



**UNIVERSIDADE DO ALGARVE**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**



**CENTRAL MICRO-HÍDRICA  
INCORPORADA EM CONDOTA ADUTORA**

**JOSÉ MANUEL DO LIVRAMENTO**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Energias  
Renováveis e Gestão de Energia**

**TRABALHO EFECTUADO SOB A ORIENTAÇÃO DE : PROF. DR. JOSÉ LUIS ARGÁIN**

**MAIO-2013**

## ÍNDICE

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE TABELAS E FOTOGRAFIAS

LISTA DE GRÁFICOS E DIAGRAMAS

LISTA DE FIGURAS

DEDICAÇÃO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

<b>1</b>	<b>ENQUADRAMENTO DO TRABALHO</b> .....	<b>1</b>
1.1	<b>ENQUADRAMENTO POLÍTICO</b> .....	<b>1</b>
1.2	<b>ENQUADRAMENTO ENERGÉTICO</b> .....	<b>2</b>
1.2.1	CONSIDERAÇÕES .....	2
1.2.2	CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA NACIONAL.....	4
1.3	<b>ESTRATÉGIA NACIONAL PARA A ENERGIA – ENE 2020</b> .....	<b>8</b>
1.3.1	LINHAS DE ORIENTAÇÃO.....	9
1.3.2	MEDIDAS PROPOSTAS E RESULTADOS ESPERADOS ATÉ 2020 PARA AS RENOVÁVEIS NO ÂMBITO DAS ENERGIA HÍDRICA.....	10
1.4	<b>DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - ENERGIA E AMBIENTE</b> .....	<b>11</b>
1.5	<b>ESTRATÉGIAS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL</b> .....	<b>12</b>
1.5.1	ESTRATÉGIAS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	12
1.5.2	PORTUGAL E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....	13
1.6	<b>«ENERGIAS RENOVÁVEIS» COMO RECURSO ENERGÉTICO</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>LEGISLAÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>ENQUADRAMENTO TECNOLÓGICO</b> .....	<b>18</b>
3.1	<b>ALTERNATIVAS E INOVAÇÃO</b> .....	<b>18</b>
3.2	<b>MOTIVAÇÃO E ESCOLHA DA FONTE</b> .....	<b>18</b>
3.3	<b>ESCOLHA DA MODALIDADE DE EXPLORAÇÃO</b> .....	<b>20</b>

<b>4</b>	<b>ESTADO DA ARTE – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
<b>4.1</b>	<b>OBSERVAÇÕES .....</b>	<b>21</b>
<b>4.2</b>	<b>SITUAÇÃO EM PORTUGAL.....</b>	<b>21</b>
<b>4.3</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO.....</b>	<b>22</b>
4.3.1	POTÊNCIA .....	22
4.3.2	QUEDA .....	23
4.3.3	CAUDAL.....	23
4.3.4	REGIME DE EXPLORAÇÃO.....	23
<b>4.4</b>	<b>CONSTITUIÇÃO DAS CMH .....</b>	<b>24</b>
4.4.1	ALBUFEIRA E AÇUDE .....	24
4.4.2	CANAL DE ADUÇÃO .....	25
4.4.3	CÂMARA DE CARGA .....	25
4.4.4	CONDUTA FORÇADA.....	25
4.4.5	EDIFÍCIO DA CENTRAL.....	25
4.4.6	RESTITUIÇÃO .....	26
<b>4.5</b>	<b>CONFIGURAÇÕES .....</b>	<b>26</b>
<b>4.6</b>	<b>SISTEMA PAT (PUMP AS TURBINE).....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>CONCEPÇÃO DO TRABALHO .....</b>	<b>29</b>
<b>5.1</b>	<b>OBSERVAÇÕES.....</b>	<b>29</b>
5.1.1	OBJECTIVOS .....	29
5.1.2	INOVAÇÃO .....	29
<b>5.2</b>	<b>ESCOLHA DO LOCAL.....</b>	<b>30</b>
<b>5.3</b>	<b>DOCUMENTAÇÃO BASE.....</b>	<b>31</b>
<b>5.4</b>	<b>ANÁLISE DA DOCUMENTAÇÃO (METODOLOGIA).....</b>	<b>31</b>
<b>5.5</b>	<b>CÁLCULOS PRELIMINARES (ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO).....</b>	<b>32</b>
5.5.1	MODELO DE OPTIMIZAÇÃO – ANÁLISE PRÉVIA .....	32
5.5.1.1	Introdução .....	32
5.5.1.2	Estratégia de Operação .....	33
5.5.1.3	Energia Eléctrica Produtível – Estimativa .....	33
5.5.1.3.1	..... Metodologia Simplificada	

5.5.1.3.2 .....	Potência Nominal
33	
5.5.1.3.3 .....	Estimativa da Energia Produtível
37	
5.5.2 OPÇÃO POR DOIS GRUPOS TURBINA/GERADOR.....	39
<b>5.6 MODELO REAL .....</b>	<b>40</b>
<b>6 GERADOR DE ENERGIA ELÉCTRICA .....</b>	<b>41</b>
<b>6.1 A MÁQUINA ASSÍNCRONA.....</b>	<b>41</b>
<b>6.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO .....</b>	<b>43</b>
<b>6.3 RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO .....</b>	<b>45</b>
<b>6.4 REGIMES DE FUNCIONAMENTO .....</b>	<b>46</b>
<b>6.5 ANÁLISE DOS REGIMES DE FUNCIONAMENTO .....</b>	<b>48</b>
6.5.1 Os CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS .....	48
6.5.2 VELOCIDADE E SENTIDO DE ROTAÇÃO .....	49
6.5.3 FORÇA MAGNETOMOTRIZ E CAMPO GIRANTE .....	50
6.5.4 NATUREZA DAS BOBINAS E BINÁRIOS .....	52
6.5.4.1 Bobinas Resistivas.....	53
6.5.4.2 Bobinas Indutivas.....	54
6.5.5 ESCORREGAMENTO .....	56
6.5.6 CONDIÇÕES DE ARRANQUE .....	59
<b>6.6 O GERADOR ASSÍNCRONO .....</b>	<b>61</b>
<b>6.7 DIAGRAMA VECTORIAL E ESQUEMA EQUIVALENTE .....</b>	<b>61</b>
<b>6.8 REGIMES DE FUNCIONAMENTO .....</b>	<b>69</b>
<b>6.9 VARIAÇÃO DA POTÊNCIA MECÂNICA E DO BINÁRIO COM O ESCORREGAMENTO .....</b>	<b>71</b>
<b>6.10 ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA .....</b>	<b>76</b>
6.10.1 DIAGRAMA DO CÍRCULO .....	76
6.10.2 Leitura do Binário e da Potência.....	81
6.10.3 RENDIMENTO E FACTOR DE POTÊNCIA .....	84
6.10.4 ESCORREGAMENTO .....	86
<b>6.11 DIAGRAMA DO CÍRCULO E REGIÕES DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA.....</b>	<b>86</b>
6.11.1 FUNCIONAMENTO COMO MOTOR.....	86

