada um fornece à carga. Por outro lado, como a rede constituída pelos dois geradores não é infinitamente forte, qualquer variação numa das máquinas é sentida pela outra, neste sentido a análise torna-se mais complexa relativamente aos casos anteriores.

Analisando o esquema da figura 9.4, as saídas P_{total} e Q_{total} são impostas pela carga

9 Regulação de Velocidade

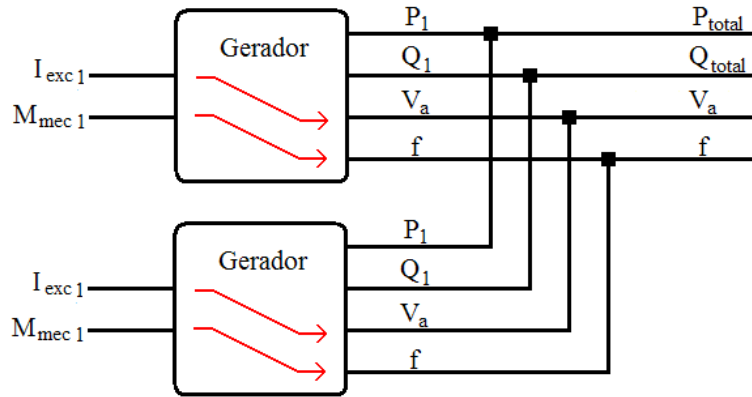


Figura 9.4: Quando dois geradores semelhantes são ligados em paralelo, P_{total} e Q_{total} são impostos pela carga, as entradas I_{exc1} e I_{exc2} controlam a saída V_a , as entradas M_{mec1} e M_{mec2} controlam a saída f .

aplicada, as entradas I_{exc1} e I_{exc2} controlam V_a , as entradas M_{mec1} e M_{mec2} controlam a frequência f . Note-se que, não faz qualquer sentido falar numa frequência f_1 ou f_2 , dado que o sistema funciona todo ele com uma única frequência f . A mesma observação é válida para a tensão aos terminais V_a , controlada por duas entradas. Em relação às potências reactivas Q_1 e Q_2 , podem variar em função de I_{exc1} e I_{exc2} , no entanto esta é uma condição que requer o estudo da regulação de tensão utilizada. Da mesma forma, as potências activas P_{ger1} e P_{ger2} , podem variar em função de M_{mec1} e M_{mec2} , no entanto esta condição depende da regulação de velocidade.

No regulador tipo, o aumento do *set point* de um dos geradores aumenta a frequência f do sistema e aumenta a potência P fornecida à carga por esse gerador, pelos motivos descritos na secção 6.2.4. Consequentemente diminui a potência P fornecida pelo outro gerador, dado que P_{total} é constante. O inverso também se verifica, reduzindo o *set point*.

Na verdade, é a inclinação de 2 a 4% que permite a regulação de P_{ger1} e P_{ger2} , em função das entradas do sistema M_{mec1} e M_{mec2} respectivamente. Por este motivo, no regulador Valcon com inclinação de 0%, não é possível regular a potência P fornecida por cada gerador. No entanto, o facto de a potência fornecida por cada gerador não ser regulável, não invalida o seu funcionamento em paralelo. Neste caso, é o próprio sistema, constituído pelos dois geradores quem estipula as potências P_{ger1} e P_{ger2} .

Para melhor compreensão do regulador Valcon, analise-se a situação limite em que SD (*speed droop*) tende para 0%. A inclinação tem um valor próximo de 0% no entanto este não é atingido, por este motivo a característica frequência-potência activa é uma recta praticamente horizontal. O raciocínio efectuado anteriormente para inclinações típicas, é todo ele aplicável nesta situação, verifica-se que uma pequena variação do *set point* no regulador de velocidade de um dos geradores, implica uma enorme variação da potência fornecida por cada gerador. O sistema não assegura uma boa regulação das potências P_{ger1} e P_{ger2} .

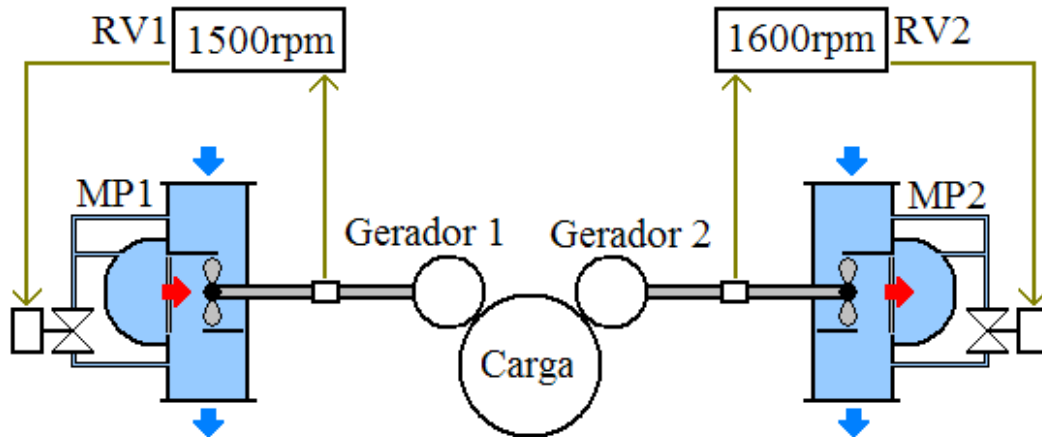


Figura 9.5: Representação esquemática de duas válvulas redutoras *FLUCON 200* com turbina integrada, que constituem as máquinas primárias *MP1* e *MP2* ligadas aos geradores 1 e 2, conectados a uma carga comum. Os reguladores de velocidade são designados pelas siglas *RV1* e *RV2*.