6.11.2	REGIMES DE TRAVÃO E DE GERADOR .....	88
6.11.3	OBTENÇÃO DO DIAGRAMA DO CÍRCULO.....	89
6.11.3.1	Construção .....	89
6.11.3.2	Leitura .....	90
<b>7</b>	<b>SISTEMA PAT ('PUMP AS TURBINE')</b> .....	<b>92</b>
<b>8</b>	<b>SISTEMA DE CONTROLE – VELOCIDADE CONSTANTE</b> .....	<b>96</b>
<b>9</b>	<b>CONCEPÇÃO E TESTE DO MODELO</b> .....	<b>98</b>
<b>9.1</b>	<b>OBJECTIVO</b> .....	<b>98</b>
<b>9.2</b>	<b>CONCEPÇÃO</b> .....	<b>99</b>
<b>9.3</b>	<b>TESTE DA MICRO-TURBINA</b> .....	<b>101</b>
9.3.1	OBSERVAÇÕES .....	101
9.3.2	DADOS E PARÂMETROS .....	101
9.3.3	MINITURBINA A TESTAR (BOMBA) .....	102
9.3.4	Instalação na ETA de Tavira para simulação da ETA do Beliche .....	104
9.3.5	Testes e Ensaios Realizados.....	106
9.3.6	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	108
9.3.6.1	Simulação da instalação na ETA do Beliche .....	108
9.3.6.2	Caudal vs Altura.....	108
9.3.6.3	Caudal em função do Binário .....	109
9.3.6.4	Caudal vs Potência Eléctrica.....	109
9.3.6.5	Caudal vs Rendimento Hidráulico.....	110
9.3.7	Conclusão .....	110
<b>9.4</b>	<b>GERADOR ASSÍNCRONO A VELOCIDADE CONSTANTE</b> .....	<b>111</b>
<b>10</b>	<b>MODELO FINAL</b> .....	<b>115</b>
<b>10.1</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b> .....	<b>115</b>
<b>10.2</b>	<b>INSTALAÇÃO HIDRÁULICA</b> .....	<b>116</b>
<b>10.3</b>	<b>INSTALAÇÃO ELECTROMECHANICA</b> .....	<b>117</b>
<b>10.4</b>	<b>AUTOMAÇÃO E CONTROLE</b> .....	<b>119</b>
<b>10.5</b>	<b>INSTALAÇÃO GLOBAL</b> .....	<b>120</b>
<b>11</b>	<b>FILOSOFIA DE FUNCIONAMENTO DA CMH DO BELICHE</b> .....	<b>123</b>

<b>12</b>	<b>CONCLUSÕES E RESULTADOS .....</b>	<b>124</b>
<b>12.1</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>124</b>
12.1.1	RETORNO DO INVESTIMENTO.....	124
12.1.2	TABELAS E DIAGRAMA DE COTAS (ALBUFEIRA).....	125
<b>12.2</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>127</b>
<b>13</b>	<b>LEGISLAÇÃO E BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>129</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>Sigla</b>	<b>Designação</b>
ENE	Estratégia nacional para a Energia
PNPA	Plano nacional de Política de Ambiente
AdA	Águas do Algarve, S.A.
ETA	Estação de Tratamento de Águas
EE	Estação Elevatória
CMH	Central Micro/Mini Hídrica
PaT	‘Pumb as Turbine’
C.C.	Curto-Circuito
DIN	Deutsches Institut fur Normung
KSB	KDB Pumps, Ltd
FER	Fontes de Energias Renováveis
EU	União Europeia
USD	Dólares USA
PIB	Produto Interno Bruto
GEE	Gases de Efeito de Estufa
EDS	Estratégia de Desenvolvimento Sustentável
ENDS	Estratégia Nacional para o Desenvolvimento Sustentável
PNPA	Plano Nacional de Política de Ambiente
CFD	Análise de Fluidos Computacional

## LISTA DE SÍMBOLOS

## SÍMBOLOS

<b>Simbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Designação</b>
P	W; kW; MW; GW;	Potência
P <sub>N</sub>	W; kW; MW; GW;	Potência nominal
η	-	Rendimento
g	9.81 m/s <sup>2</sup>	Aceleração gravítica
γ	N/m <sup>3</sup>	Peso volúmico
H <sub>u</sub>	m	Queda Útil
H <sub>b</sub>	m	Queda altura bruta
Q	m <sup>3</sup> /h ; l/mn ; l/s	Caudal
Q <sub>i</sub>	m <sup>3</sup> /h ; l/mn ; l/s	Caudal instalado
Q <sub>mod</sub>	m <sup>3</sup> /h ; l/mn ; l/s	Caudal modular
Q <sub>e</sub>	m <sup>3</sup> /h ; l/mn ; l/s	Caudal ecológico
Q <sub>N</sub>	m <sup>3</sup> /h ; l/mn ; l/s	Caudal Nominal
Q <sub>med</sub>	m <sup>3</sup> /h ; l/mn ; l/s	Caudal médio
Q <sub>min</sub>	m <sup>3</sup> /h ; l/mn ; l/s	Caudal mínimo
Q <sub>max</sub>	m <sup>3</sup> /h ; l/mn ; l/s	Caudal máximo
Q <sub>MT</sub>	m <sup>3</sup> /h ; l/mn ; l/s	Caudal máximo turbinável
α <sub>1</sub>	-	Limite de exploração de Turbinas
E <sub>a</sub>	GWh	Energia anual
N	r.p.m.	Velocidade de rotação
N <sub>g</sub>	r.p.m.	Velocidade do Campo Girante

$N_s$	r.p.m.	Velocidade de sincronismo
$N_r$	r.p.m.	Velocidade do rotor
$p$	-	Pares de pólos
$f$	Hz ; r.p.m.	Frequência
$f_r$	Hz ; r.p.m.	Frequência correntes do rotor
$m$	-	Nº de fases
$V$	V	Tensão eléctrica
$V_1$	V	Tensão do primário
$V_2$	V	Tensão do secundário
$V'_2 ; V''_2$	V	Tensão Secundária reduzida ao primário
$I$	A	Corrente
$I_1$	A	Corrente do primário /estator
$I_2$	A	Corrente do secundário / rotor
$I'_2 ; I''_2$	A	Corr. Secundária reduzida ao primário
$I_0$	A	Corrente de vazio
$I_{arr} ; I_{s=1}$	A	Corrente de arranque
$\omega$	rad/s	Velocidade angular
$\omega_r$	rad/s	Velocidade angular do rotor
$\omega_s$	rad/s	Velocidade angular do estator
$\omega_s$	rad/s	Velocidade angular síncrona
$H$	A/m	Campo Magnético
$B$	T	Campo de indução magnética
f.e.m.	V	Força electromotriz
$s$	-	Escorregamento
$i$	A	Corrente eléctrica induzida
$e; E$	V	f.e.m.induzida

R	$\Omega$	Resistência
$R_r$	$\Omega$	Resistência do rotor
$R_s$	$\Omega$	Resistência do estator
$R'_2$	$\Omega$	Resistência Secund. Reduz. ao primário
X	$\Omega$	Reactância
$X_r ; X_2$	$\Omega$	Reactância do rotor / secundário
$X_s ; X_1$	$\Omega$	Reactância do estator /primário
$X'_2$	$\Omega$	Reactância Secund. Reduz.ao primário
Z	$\Omega$	Impedância
$Z_r ; Z_2$	$\Omega$	Impedância do rotor /secundário
$Z_s ; Z_1$	$\Omega$	Impedância do estator /primário
$Z'_2 ; Z''_2$	$\Omega$	Impedância Secund. Reduz. ao primário
j	-	Unidade complexa ( $\sqrt{-1}$ )
M	N.m	Binário
$M_a$	N.m	Binário de arranque
$M_{max}$	N.m	Binário máximo
$\varphi ; \Phi$	$^\circ ; \text{rad}$	Ângulo de desfasamento
$\varphi_r ; \Phi_r ; \varphi_2 ; \Phi_2$	$^\circ ; \text{rad}$	Âng. desfas. rotor ( $V \leftrightarrow I$ )
$\varphi_s ; \Phi_s ; \varphi_1 ; \Phi_1$	$^\circ ; \text{rad}$	Âng. desfas. estator ( $V \leftrightarrow I$ )
$\Phi$	$^\circ ; \text{rad}$	Fluxo comum estator / rotor
$\Phi_{1d}$	$^\circ ; \text{rad}$	Fluxo de dispersão do estator
$\cos\varphi ; \cos\Phi$	-	Factor de potência
$X_{r,s}$	$\Omega$	$X_r$ para um determinado s
$E_{r,s}$	V	$E_r$ para um determinado s
$I_{r,s}$	A	$I_r$ para um determinado s

$\cos\varphi_{r,s}$	-	$\cos\varphi_r$ para um determinado s
$\lambda$	-	Relação de transformação
$K_1 ; K_2$	-	Coefficiente de Kapp
$n_1 ; n_2$	-	Nº de espiras (primário / secundário)
$\sigma$	-	Coefficiente de correcção
$P_j$	W; kW	Potência de Joule
$P_{mec}$	W; kW	Potência mecânica
$P_{s-r}$	W; kW	Potência transferida estator-rotor
$P_{em}$	W; kW	Potência de electromecânica
m.c.a	m	Metros de coluna de água
DN	mm	Diâmetro nominal
bar	$10^5 \text{ N/m}^2$	Unidade de Pressão

**LISTA DE TABELAS , GRÁFICOS , DIAGRAMAS****TABELAS**

<b>Nº</b>	<b>Designação</b>	<b>Origem</b>
Tabela-4.1	Classificação das Centrais Hidroeléctricas em função da potência instalada	LIV
Tabela-4.2	Classificação das Centrais Hidroeléctricas em função da Queda Útil	LIV
Tabela-5.1	Limites de Exploração das Turbinas	Castro
Tabela-5.2	Regimes de Funcionamento das Turbinas	Castro
Tabela-6.1	Velocidade em função dos pares de pólos	LIV
Tabela-6.2	Tabela de Leitura	LIV
Tabela-9.1	Valores pretendidos para simular a instalação na ETA do Beliche	LIV
Tabela-9.2	Valores do ensaio, sem pressão a jusante da Turbina	LIV
Tabela-9.3	Valores máximos atingidos nos ensaios de simulação	LIV
Tabela-10.1	Equipamentos Hidráulicos e Electromecânicos	LIV
Tabela-12.1	Algoritmo de Cálculo para a Tabela de Cálculo	LIV

**GRÁFICOS**

<b>Nº</b>	<b>Designação</b>	<b>Origem</b>
Gráfico-1.1	Dependência Energética	DGEG
Gráfico-1.2	Taxa de Dependência Energética	DGEG
Gráfico-1.3	Consumo de Energia Primária	DGEG
Gráfico-1.4	Capacidade Instalada de Energias Renováveis	DGEG
Gráfico-1.5	Produção de Energias Renováveis	DGEG
Gráfico-1.6	Consumo Total de Energia Final por Sector de Actividade	DGEG
Gráfico-1.7	Consumo Energético por Habitante	DGEG
Gráfico-7.1	Ábaco de escolha de PaT	KSB
Gráfico-9.1	Ábaco de Quedas versus Caudais	KSB
Gráfico-9.2	Análise para frequência de rotação ideal ( $Q \leftrightarrow \eta$ )	LIV
Gráfico-9.3	Análise para frequência de rotação ideal ( $Q \leftrightarrow Pe$ )	LIV
Gráfico-9.4	Simulação da ETA do Beliche: Curva $\leftrightarrow$ Altura	LIV
Gráfico-9.5	Simulação da ETA do Beliche: Curva $\leftrightarrow$ Binário	LIV
Gráfico-9.6	Simulação da ETA do Beliche: Curva $\leftrightarrow$ Potência Eléctrica	LIV
Gráfico-9.7	Simulação da ETA do Beliche: Curva $\leftrightarrow$ Rend.Hidráulico	LIV
Gráfico-12.1	Análise Económico-financeira	LIV
Gráfico-12.2	Cotas da Albufeira da Barragem do Beliche	LIV

**DIAGRAMAS**

<b>Nº</b>	<b>Designação</b>	<b>Origem</b>
Diagrama-5.1	Diagrama de Caudais anuais 2007-2020	LIV
Diagrama-5.2a	Diagrama de Caudais ano 2009	LIV
Diagrama-5.2b	Curva de Duração de Caudais 2009	LIV
Diagrama-5.2c	Curva de Duração de Caudais 2009 adimensionalizada	LIV
Diagrama-6.1	Diagrama vectorial da Máquina Assíncrona	LIV
Diagrama-6.2	Diagrama vectorial simplificado	LIV
Diagrama-6.3	Diagrama de Impedâncias e Admitâncias	LIV
Diagrama-6.4	Diagrama de Intensidades	LIV
Diagrama-6.5	Diagrama do Circulo - Correntes	LIV
Diagrama-6.6	Diagrama do Circulo - Potências	LIV
Diagrama-6.7	Diagrama do Circulo – Potência e Binário máximos	LIV
Diagrama-6.8	Diagrama do Circulo – Rendimento e Factor de Potência	LIV
Diagrama-6.9	Diagrama do Circulo – Escorregamento	LIV
Diagrama-6.10	Região de Funcionamento óptimo como motor	LIV
Diagrama-6.11	Diagrama do Circulo – Região de Funcionamento	LIV
Diagrama-6.12	Construção do Diagrama do Circulo	LIV
Diagrama-6.13	Diagrama do Circulo Global	LIV
Diagrama-7.1	Diagrama Hidráulico do Sistema PaT	LIV
Diagrama-8.1	Diagrama de Controlo do Sistema PaT	KSB
Diagrama-9.8	Diagrama do Circulo para funcion. Gerador Assíncrono	LIV
Diagrama-9.9	Diagrama vectorial da máquina assíncrona s/ excitação U2	LIV
Diagrama-9.10	Diagrama vectorial da máquina assíncrona c/ excitação U2	LIV
Diagrama-10.1	Diagrama Hidráulico da CMH	LIV
Diagrama-10.2	Esquema Unifilar do Quadro de Entrada	LIV

## LISTA DE FIGURAS

Nº	Designação	Origem
Fig.-4.1	Elementos constitutivos de uma CMH	(*)
Fig.-4.2	Central Hidroelétrica de albufeira	(*)
Fig.-4.3	Central Hidroelétrica – canal de adução	(*)
Fig.-4.4	Central com queda alta, longe da barragem	(*)
Fig.4.5	Central só com conduta forçada e queda alta perto da barragem	(*)
Fig.-4.6	Central queda baixa com a central afastada da barragem	(*)
Fig.-4.7	Central encastrada na Barragem e Queda baixa	(*)
Fig.-6.1	Corte transversal de uma máquina assíncrona	NASAR,SA.
Fig.-6.2	Máquina Assíncrona (princípio)	LIV
Fig.-6.3	Campos das Bobinas (H1;H2;H3) e Campo Girante (Hg)	LIV
Fig.-6.4	F.m.m do Campo Girante	LIV
Fig.-6.5	Esquema constitutivo equivalente da máquina assíncrona	LIV
Fig.-6.6	Corrente e f.m.m. (correspondência)	LIV
Fig.-6.7	Rotor bobinado (resistências variáveis)	LIV
Fig.-6.8	Tipos de rotores relativamente às cavas	LIV
Fig.-6.9	Esquema Equivalente semelhante ao Transformador	LIV
Fig.-6.10	Esquema Equivalente - resistência variável	LIV
Fig.-6.11	Esquema Equivalente - resistência variável com ligação galvânica	LIV
Fig.-6.12	Esquema Equivalente - separação da carga	LIV
Fig.-6.13	Esquema Equivalente simplificado	LIV
Fig.-6.14	Esquema Equivalente simplificado com valores corrigidos	LIV
Fig.-6.15	Variação do Binário com a velocidade e o escorregamento	LIV
Fig.-6.16	Regimes de Funcionamento em função do escorregamento	LIV
Fig.-6.17	Variação do Binário com a frequência	LIV
Fig.-6.18	Variação do Binário com a velocidade	LIV
Fig.-6.19	Variação da Corrente com o escorregamento	LIV
Fig.-6.20	Regimes de funcionamento em função do escorregamento	LIV
Fig.-6.21	Variação da Potência em função da resistência do rotor	LIV
Fig.-6.22	Esquema equivalente com circuito de magnetização paralelo	LIV
Fig.-6.23	Esquema equivalente de admitâncias	LIV
Fig.-6.24	Esquema Equivalente corrigido	LIV
Fig.-7.1	Fluxo da água na Bomba operando como tal	Viana,1987
Fig.-7.2	Fluxo da água na Bomba operando como Turbina	Viana,1987
Fig.-9.1	Miniturbina (PaT) e Características	KSB
Fig.-9.2	Vista de Cima da Instalação para o ensaio da Micro-Turbina	LIV
Fig.-9.3	Vista de Frente da Instalação para o ensaio da Micro-Turbina	LIV
Fig.-9.4	Foto – Estaleiro de Testes PaT	LIV
Fig.-9.5	Foto – Estaleiro de Testes PaT	LIV