9.3.1 Regulador de Velocidade da *Valcon*

Para posteriormente se compreender a estabilidade do sistema constituído pelo regulador de velocidade da *Valcon*, analise-se primeiramente o esquema da figura 9.5. Este representa duas válvulas redutoras *FLUCON 200* com turbina integrada, que constituem as máquinas primárias *MP1* e *MP2*. Por sua vez estas estão mecânica e electricamente ligadas aos geradores 1 e 2, conectados a uma carga comum. Os reguladores de velocidade são designados pelas siglas *RV1* e *RV2*.

Inicialmente considere-se que, apenas o gerador 1 está conectado à carga e que *RV1* está regulado para manter o sistema com velocidade de rotação de $1500rpm$. Posteriormente, é sincronizado a este dispositivo o gerador 2, que tendo em conta as condições necessárias para o sincronismo tem que ter a mesma velocidade, $RV2 = 1500rpm$. Nesta situação o gerador 2 apenas flutua na rede, não fornecendo para já qualquer potência à carga, $P_{ger2} = 0$ e $P_{ger1} = P_{carga}$. A característica frequência-potência activa correspondente a este instante, é a representada na figura 9.6.

Para que o gerador 2 forneça alguma potência à carga, é necessário aumentar o *set point* do regulador *RV2*, por exemplo para $1600rpm$. Situação em que a válvula 2 abre, de modo a aumentar o binário fornecido e assim impor a velocidade estipulada. Por outro lado, *RV1* sente a velocidade do sistema aumentar, relativamente ao seu valor de referência. Assim, este actua no sentido de fechar a válvula 1, para reduzir a velocidade do sistema.

Conclui-se que, sendo a frequência (e consequentemente a velocidade) de todo o sistema uma só, é impossível satisfazer as condições de ambos os reguladores de velocidade sempre que, os valores de referência sejam distintos. O sistema global é instável, porque se a velocidade do sistema 1 e 2 não for exactamente a mesma, uma das máquinas primárias

9 Regulação de Velocidade

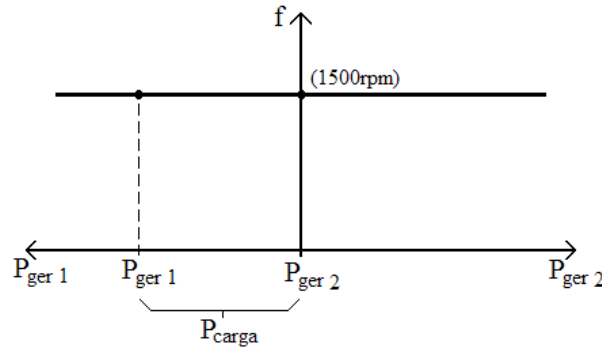


Figura 9.6: Potência activa fornecida por cada gerador à carga, $P_{ger\ 1}$ e $P_{ger\ 2}$, depois de sincronizar o gerador 2 ao gerador 1.

tende a ser inutilizada pela outra.

Com base no raciocínio anteriormente descrito, a válvula 2 abre cada vez mais, enquanto a válvula 1 fecha. Tendo em conta a maneira como o sistema converge, veja-se qual a situação final do mesmo. São três as situações possíveis, seguindo o exemplo, uma das hipóteses é no final a válvula 2 estar completamente aberta e a válvula 1 não fechar totalmente. Neste caso o sistema funciona com velocidade de $1500rpm$, velocidade imposta pelo regulador $RV1$. Outra hipótese, é a válvula 1 estar completamente fechada e a válvula 2 não abrir totalmente, sendo a velocidade de $1600rpm$ imposta por $RV2$. Na terceira e última situação, as duas válvulas estão na situação limite e oposta. No exemplo, estando a válvula 1 completamente fechada, se a válvula 2 não tiver capacidade para impor a velocidade de $1600rpm$, esta abre completamente sem alcançar o valor de referência. Ou então, estando a válvula 2 completamente aberta, se a válvula 1 não tiver capacidade para impor a velocidade de $1500rpm$, esta fecha completamente. Em qualquer dos casos, o estado final corresponde à terceira situação. No final, a velocidade do sistema será um valor contido entre 1500 e $1600rpm$.

De acordo com o exemplo, as características frequência-potência activa correspondentes a estas situações, são as representadas nas figura 9.7a), 9.7b) e 9.8, respectivamente. Genericamente, a alteração de $RV2$ tende a impor a velocidade de $1600rpm$ ao sistema, enquanto o gerador 1 fica total ou parcialmente inutilizado. Assim, a potência requerida pela carga é fornecida pelo gerador 2. Do ponto de vista do gerador 2, o gerador 1 é mais uma carga que este tem que suportar para manter a velocidade de $1600rpm$, assim, o gerador 2 tem que gerar maior binário relativamente à situação inicial.