Fig.-9.6	Foto – Estaleiro de Testes PaT	LIV
Fig.-9.7	Foto – Estaleiro de Testes PaT	LIV
Fig.-9.8	Foto – Estaleiro de Testes PaT	LIV
Fig.-9.9	Foto – Estaleiro de Testes PaT	LIV
Fig.-9.10	Esquema Equivalente corrigido $s=0$	LIV
Fig.-9.11	Esquema Equivalente corrigido $s=0$ e $V=C.te$	LIV
Fig.-10.1	Foto – ETA Beliche	LIV
Fig.-10.2	Foto – ETA Beliche	LIV
Fig.-10.3	Foto – ETA Beliche	LIV
Fig.-10.4	Foto – ETA Beliche	LIV
Fig.-10.5	Foto – CMH Comando e Controlo	LIV
Fig.-10.6	Foto – CMH Comando e Controlo	LIV
Fig.-10.7	Foto – CMH Comando e Controlo	LIV
Fig.-10.8	Foto – CMH Comando e Controlo	LIV
Fig.-10.9	Planta da CMH (Instalações Hidráulicas e Electromecânicas)	LIV
Fig.-10.10	Corte da CMH (Instalações Hidráulicas e Electromecânicas)	LIV
Fig.-10.11	Foto – CMH Equipamentos Electromecânicos	LIV
Fig.-10.12	Foto – CMH Equipamentos Electromecânicos	LIV
Fig.-10.13	Foto – CMH Equipamentos Electromecânicos	LIV
Fig.-10.14	Foto – CMH Equipamentos Electromecânicos	LIV
Fig.-12.1	Foto – CMH Display	LIV

(\*) – Figuras existentes na bibliografia geral publicada sobre os temas sem uma origem concreta.

**À BALITA , minha querida esposa.**

## AGRADECIMENTOS

A Águas do Algarve, S.A., na pessoa do Administrador Sr.Engº Artur Ribeiro pela disponibilidade que proporcionou de instalações e meios, e pelo interesse e apoio que sempre manifestou ao longo dos trabalhos;

A Electrolagos, CRL, na pessoa do seu Director de Produção Sr.Paulo Jorge Rodrigues pela colaboração desinteressada e apoio que me prestou durante os trabalhos de implementação da MCH;

Ao Gabinete de Gestão de Energia de Águas do Algarve, S.A., nas pessoas de EngºDavid Barranqueiro e EngºJoão Mendonça, assim como ao Engº Manuel Fernandes, responsável pela manutenção Sotavento-Água (ETAs de Tavira e do Beliche), pela ajuda na aquisição de dados e compilação de documentação.

A todos os técnicos e engenheiros que, de uma maneira ou de outra, possibilitaram a concretização deste trabalho, onde quero destacar o Engº Pedro Moreira, Engº Nuno Rodrigues e Técnico Orçamentista Nuno Marreiros, todos da Electrolagos.

Por último uma palavra muito especial para o meu orientador de mestrado Prof. Dr.José Luis Argáin, que mostrou sempre total disponibilidade no atendimento e cujos esclarecimentos e conselhos técnicos foram de primordial importância para o bom andamento do meu trabalho.

## RESUMO

No presente Trabalho foi efectivado um Estudo sobre a viabilidade técnico-económica sobre o aproveitamento eficiente da energia hídrica excedentária nas condutas adutoras dos sistemas de captação, tratamento e distribuição de águas, através da implementação, imediatamente a montante das Estações de Tratamento de Águas, de miniturbinas hidráulicas incorporadas nas condutas e acopladas a geradores de energia eléctrica assíncronos. Esta energia excedentária integra-se no duplo conceito de energia renovável e de energia alternativa – renovável porque a fonte primária é a água acumulada nas albufeiras das barragens; alternativa porque a produção de energia eléctrica é utilizada em consumo nas Instalações de Tratamento de Águas (ETA) em alternância ou/e em simultâneo com a energia da rede. Este Estudo resultou de uma proposta dirigida a Águas do Algarve, S.A. cuja aceitação culminou na elaboração do Projecto Base da Central Mini-Hídrica (CMH) do Beliche, localizada na ETA do Beliche (Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Águas do Algarve). A construção da CMH foi da responsabilidade da empresa Electrolagos, CRL, e foi concluída nos fins de 2010, encontrando-se actualmente em plena exploração. Os resultados já obtidos permitem concluir que a instalação é eficiente, energética e economicamente, excedendo, nesta primeira fase, as expectativas relativamente à excelente integração no sistema de auto-regulação do caudal de entrada. O Projecto é inovador, não só porque aplica diversos equipamentos *standards* de utilizações convencionalmente diferentes, mas também porque congrega essa diversidade num único modelo. As inovações fundamentais consistem em: -Utilização de bombas hidráulicas tradicionais a funcionar como miniturbinas, sistema PaT (*Pumps as Turbine*) de recente aplicação e em plena investigação; -Utilização de Máquinas Assíncronas a funcionar como geradores de energia eléctrica a 50Hz; -Injecção directa da energia produzida na Instalação e/ou na Rede de Distribuição sem sistema de conversão. A integração directa da MCH na adutora também constitui uma inovação pois, tradicionalmente, estas instalações são isoladas (sistema ‘ilha’) ou em paralelo ou ainda em derivação relativamente a condutas. Esta inovadora integração implicou testes pormenorizados das canalizações de adução e de impulsão, assim como a escolha de equipamentos e acessórios adequados, de modo a não interferir e perturbar significativamente os parâmetros nominais do funcionamento normal da ETA (caudais; velocidades; pressões). O Trabalho aqui apresentado está totalmente em linha com a Estratégia Nacional para a Energia (Resolução 29/2010 do conselho de Ministros) no sentido que contribui para a redução da dependência energética externa através do uso de energias renováveis e para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

**ABSTRACT**

In the present work it was accomplished a Study about the technical and economical viability of the efficient use of the excess of water energy in the intake pipes of the Water Supply Systems, through the implementation, immediately upstream of Water Treatment Stations, of Micro or Mini Hydro-Turbines incorporated on the pipes and coupled to asynchronous electrical power generators. This excess of energy is part of the double concept of renewable energy and alternative energy – renewable because the primary source is the water accumulated in dams; alternative because the electricity production is used on energy consumption in Water Treatment Facilities (ETA) in alternative or/and simultaneously with the network energy. This Study resulted from a proposal addressed to Águas do Algarve, SA whose acceptance culminated in the preparation of the Base Project of the Central Mini-Hydro (CMH) Beliche, located in ETA of the Beliche (Multi-Municipal System Supply of Águas do Algarve). The enterprise Electrolagos, CRL was responsible by the construction of CMH, and it was completed in late 2010, nowadays is in full operation. The results obtained allow us to accomplish that the installation is efficient, energetic and economic, in this first phase exceeding the expectations regarding the excellent integration into the self-regulation system of the input flow. The Project is innovative, not only because it applies several standard equipments of different conventional utilizations, but also because it brings diversity in a single model. The key innovations includes: - Using traditional hydraulic pumps to operate as mini-turbines, PaT system (*Pumb as Turtine*) of recent application and in full research; - Use of asynchronous machines operating as electric generators of 50Hz; - The direct injection of energy produced in the Installation and/or in the Distribution Network without the convert system. The direct integration of MCH in the pipeline is also an innovation because these installations are traditionally isolated ('island' system) or in parallel or even in derivation related to pipelines. This innovative integration implied detailed tests of the adduction and impulsion plumbing, as well as choosing the appropriate equipments and accessories, so that it cannot interfere and disturb significantly the nominal parameters of the normal working process of the ETA (flows, speeds, pressures). The Work presented here is fully in line with the National Strategy for Energy (Resolution 29/2010 of the council of the Ministers) in the way that it contributes to the reduction of external energy dependence through the use of renewable energies and to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions.

## 1 ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

### 1.1 ENQUADRAMENTO POLÍTICO

O Programa do XVIII Governo Constitucional, para a legislatura de 2009 a 2013, é um programa ambicioso para o futuro do País.

Aí se afirma que o momento não é para parar, nem para desistir, e para tal é preciso que o País mobilize todas as suas energias para continuar a enfrentar, com responsabilidade, determinação e o futuro e incentiva ainda a apostar em ganhar competitividade, de modo a responder aos exigentes desafios da economia global, a reduzir o défice externo e a convergir com o crescimento económico e o nível de vida dos países mais desenvolvidos.

A valorização das exportações e o desenvolvimento da **aposta nas energias renováveis** e na eficiência energética, são essenciais para enfrentar as causas, também elas estruturais, do nosso défice externo e do endividamento.

Entre outras medidas é fundamental a construção e modernização de infra-estruturas, em áreas decisivas como a energia, com o objectivo de **liderar na revolução energética**.

O desafio do aquecimento global e das alterações climáticas é também uma extraordinária oportunidade para Portugal adoptar medidas destinadas a aumentar a autonomia energética e a segurança no abastecimento; diminuir fortemente o défice externo e o endividamento do País (em 2008 o consumo de combustíveis fósseis foi responsável por 52% do nosso défice da balança de bens e serviços); para desenvolver novas indústrias e criar milhares de novos empregos, e para promover um desenvolvimento verdadeiramente sustentável e com qualidade de vida.

Concretizar estes objectivos passa por alavancar os progressos já alcançados e prosseguir uma estratégia para a energia centrada no **aumento da produção eléctrica por energias renováveis**; na melhoria global da eficiência energética; na afirmação do País na fronteira tecnológica e na expansão da fileira industrial associada à energia.

Dentro dos propósitos de **liderar na revolução energética** um dos objectivos é assegurar a posição de Portugal entre os 5 líderes europeus ao nível dos objectivos em matéria de energias renováveis em 2020.

Pretende-se ainda a **duplicação da capacidade de produção de energia eléctrica** no horizonte de 2020, eliminando importações (actualmente cerca de 20% do consumo), desactivando

as centrais mais poluentes e acomodando o aumento de procura. Consequentemente deve-se assegurar a **afirmação de Portugal na liderança global na fileira industrial das energias renováveis**, de forte capacidade exportadora.

Nestas perspectivas, e no domínio das **Energia Hídrica**, propõe-se:

- a implementação do **Plano Nacional de Barragens**;
- a identificação de possíveis **aumentos de potência** em empreendimentos já existentes;
- **um novo plano nacional para o desenvolvimento de mini-hídricas, com o objectivo de aumentar em 50% a capacidade actual (hoje cerca de 500 MW)**;
- a **maximização da conectividade** entre a energia hídrica em barragens reversíveis e a exploração articulada com a energia eólica;

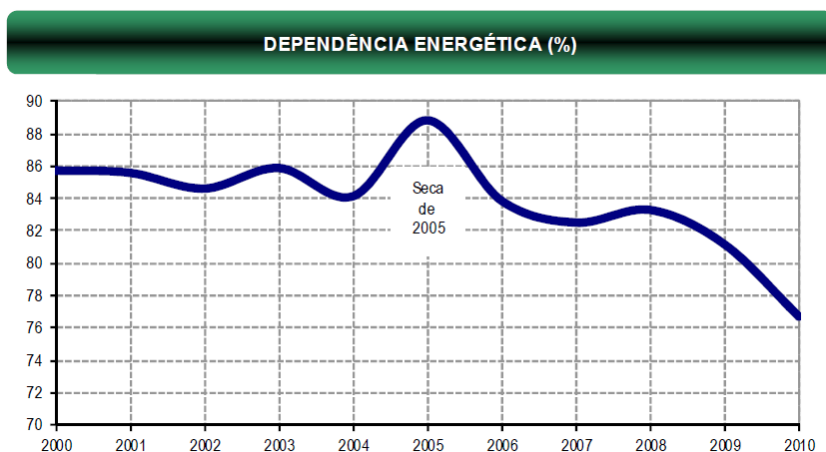
## 1.2 ENQUADRAMENTO ENERGÉTICO

### 1.2.1 CONSIDERAÇÕES

A evolução das civilizações está directamente relacionada com as necessidades energéticas, de aplicação directa (solar, fogo, vento, hídrica, etc) ou indirecta (por transformação).

Relativamente às fontes de energia tradicionais (não renováveis) Portugal é um país com escassos recursos energéticos próprios, nomeadamente, aqueles que asseguram a generalidade das necessidades energéticas da maioria dos países desenvolvidos (como o petróleo, o carvão e o gás).

A escassez de recursos fósseis conduz a uma elevada dependência energética do exterior (76,7% em 2010), nomeadamente das importações de fontes primárias de origem fóssil. Importa assim aumentar a contribuição das energias renováveis: hídrica, eólica, solar, geotérmica, biomassa (sólida, líquida e gasosa).



*Gráfico-1.1 (Fonte DGEG)*

A grande Produção Industrial de Energia Eléctrica, desde a sua generalização iniciada na Revolução Industrial em Inglaterra (Séc.XVIII), no âmbito energético, teve por base a transformação de fontes primárias de origem fóssil, a que, por isso, designamos por ‘fontes de energia tradicionais’ (carvão; petróleo; gás).

Apesar de a força motriz, inicialmente quase exclusivamente de transformação térmica (máquina vapor) ter sido substituída, ao longo do Séc.XX, em grande parte por energia eléctrica, isto não veio alterar o panorama mundial da dependência das fontes tradicionais de energia, pois que, a ‘nova’ fonte intermediária (energia eléctrica) é por sua vez consumidora das mesmas.

A utilização generalizada de energia eléctrica democratizou a necessidade de fontes de energia primária tradicionais, até então mais necessitadas nos países industrializados.

Actualmente está generalizado, em todo o planeta, o grande consumo de energias primárias tradicionais, implicando uma enorme distorção na satisfação das necessidades de cada país, função da existência ou não de reservas próprias ou de poder económico abastado para as adquirir.

O aumento do número de países industrializados e o simultâneo disparo exponencial de tecnologias consumidoras de energia (eléctrica ou outras) veio trazer uma enorme apreensão mundial sobre a estratégia tradicional vigente, no que diz respeito ao abastecimento e satisfação das necessidades internacionais.

Tudo se precipitou em fins de 1966 num contexto de deficit de oferta, com o início do processo de nacionalizações e de uma série de conflitos envolvendo os produtores árabes da OPEP, como a guerra dos Seis Dias (1967), a guerra do Yom Kipur (1973), a revolução islâmica no Irão (1979) e a guerra Irão-Iraque (a partir de 1980). Os preços do barril de petróleo atingiram valores altíssimos, chegando a aumentar até 400% em cinco meses (17/10/1973 – 18/3/1974), o que provocou grande recessão nos Estados Unidos e na Europa e desestabilizou a economia ao redor do mundo.

Apesar de os países mais industrializados terem optado pela Produção de Base através de Centrais Termoeléctricas Nucleares a partir da segunda metade do séc.XX (o primeiro projecto foi iniciado na Rússia em Janeiro de 1951 e teve sua construção concluída em Junho de 1954), as dúvidas e receios relativamente às consequências de possíveis acidentes e à não existência de soluções inócuas para os resíduos, não tem permitido um avanço estável e sustentado sobre esta fonte de energia primária, ainda que tudo indique que uma fonte base no futuro mais próximo.

Pelo exposto anteriormente, o recurso a fontes de energias alternativas constitui hoje uma problemática em franca expansão e definitivamente adoptadas mundialmente como parceiras no

contexto da Produção de Energia Eléctrica (hídrica, eólica, solar, geotérmica, biogás e lenhas e resíduos).