Na figura 9.7a) o gerador 2 abre totalmente e o gerador 1 fecha parcialmente, situação a velocidade final imposta é $1500rpm$. Note-se que, embora a velocidade seja imposta por $RV1$, é o gerador 2 quem fornece energia à carga. Na figura 9.7b) o gerador 2 abre parcialmente e o gerador 1 fecha totalmente, a velocidade final imposta é $1600rpm$. Na figura 9.8, um dos geradores abre e outro fecha totalmente, sendo a velocidade final um valor intermédio ao estipulado pelos dois reguladores de velocidade. Conclui-se que, depois de sincronizados dois dispositivos de geração de energia, o sistema no qual se

9 Regulação de Velocidade

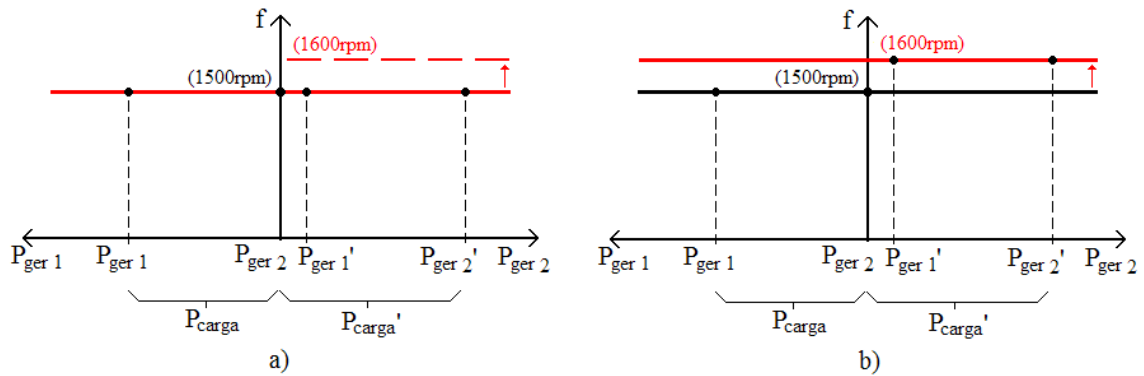


Figura 9.7: a) O gerador 2 abre totalmente e o gerador 1 fecha parcialmente, velocidade final $1500rpm$. b) o gerador 1 fecha totalmente e o gerador 2 abre parcialmente, velocidade final $1600rpm$.

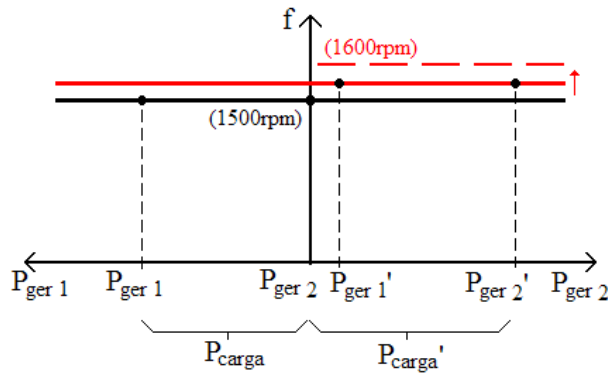


Figura 9.8: Características frequência-potência activa quando o gerador 2 abre totalmente e o gerador 1 fecha totalmente. A velocidade final é um valor entre 1500 e $1600rpm$.

aumenta o *set point* do regulador de velocidade, será aquele que passa a fornecer energia à carga, independentemente de qual a velocidade final do sistema.

A operação de dois geradores em paralelo, accionados por duas válvulas reductoras *FLUCON 200* com turbina integrada, colocadas em série na mesma conduta não é possível. O fecho de uma das válvulas, influencia a passagem de fluido pela outra. Na ligação em paralelo este problema não se verifica, no entanto o sistema é instável.

9.4 Regulação de Tensão

Da óptica da carga aplicada aos terminais do gerador, a regulação de tensão não necessita uma regulação tão fina como acontece no regulador de velocidade. O que se justifica com o facto de a generalidade das cargas permitirem uma variação da tensão de alimentação, sem contrapartidas consideráveis. Em pequenos sistemas de produção de energia, como é o caso da válvula *FLUCON 200* com turbina integrada, é usual fazer-se a regulação de tensão através do controlo da corrente de excitação, utilizando um reóstato de ajuste.

A principal diferença entre as duas opções é que no regulador de tensão, o valor da tensão aos terminais V_a é constantemente actualizado, enquanto que na regulação manual através do reóstato de ajuste, a regulação é feita pontualmente pelo utilizador. No segundo caso dificilmente se mantém V_a num valor constante, isso apenas se verifica quando o factor de potência e a quantidade de energia consumida são constantes.

A opção de utilizar um regulador de tensão ou um reóstato de ajuste para fazer o controlo da tensão, é também uma questão relacionada com as características da própria carga. Há cargas que não carecem de um valor de tensão V_a constante, como por exemplo em iluminação e aquecimento. A maioria das cargas tem que ser alimentada com uma tensão próxima do valor normalizado.

No âmbito da dissertação, não é tão relevante descrever a regulação de tensão, no sentido em que, não há um sistema inovador desenvolvido pela *Valcon* relativamente ao controlo da tensão do dispositivo. Assim, ao nível da implementação deste projecto pode ser utilizada um solução tradicional, mais ou menos complexa, como é o caso do regulador de tensão tipo ou do reóstato de ajuste.

10 Escolha do Gerador, Controlo de Parâmetros

Conhecidas as capacidades da máquina primária, determinadas experimentalmente, é possível fazer a escolha do gerador síncrono a integrar no conjunto. No entanto, para fazer uma escolha correcta do gerador, é necessário contabilizar vários aspectos, como por exemplo as perdas mecânicas relacionadas com o acoplamento entre a máquina primária e o gerador, caso se opte por utilizar desmultiplicação é necessário entrar com o seu rendimento, o rendimento da própria máquina síncrona, considerar o factor de potência de modo a contabilizar qual a potência aparente e activa, entre outros.

No âmbito desta dissertação, não é possível escolher o gerador a aplicar no conjunto, dado que se desconhece as características da carga que se pretende alimentar e o modo como o gerador está integrado: geração independente, em paralelo com uma rede infinitamente forte ou em paralelo com outros geradores semelhantes. Desta forma, são apresentadas algumas soluções possíveis de geradores a integrar no sistema.