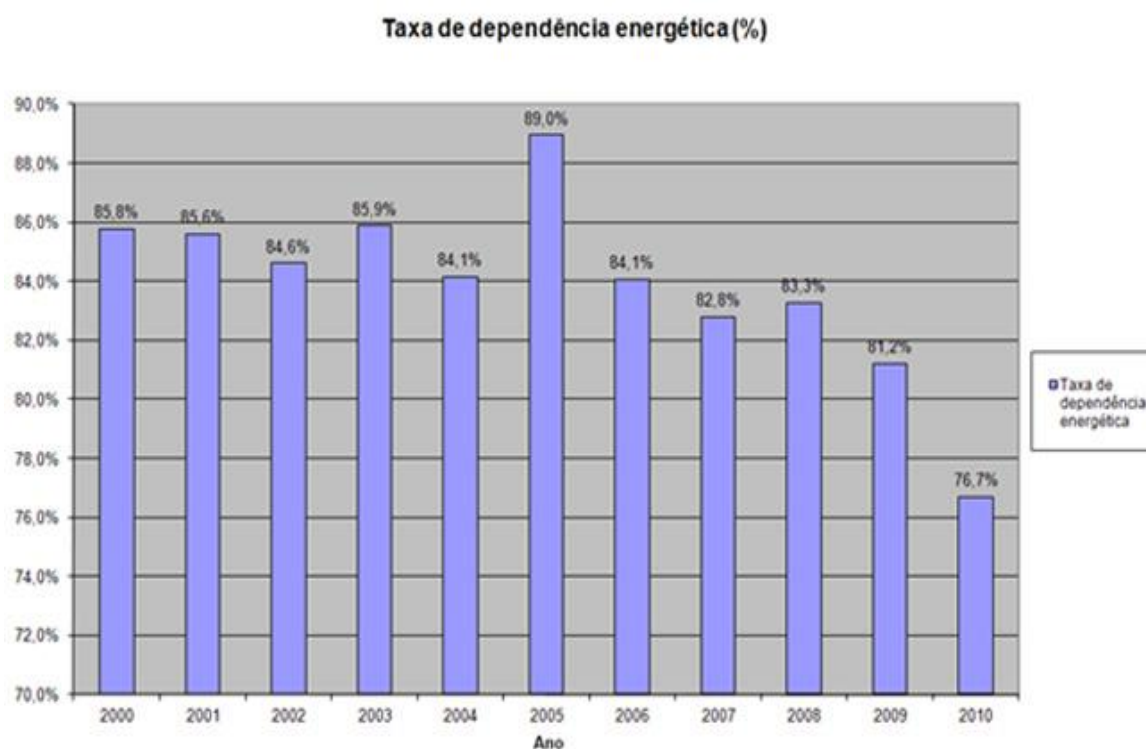
### 1.2.2 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA NACIONAL

Como foi afirmado anteriormente a escassez de recursos energéticos tradicionais conduz a uma elevada dependência energética do exterior.

Portugal é um país com escassos recursos energéticos endógenos, nomeadamente, aqueles que asseguram a generalidade das necessidades energéticas da maioria dos países desenvolvidos (como o petróleo, o carvão e o gás).

A escassez de recursos fósseis conduz a uma elevada dependência energética do exterior (81,2% em 2009), nomeadamente das importações de fontes primárias de origem fóssil. Importa assim aumentar a contribuição das energias renováveis: hídrica, eólica, solar, geotérmica, biomassa (sólida, líquida e gasosa).

A taxa de dependência energética tem vindo a decrescer desde 2005, apesar de ter sofrido um ligeiro agravamento no ano de 2008 relativamente a 2007

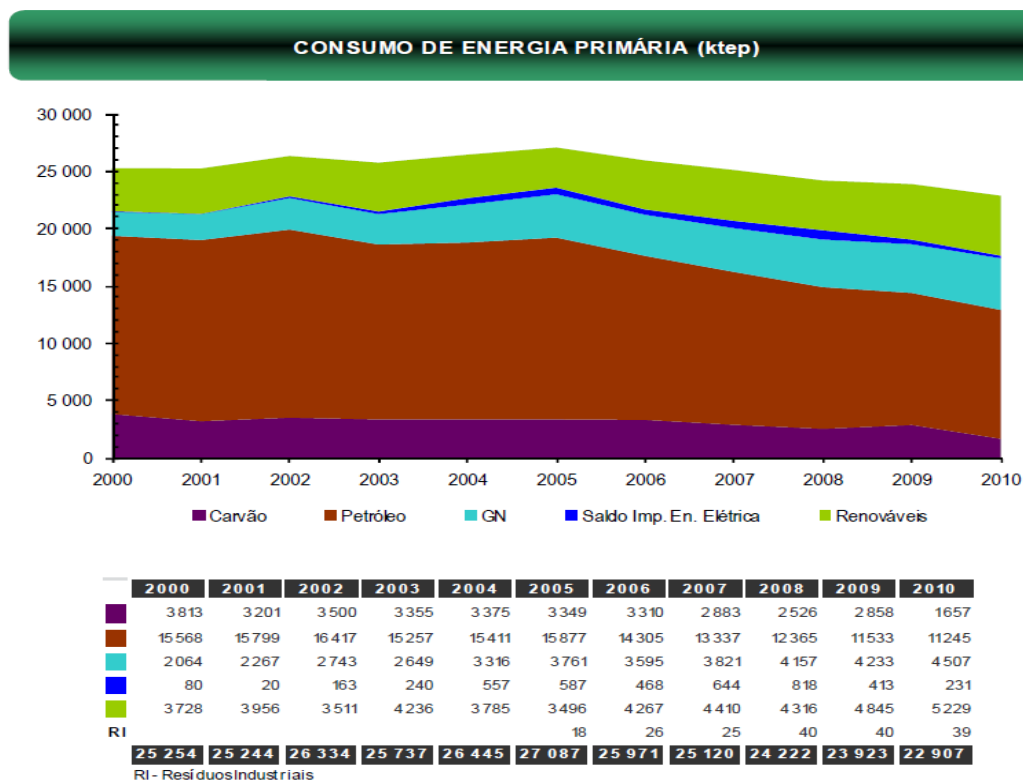


*Gráfico-1.2 (Fonte DGEG)*

Importa assim aumentar a contribuição das energias renováveis: hídrica, eólica, solar, geotérmica, biogás.

- **Energia Primária**

O Diagrama seguinte mostra a evolução do consumo de Energia Primária em Portugal, no período 2000-2010. e lenhas e resíduos.



*Gráfico-1.3 (Fonte DGEG)*

O **petróleo** mantém um papel essencial na estrutura de abastecimento, representando 49,1% do consumo total de energia primária em 2010, contra 48,7% em 2009.

O **gás natural** contribuiu, no último decénio, para diversificar a estrutura da oferta de energia e reduzir a dependência exterior em relação ao petróleo. Manifestou uma evolução positiva no mix energético, representando este combustível, em 2010, 19,7% do total do consumo em energia primária contra 17,5% em 2009.

O consumo de **carvão**, representou, em 2010, 7,2% do total do consumo de energia primária. Prevê-se uma redução progressiva do peso do carvão na produção de electricidade, devido ao seu impacto nas emissões de CO<sub>2</sub>.

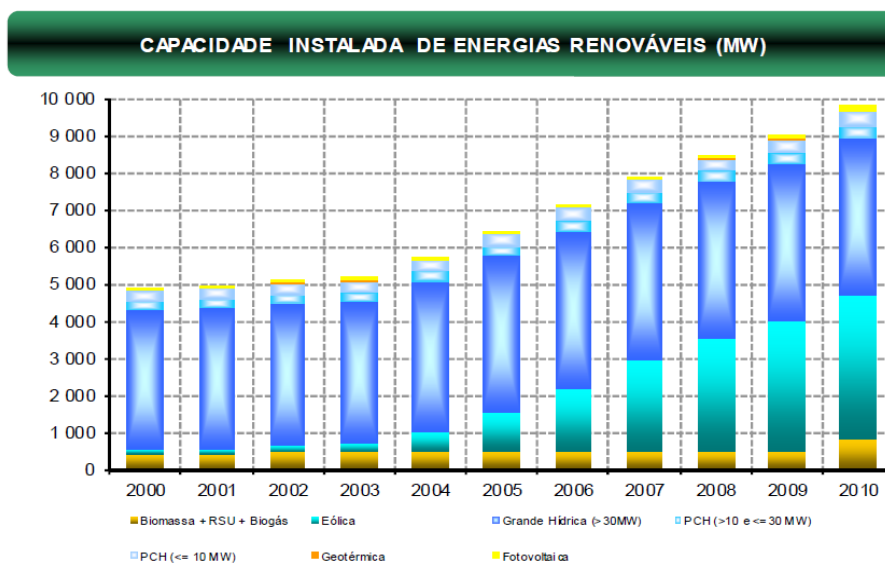
Em 2010 o contributo das **energias renováveis** no consumo total de energia primária foi de 23,1% contra 20% em 2009.