É ainda descrito, tendo por base o modo como o gerador está integrado, qual o controlo dos parâmetros, corrente de excitação e binário mecânico, mais adequado em cada situação. Genericamente pode optar-se por uma solução mais dispendiosa, mas por vezes indispensável, constituída pelos mecanismos de governo, ou seja regulador de velocidade e de tensão. Outras alternativas, são a utilização do sistema de regulação de velocidade desenvolvido pela *Valcon* para controlar o binário mecânico e o reóstato manual de ajuste para regular a corrente de excitação.

10.1 Resultados Obtidos Laboratorialmente

Com base nos resultados obtidos no laboratório da *Valcon*, secção 7.3.2, traçaram-se para pressões próximas de $1bar$ as curvas características, as curvas de potência e as curvas aproximadas dos rendimentos. Tendo por base este mesmo ensaio, através da análise dimensional, traçou-se para a pressão de $3bar$ a curva característica e a curva de potência.

O dispositivo desenvolvido pela *Valcon* que se pretende aplicar nas condutas, é ligeiramente diferente do modelo utilizado laboratorialmente. A diferença prende-se com o facto de o último não ter conjunto obturador nem regulador de velocidade. Construtivamente, o modelo ensaiado laboratorialmente corresponde à situação em que o dispositivo completo tem o conjunto obturador totalmente aberto, permitindo a máxima passagem de fluido. Desta forma, as curvas características, obtidas com base no ensaio laboratorial, indicam qual o binário mecânico máximo que é possível gerar para cada velocidade de rotação. De modo análogo, as curvas da potência mecânica permitem conhecer para

cada velocidade de rotação, qual a potência máxima que é possível obter. Por exemplo, observando as figuras 8.1 e 8.2, para a velocidade de rotação de $3000rpm$, o binário e a potência máxima que a máquina primária pode fornecer são respectivamente $17N.m$ e $5000W$.

Segundo o exemplo anterior, no dispositivo real que se pretende aplicar nas condutas, ao regular a velocidade para $3000rpm$, o dispositivo pode fornecer até $17N.m$ ou $5000W$. Se a carga aplicada ao gerador criar no eixo do mesmo um binário resistente inferior a $17N.m$, por exemplo $12N.m$, o conjunto obturador fecha ligeiramente de forma a diminuir a admissão de fluido. Assim, a velocidade é mantida constante. Nesta situação, a curva característica não é conhecida, mas esse facto não é relevante, no sentido em que se conhece o binário máximo que a máquina primária pode fornecer.

Quando a máquina primária fornece o binário máximo para uma dada velocidade de rotação, o conjunto obturador está no seu nível de abertura máximo. Com base no mesmo exemplo, se a carga aplicada ao gerador criar no eixo do mesmo um binário resistente superior a $17N.m$, por exemplo $22N.m$, o conjunto obturador mantém a abertura máxima. No entanto, para atingir o binário desejado é deslocado o ponto de funcionamento na curva característica, no sentido de diminuir a velocidade de rotação inicial de $3000rpm$. Observando a figura 8.1, quando a velocidade do conjunto atinge $2100rpm$ aproximadamente, é satisfeito o binário de $22N.m$ requerido pela carga.

O facto de a velocidade de rotação do conjunto diminuir, de modo a satisfazer o binário exigido pela carga, pode ser um factor prejudicial à carga alimentada pelo gerador. Na situação em que o gerador opera isoladamente, este facto implica a diminuição da frequência, o que pode levar à perda de rendimento ou mesmo avaria da carga alimentada pelo gerador. Esta análise realça o facto de as curvas obtidas laboratorialmente para níveis de admissão máximos serem de extrema importância, estas permitem saber o valor limite de binário e potência que pode ser requerido pelo gerador à máquina primária.

10.2 Controlo de Parâmetros

Teoricamente, quando o gerador opera isoladamente, é necessário regular o binário e a corrente de excitação do dispositivo para garantir que as cargas são alimentadas com tensão e frequência constantes. Na prática, nem sempre se justifica a utilização de mecanismos de governo. O projectista deve ter em consideração quais as características da carga que se pretende alimentar, assim como, saber se esta varia muito ou pouco ao longo do tempo.

Por exemplo, se a energia gerada é utilizada para iluminação, ou sistemas de aquecimento por resistência, não é necessário garantir o valor da tensão e frequência constantes, dado que este tipo de equipamentos não é significativamente afectado pela variação das grandezas. Outra situação, é o caso em que a carga, embora exija tensão e frequência constantes, não varia significativamente a potência consumida. É o que acontece por exemplo com os dispositivos electrónicos. Nesta situação, pode acontecer que não se justifique a utilização de mecanismos de governo, no entanto é necessário regular pontualmente a corrente de excitação I_{exc} e o binário mecânico M_{mec} , de forma a ajustar a

tensão e a frequência às características da carga, que são praticamente constantes. Se a carga varia significativamente a potência consumida e exige valores de tensão e frequência constantes, é essencial a utilização de mecanismos de governo. Esta é a única maneira de manter constantes a tensão e a frequência do sistema em função das variações da potência da carga. Esta situação verifica-se por exemplo, quando a carga é uma bomba hidráulica que varia significativamente o seu ponto de funcionamento ao longo do tempo.

Quando a operação do gerador está integrada numa rede infinitamente forte, sendo a tensão e a frequência impostas pela própria rede, os únicos parâmetros a controlar são as potências activa e reactiva. Para isso basta regular pontualmente a corrente de excitação e o binário mecânico. Note-se que, existe a possibilidade de as potências variarem sem que a rede seja negativamente afectada. Por esta razão, não se justifica a utilização de mecanismos de governo.