É manifesto o crescimento da potência instalada em FER nos últimos anos para produção de electricidade. Atingiu-se em 2010, 9777,98 MW de potência instalada sendo:

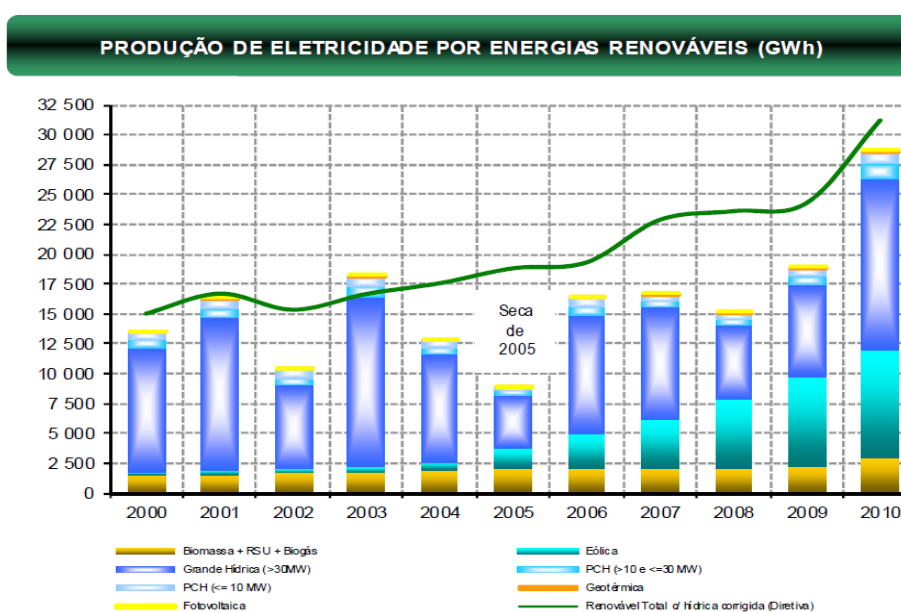
## CENTRAL MICRO-HÍDRICA INCORPORADA EM CONDUTA ADUTORA

- 4917,25 MW em hídrica,
- 784,5 MW em biomassa,
- 3911,98 MW em eólica,
- 30 MW em geotérmica,
- 134,25 MW em fotovoltaica.

Em 2010 foram produzidos 29566 GWh de energia eléctrica a partir de FER.



*Grafico-1.4 (Fonte DGEG)*

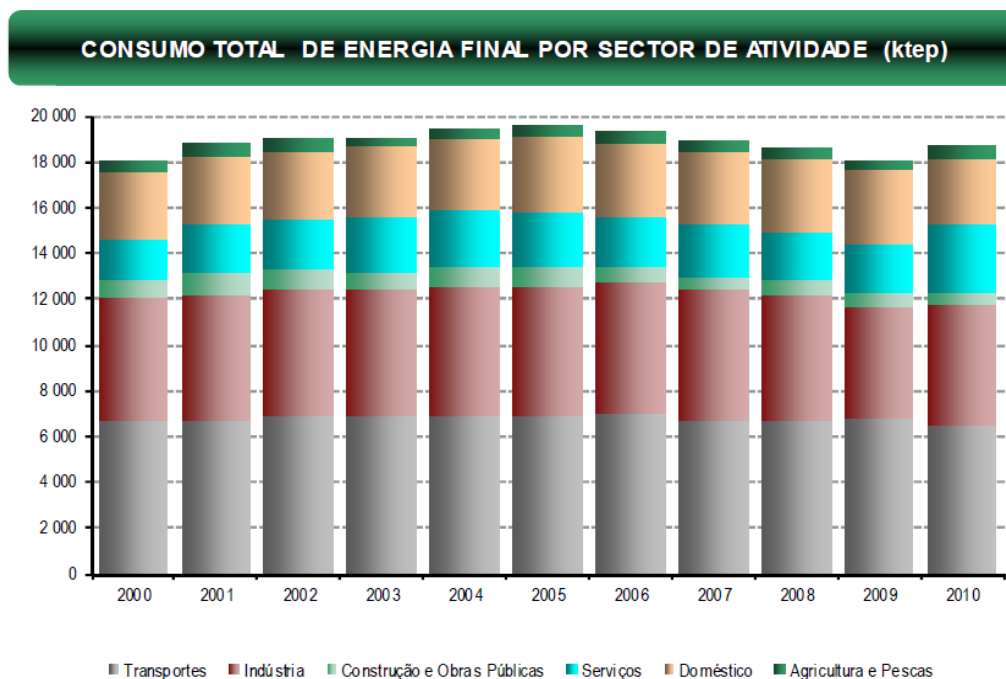


*Grafico-1.5 (Fonte DGEG)*

Em 2010 foram produzidos 28500 GWh de energia eléctrica a partir de FER, contra 19316 GWh em 2009.

o **Energia Final**

A **Energia Final**, em 2010, atingiu o valor de 17276 ktep, tendo-se verificado uma redução de 1,3% face a 2009. Registou-se uma diminuição do consumo de 2,7% de petróleo, um aumento de 4,1% em electricidade e de 5,3% de gás natural.



*Grafico-1.6 (Fonte DGEG)*

Em 2010, o peso do consumo dos principais sectores de actividade económica relativamente ao consumo final de energia, foi de 30,1% na Indústria, 37,4% nos Transportes, 17,0% no Doméstico, 11,7% nos Serviços e 3,8% nos outros sectores (onde se inclui a Agricultura, Pescas, Construção e Obras Públicas). Constata-se assim uma forte incidência dos sectores de Indústria e Transportes no consumo de energia final.

No sector **doméstico**, assiste-se a um aumento do consumo de energia eléctrica por unidade de alojamento (2671 kWh/alojamento em 2010 contra 2630 kWh/alojamento em 2009). Em relação às formas de energia utilizadas, verifica-se uma diminuição nos consumos dos produtos de petróleo e um aumento do gás natural.

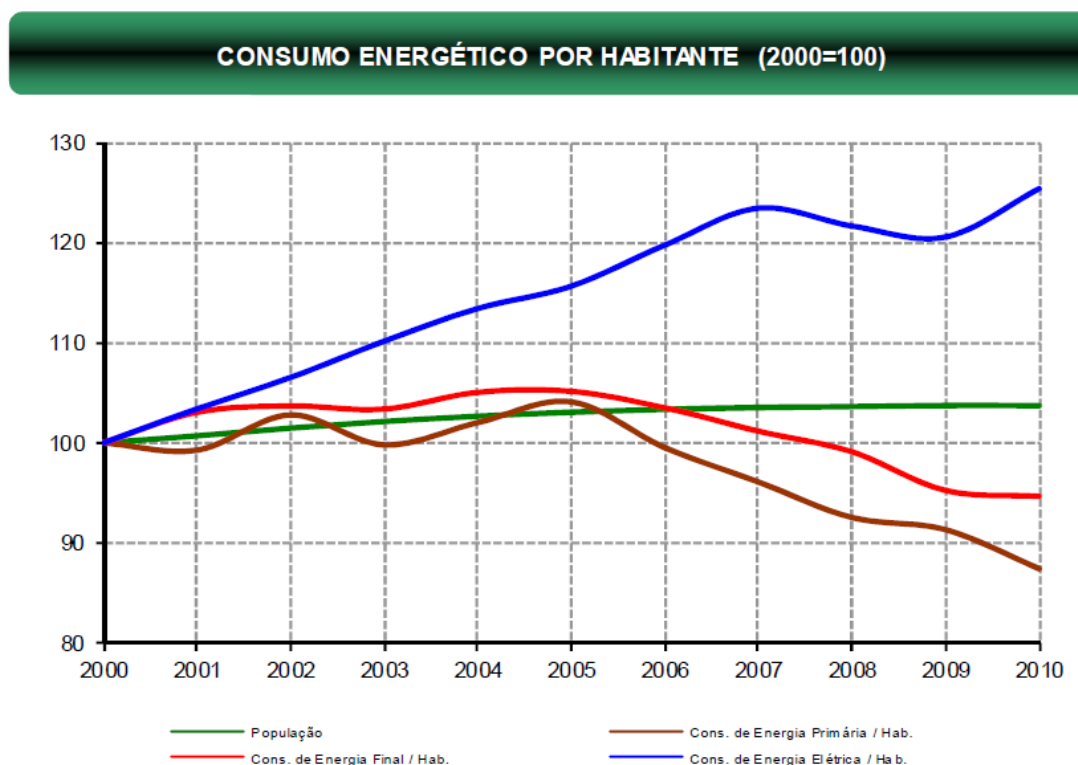
Portugal ainda é um dos países da UE com menor consumo de electricidade per capita - em 2009 foi de 4815 kWh, correspondendo ao 20º lugar dos países europeus. Só Malta, Bulgária, Hungria, Polónia, Lituânia, Letónia e Roménia registaram consumos per capita mais baixos.