Como se descreveu na secção 9.3, na operação em paralelo entre dois geradores semelhantes, é indispensável a utilização de mecanismos de governo com a inclinação característica, superior a 0%. Esta condição é independente das possíveis variações da carga e das suas características.

Do ponto de vista da implementação, é de todo o interesse ter em conta os aspectos económicos associados aos dispositivos de geração. Por este motivo, sempre que possível abdica-se dos mecanismos de governo que são mais caros, optando-se por dispositivos que permitem ajustar o sistema pontualmente.

Embora para reduzidos valores de potência (por exemplo 5000W) o mercado não apresente uma grande quantidade de oferta, há alguns dispositivos desenvolvidos neste sentido como é o caso dos geradores síncronos *ST Series* monofásicos e *STC Series* trifásicos.

10.2.1 Geradores Síncronos *ST* e *STC Series*

As séries de geradores monofásicos *ST Series* e trifásicos *STC Series*, apresentam-se como uma possível solução no âmbito desta dissertação. A sua análise é interessante, no sentido que o dispositivo já integra o equipamento necessário para fazer a regulação da corrente de excitação pontualmente. A corrente de excitação é gerada pela própria máquina, desta forma dispensa um dispositivo extra para gerar essa corrente, como usualmente sucede.

A série de geradores *ST Series* é representada pelo esquema eléctrico da figura 10.1. Os dois anéis que contactam com as escovas, permitem ligar o rotor bobinado ao circuito de excitação. O circuito de excitação é constituído por uma *ponte de Graetz* com quatro diodos, este permite rectificar para corrente continua uma parcela da corrente alternada gerada pela própria máquina, note-se que a máquina é auto-excitada. Em série com este circuito é colocado um reóstato para regular a corrente de excitação.

O enrolamento do estator é constituído por diversos terminais, que podem ser combinados para obter diferentes tensões e frequências de saída: 60Hz 230V, 60Hz 115V, 50Hz 230V e 50Hz 115V. Os terminais *U1* e *U2* são conectados á carga que se pretende alimentar. Segundo o fabricante, estes geradores são apropriados para gerar energia para sistemas de iluminação, electrodomésticos, e pequenas aplicações domésticas em geral. Note-se que esta série de geradores não tem nenhum dispositivo para regular a velocidade de rotação do dispositivo, este parâmetro é controlado separadamente.

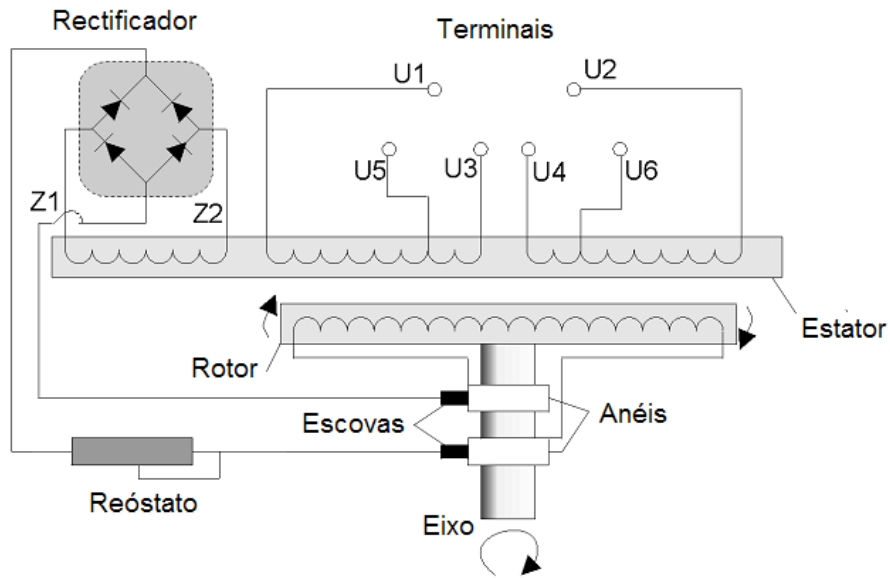


Figura 10.1: Esquema eléctrico dos geradores *ST Series* com auto-excitação.[20]

<i>ST Series</i>			
Modelo	P_{out} [KW]	Pares de pólos	$\cos\theta$
ST-1-2	1	1	1
ST-2-2	2	1	1
ST-3-2	3	1	1
ST-5-2	5	1	1
ST-2	2	2	1
ST-3	3	2	1
ST-5	5	2	1
ST-7.5	7.5	2	1
ST-10	10	2	1
ST-12	12	2	1
ST-15	15	2	1
ST-20	20	2	1
ST-24	24	2	1

Tabela 10.1: Geradores síncronos monofásicos de rotor bobinado *ST Series*. [20]

<i>STC Series</i>				
Modelo	P_{out} [KW]	S_{out} [KVA]	Pares de pólos	Velocidade [rpm]
STC-5-2	6.3	5	1	3000
STC-3	3.8	3	2	1500
STC-5	6.3	5	2	1500
STC-7.5	9.4	7.5	2	1500
STC-8	10	8	2	1500
STC-10	12.5	10	2	1500
STC-12	15	12	2	1500
STC-15	18.8	15	2	1500
STC-20	25	20	2	1500
STC-24	30	24	2	1500
STC-30	37.5	30	2	1500
STC-40	50	40	2	1500
STC-50	62.5	50	2	1500

Tabela 10.2: Geradores síncronos trifásicos de rotor bobinado *ST Series*. [21]

A tabela 10.1 representa todos os geradores *ST Series*. Para potências inferiores e iguais a $5KW$ os geradores são constituídos por um ou dois pares de pólos, o que corresponde a $3000rpm$ ou $1500rpm$ à frequência de $50Hz$. Para valores superiores a $5KW$ os geradores têm dois pares de pólos.

Tendo em conta as curvas características obtidas na secção 8 para a altura manométrica de $3bar$, a potência máxima fornecida pela máquina primária é de aproximadamente $5KW$, correspondente a uma velocidade muito próxima de $3000rpm$. Desta forma é de todo o interesse utilizar um gerador que funcione com esta velocidade, é o caso do modelo *ST-5-2* da serie com potência nominal de $5KW$ (considerando o factor de potência igual a 1 à velocidade de $3000rpm$). Ao optar-se por um gerador com dois pares de pólos ($1500rpm$), a potência fornecida pela máquina primária reduz-se para $3500rpm$, aproximadamente, valor um pouco abaixo da potência máxima possível.

Para a altura manométrica de $1bar$, com base na figura 7.6, a potência mecânica máxima é de aproximadamente $900W$. O valor é atingido quando a velocidade de rotação do dispositivo é próximo de $1500rpm$. Com base nesta informação pode utilizar-se o modelo *ST-2* com dois pares de pólos e potência de $2KW$, no entanto, tendo em conta a diferença significativa entre a potência disponibilizada pela máquina primária e a potência característica do gerador, este fica sub-aproveitado.

Os geradores *STC Series*, construtivamente são muito semelhantes aos anteriormente descritos, as únicas diferenças prendem-se com o facto de estes serem trifásicos. A tabela 10.2 representa os vários modelos disponíveis, assim como as suas características. Para a altura manométrica de $3bar$ o modelo *STC-5-2* é uma boa opção, dado que a sua potência é de $5KW$ e a velocidade de rotação é de $3000rpm$. Para a altura manométrica de $1bar$, tendo em conta que a potência máxima é $900W$, correspondente á velocidade

10 Escolha do Gerador, Controle de Parâmetros

de aproximadamente $1500rpm$, pode optar-se pelo modelo *STC-3*. No entanto, como a potência nominal do gerador é de $3KW$, este fica sub-aproveitado pois a máquina primária apenas pode fornecer potência mecânica até $900W$. [20, 21]

11 Conclusão

Há projectos desenvolvidos no sentido de fazer o aproveitamento energético em válvulas redutoras de pressão. As soluções apresentadas consistem em colocar na conduta um dispositivo de geração em série com o dispositivo de controlo de pressão. Assim, primeiramente é feito o aproveitamento energético e posteriormente é feita a regulação da pressão a jusante. O dispositivo desenvolvido pela *Valcon* é inovador, no sentido em que integra numa única válvula a turbina e o conjunto obturador para fazer geração e regulação de pressão, respectivamente.

Ao nível do sistema de pilotagem da válvula, a empresa apresenta um sistema de redução de pressão diferencial ou um dispositivo que permite manter constante a velocidade de rotação do eixo da turbina, independentemente das variações de pressão a montante da válvula. Como ambos os sistemas actuam sobre o mesmo conjunto obturador, não é possível utiliza-los em simultâneo.

No primeiro caso a regulação de pressão a jusante da válvula é garantida, no entanto a velocidade de rotação no eixo da turbina é uma consequência da grandeza anterior. No segundo caso é a queda de pressão que depende da velocidade definida, assim a válvula deixa de fazer uma redução de pressão diferencial. Do ponto de vista hidráulico este aspecto constitui uma desvantagem, no entanto, na óptica do controlo dos parâmetros do gerador este pode significar uma vantagem, dependendo do modo como o gerador está integrado: operação do gerador isoladamente, em paralelo com uma rede infinitamente forte ou em paralelo com outro gerador semelhante.

Experimentalmente, a fim de caracterizar o comportamento da turbina, realizaram-se ensaios para as pressões de 0.95, 1.00 e 1.05bar. Genericamente os resultados obtidos são coerentes, permitindo traçar a curva característica, assim como a variação de potência em função da velocidade. Recorrendo à análise dimensional, é possível caracterizar o comportamento da turbina para qualquer altura manométrica. Sendo a queda de pressão de 3bar um valor típico na redução de pressão em condutas, efectuou-se a análise dimensional para esta pressão.

Para a pressão de 3bar a potência máxima que o dispositivo pode gerar é de aproximadamente 5000W, valor correspondente à velocidade de rotação próxima de 3000rpm. Com base nesta informação é possível seleccionar a gerador síncrono que mais se adequa ao funcionamento da máquina primária. Neste caso, o gerador síncrono deve ter um par de pólos e a potência nominal do mesmo deve aproximar-se do valor de potência máxima.

É importante salientar o facto de o dispositivo desenvolvido pela *Valcon* que se pretende aplicar nas condutas, ser ligeiramente diferente do modelo utilizado laboratorialmente. A diferença prende-se com o facto de o último não ter conjunto obturador nem regulador de velocidade. Construtivamente, o modelo ensaiado laboratorialmente corresponde à situação em que o dispositivo completo tem o conjunto obturador totalmente aberto,

permitindo a máxima passagem de fluido. Desta forma, as curvas características, obtidas com base no ensaio laboratorial, indicam qual o binário mecânico máximo que é possível gerar para cada velocidade de rotação. De modo análogo, as curvas da potência mecânica permitem conhecer para cada velocidade de rotação, qual a potência máxima que é possível obter.

Tendo em conta a aplicação do gerador síncrono, este pode ser controlado por meio de duas forças, a corrente de excitação e o binário mecânico que está directamente relacionado com o controlo da velocidade da turbina. A corrente de excitação pode ser regulada manualmente através de um reóstato que permite um ajuste pontual, ou através de um regulador de tensão que permite uma regulação constante. Para regular o binário mecânico são utilizados reguladores de velocidade, ou como alternativa o dispositivo de regulação de velocidade proposto pela *Valcon* com características bem distintas.

Na situação em que o gerador opera isoladamente, como as potências activa e reactiva são impostas pela carga aplicada, a corrente de excitação controla a tensão aos terminais da máquina e o binário mecânico controla a frequência do sistema. Como grande parte das cargas são alimentadas a tensão e frequência constante, interessa fixar estes valores. Assim, se o consumo da carga não variar significativamente pode regular-se a corrente de excitação através do reóstato, caso contrário utiliza-se o regulador de tensão.

Relativamente ao controlo do binário mecânico, o sistema proposto pela *Valcon* apresenta vantagens. Além de ser economicamente viável, permite uma regulação linear mantendo constante o valor da velocidade de rotação da turbina. Note-se que, os reguladores de velocidade tradicionais apresentam uma característica igualmente linear, no entanto com um declive de 2 a 4%, de modo que ao aumento da potência corresponde uma ligeira diminuição da velocidade de rotação.

Na operação do gerador em paralelo com uma rede infinitamente forte, a tensão aos terminais e a frequência são impostos pela própria rede. Neste caso particular, a corrente de excitação e o binário mecânico actuam sobre a potência reactiva e activa fornecidas. Nesta situação não se justifica o controlo destes parâmetros, pois a ordem de grandeza das potências é muito pequena relativamente às características da rede. Esta é a única situação em que é possível conciliar a redução de pressão diferencial e o controlo da velocidade da turbina.

A operação em paralelo entre geradores semelhantes é idêntica à operação do gerador isoladamente, a principal diferença está relacionada com o facto de qualquer variação efectuada num dos dispositivos ser sentida pelo outro, o que torna a análise mais complexa. O controlo da operação entre geradores semelhantes é tradicionalmente conseguida através de mecanismos de governo com declives característicos. Nos reguladores de velocidade, é este declive que permite ajustar o funcionamento entre o par de geradores. Com base na análise feita no secção 9.3.1, conclui-se que não é possível substituir a solução convencional pelo regulador de velocidade desenvolvido pela *Valcon*, caracterizado por um declive de 0%. Este apresenta instabilidade, no sentido em que as válvulas tendem para situações limite e opostas.

Pelas razões descritas, o dispositivo desenvolvido pela *Valcon* integrado com o sistema piloto para fazer redução de pressão diferencial, é adequado para ser aplicado em paralelo com uma rede infinitamente forte. O sistema permite fazer o aproveitamento energético

11 Conclusão

em válvulas redutoras de pressão, sendo a energia produzida posteriormente vendida à rede pública. A fim de implementar esta solução, são propostos os geradores *ST* e *STC Series*. Estes são geradores síncronos comuns, com a particularidade de serem auto-excitados, evitando assim a utilização de uma fonte de energia externa, necessária para fornecer a corrente de excitação ao indutor.

Considerando a fase inicial do projecto, não se pretende no âmbito desta dissertação apresentar uma solução final, assim são definidas as potencialidades do dispositivo, qual a sua aplicabilidade, vantagens e desvantagens associadas a cada situação e são apresentadas possíveis soluções ao nível do conversor mecano-eléctrico a utilizar.

Bibliografia

- [1] Shanghai qiuyi valve company - products. <http://www.valvesuppliers.cn/>, 15 de Novembro 2008.
- [2] VALCON, Empresa de Válvulas Hidráulicas Automáticas de Controlo, 2008/2009.
- [3] Maria Helena de A. G. Soares José G. Soares Amaro Maria Helena Escudeiro de Sousa. *Manual de Saneamento Básico*. Direcção geral dos Recursos Naturais, Madeira & Madeira udgave, 1991.
- [4] Archibald Joseph Macintyre. *Máquinas Motrizes Hidráulicas*. Guanabara Dois S.A., 1983.
- [5] A. T. Sayers. *Hydraulic and Compressible Flow Turbomachines*. McGraw-Hill Book Company, 1990.
- [6] Robert W. Fox Alan T. McDonald. *Introduction to Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons, 1985.
- [7] Irving I. Kosow. *Máquinas Eléctricas e Transformadores*. Editora Globo, 8. udgave, 1972.
- [8] José Manuel de Simões Morais. *Elementos de Electricidade*. Porto Editora, 13. udgave, 1984.
- [9] M. Kostenko L. Piotrovski. *Máquinas Eléctricas - Volume I*. Edições Lopes da Silva, 1979.
- [10] M. Kostenko L. Piotrovski. *Máquinas Eléctricas - Volume II*. Edições Lopes da Silva, 1979.
- [11] Orlando Sílvio Lobosco José Luis Pereira da Costa Dias. *Seleção e Aplicação de Motores Eléctricos*. McGraw-Hill, 1988.
- [12] Rui M. G. Castro. *Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Introdução à Energia Mini-Hídrica*. Instituto Superior Técnico, edição 3.1. udgave, Março 2008.
- [13] João C. P. Rocha. *Metodologia de Projecto de Sistemas de Produção de Electricidade Descentralizada Baseados em Energia Hídrica*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho 2008.
- [14] Zia A. Yamayee Juan L. Bala. *Electromechanical Energy Devices and Power Systems*. John Wiley & Sons, 1994.

Bibliografia

- [15] Stephen J. Chapman. *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill, 2. udgave, 1985.
- [16] José Rodrigues. *Electrotecnia Corrente Alternada*. Didática Editora, 1. udgave, 1981.
- [17] José Pedro Sucena Paiva. *Redes de Energia Eléctrica: uma Análise Sistémica*. Instituto Superior Técnico, 2. udgave, 2007.
- [18] Olle I. Elgerd. *Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Eléctricas*. McGraw-Hill, 1976.
- [19] Sen Paresh Chandra. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. John Wiley & Sons, 1986.
- [20] R. G. Keen. *ST Series - Single-phase AC Synchronous Generator - Instructions for Operation and Maintenance*, Maio 2004.
- [21] R. G. Keen. *STC Series - Three-phase AC Synchronous Generator - Instructions for Operation and Maintenance*, Maio 2004.

Anexo A - Caudais Médios

No decorrer do ensaio, verificou-se que o caudalímetro regista diversos valores em curto espaço de tempo, actualizando constantemente a grandeza, assim optou-se por registar nas tabelas o caudal mínimo e máximo, tabela 11.1.

p=0.95bar			p=1.00bar			p=1.05bar		
n [rpm]	Q [m3/h]	Q _{md} [m3/h]	n [rpm]	Q [m3/h]	Q _{md} [m3/h]	n [rpm]	Q [m3/h]	Q _{md} [m3/h]
0	121 - 127	124.0	0	115 - 122	118.5	0	127 - 133	130.0
250	118 - 130	124.0	250			250		
500	127 - 135	131.0	500	116 - 120	118.0	500	121 - 123	122.0
750	123 - 133	128.0	750	125 - 138	131.5	750	118 - 124	121.0
1000	125 - 131	128.0	1000	123 - 128	125.5	1000	128 - 135	131.5
1250	122 - 125	123.5	1250	122 - 133	127.5	1250	123 - 128	125.5
1500	124 - 132	128.0	1500	116 - 123	119.5	1500	130 - 138	134.0
1750	108 - 113	110.5	1750	120 - 131	125.5	1750	117 - 124	120.5
2000	109 - 115	112.0	2000	112 - 120	116.0	2000	121 - 132	126.5
2250	101 - 108	104.5	2250	111 - 121	116.0	2250	108 - 113	110.5
2500	98 - 102	100.0	2500	102 - 109	105.5	2500	107 - 118	112.5
2550	94 - 103	98.5	2530	98 - 103	100.5	2800	95 - 104	99.5

Tabela 11.1: Caudais obtidos experimentalmente; determinação dos caudais médios.

Tendo em conta a proximidade de valores dos caudais medidos, é feita uma nova média destes valores a fim de poder aproximar o rendimento da turbina num único valor. As figuras 11.1, 11.2 e 11.3 representam graficamente essa media.

Verifica-se que para uma dada pressão, os caudais obtidos não seguem uma sequência lógica em função da aumento gradual da velocidade de rotação. No entanto os caudais médios obtidos não distam muito entre si, excepto quando a velocidade atinge valores elevados, superiores a $2000rpm$. Nesta situação verifica-se uma ligeira diminuição do caudal médio. considera-se esta aproximação para valores até $2000rpm$, inclusive.

Bibliografia

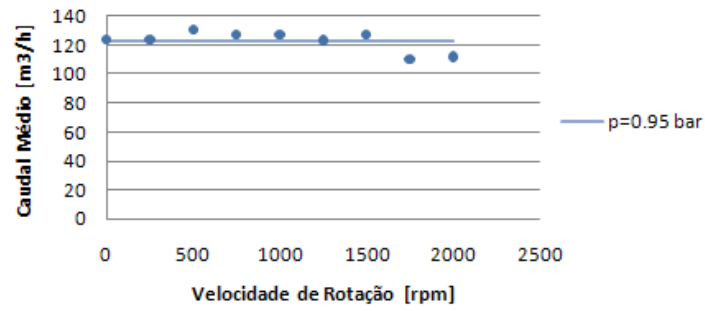


Figura 11.1: Caudal médio total para a pressão de 0.95bar , tendo em conta a proximidade de valores dos caudais médios.

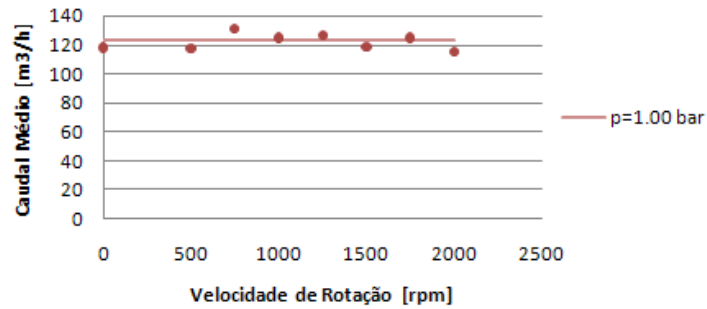


Figura 11.2: Caudal médio total para a pressão de 1.00bar , tendo em conta a proximidade de valores dos caudais médios.

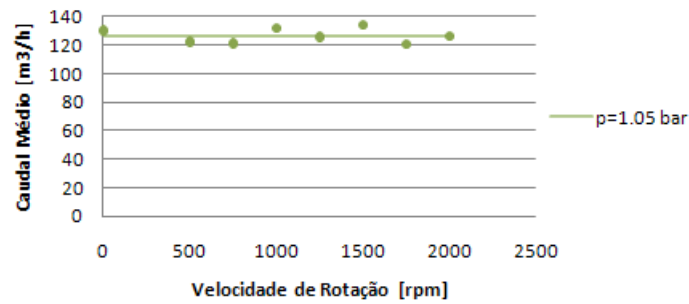


Figura 11.3: Caudal médio total para a pressão de 1.005bar , tendo em conta a proximidade de valores dos caudais médios.