Portugal apresentou em 2010 um consumo de energia final *per capita* de 1,62 tep/habitante.

Portugal apresentou em 2010 uma intensidade em energia final de 107 tep /106 Euros 2006.

As emissões de CO<sub>2</sub> *per capita*, resultantes de processos de combustão em Portugal foram de 5,00 t CO<sub>2</sub>, em 2009.

A intensidade carbónica em Portugal foi em 2009 de 0,43 kg CO<sub>2</sub> / 2000USD. Portugal apresentou em 2009 uma intensidade em energia final de 136 tep /106 Euros 2000.



*Grafico-1.7 (Fonte DGEG)*

### 1.3 ESTRATÉGIA NACIONAL PARA A ENERGIA – ENE 2020

Como já observámos anteriormente, o actual cenário energético nacional é caracterizado por um sistema energético fortemente dependente de fontes primárias de origem fóssil (petróleo, gás natural e carvão), e portanto por uma forte dependência externa, e com uma procura energética com taxas de crescimento superiores às do crescimento do PIB.

Com este cenário a Estratégia Nacional tem por objectivos:

- Redução da dependência energética externa;
- Aumento da eficiência energética;
- Redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

Para atingir estes objectivos o Governo definiu as grandes linhas estratégicas para o sector da energia, e para tal a Resolução do Conselho de Ministros 29/2010, de 15 de Abril, aprova a nova **Estratégia Nacional para a Energia** (ENE 2020) tendo em consideração os objectivos para a política energética definidos no Programa do XVIII Governo e dando continuidade às políticas já desenvolvidas.

A ENE 2020 altera e actualiza a anterior estratégia, aprovada pela Resolução do Conselho de Ministros 169/2005, de 24 de Outubro, definindo uma agenda para a competitividade, o crescimento e uma diminuição de dependência energética do País, através da aposta nas energias renováveis e na promoção da eficiência energética, assegurando a segurança do abastecimento energético e a sustentabilidade económica e ambiental do modelo energético nacional, contribuindo para a redução de emissões de CO<sub>2</sub>.

### **1.3.1 LINHAS DE ORIENTAÇÃO**

A ENE define as linhas de orientação política e medidas de maior relevância para a área da energia, assentando em **cinco eixos**:

#### **1) Agenda para a Competitividade, crescimento e independência energética e financeira**

Visa a dinamização dos diferentes sectores da economia, para a criação de valor e emprego através da aposta em projectos inovadores nas áreas da eficiência energética, das energias renováveis:

- a.** Produção descentralizada e da mobilidade eléctrica, num quadro de equilíbrio territorial;
- b.** Promoção da concorrência nos mercados e da regulamentação do sistema petrolífero nacional.

#### **2) Aposta nas energias renováveis**

Aposta na promoção do desenvolvimento de uma fileira industrial, que incite o crescimento económico e de emprego, e que permita atingir as metas nacionais de produção de energia renovável, intensificando a diversificação das energias renováveis no mix energético, reduzindo simultaneamente a dependência externa nacional, aumentando a segurança de abastecimento.

#### **3) Promoção da eficiência energética**

Visa a promoção da eficiência energética, consolidando o objectivo de redução de 20% do consumo de energia final em 2020, através do estabelecimento de medidas, assim como na aposta

em projectos inovadores, designadamente (i) o veículo eléctrico e as redes inteligentes, (ii) a produção descentralizada de base renovável e (iii) a optimização dos modelos de iluminação pública e de gestão energética dos edifícios públicos, residenciais e de serviços.

#### **4) Garantia de segurança de abastecimento energético**

Tem por objectivo garantir a segurança de abastecimento através da manutenção da política de diversificação do *mix* energético, do ponto de vista das fontes e das origens do abastecimento, e do reforço das infra-estruturas de transporte e de armazenamento que permitam a consolidação do mercado ibérico em consonância com as orientações da política energética europeia.

#### **5) Promoção da sustentabilidade da estratégia**

Visa a promoção da sustentabilidade económica, ambiental e técnica como condição fundamental para o sucesso da política energética, recorrendo a instrumentos da política fiscal, para a criação de um fundo de equilíbrio tarifário que permita continuar o processo de crescimento das energias renováveis.

### **1.3.2 MEDIDAS PROPOSTAS E RESULTADOS ESPERADOS ATÉ 2020 PARA AS RENOVÁVEIS NO ÂMBITO DAS ENERGIA HÍDRICA**

Quanto às medidas propostas:

- 8.600 MW de capacidade instalada em 2020;
- Implementação de um plano de acção para as mini-hídricas para o licenciamento de 250 MW;
- Desenvolvimento de capacidade reversível.
- É esperado que com a ENE 2020 sejam atingidos os seguintes resultados:
- Redução da dependência energética externa para 74% em 2020;
- Cumprimento dos compromissos assumidos para 2020, relativos ao combate às alterações climáticas:
- 31% da energia final proveniente de recursos renováveis;
- 20% de redução do consumo de energia final;
- Redução em 25% do saldo importador energético, com a energia produzida a partir de fontes endógenas (redução das importações  $\approx$  2.000 milhões €/ano em 2020);
- Consolidação do *cluster* industrial associado às energias renováveis;
- Continuar a desenvolver o *cluster* industrial associado à eficiência energética;

- Continuação da promoção do desenvolvimento sustentável, criando condições para o cumprimento das metas de redução de emissões de GEE assumidas no quadro europeu.

#### **1.4 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - ENERGIA E AMBIENTE**

A ENERGIA é de importância vital nas economias de hoje.

A definição das políticas energéticas e ambiental exige cada vez mais um processo de concertação entre estas duas vertentes, atendendo a que as actividades do sector energético têm contudo um forte impacto no ambiente, com especial ênfase nas alterações climáticas. Dever-se-á encontrar um ponto de equilíbrio entre a viabilidade técnico-económica e as condicionantes ambientais, como numa estratégia integrada das políticas energéticas e ambiental, tendo em consideração a relação custo-eficácia e o desenvolvimento social e económico na promoção de um desenvolvimento sustentável, não perdendo de vista a segurança do abastecimento e sua competitividade.

**Estratégia Nacional para a Energia (ENE)**, aprovada pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010, de 15 de Abril, tem um papel fundamental a **nível nacional** e, com base nesse documento, têm vindo a ser desenvolvidas acções para melhorar a integração das preocupações ambientais na política energética.

A **nível comunitário** a preocupação de integração das políticas energética e ambiental está revertida na nova “**Política Energética para a Europa**”, lançada em Janeiro de 2007 pela Comissão e que se encontra em discussão. Esta proposta de estratégia comunitária vem promover uma nova política energética na Europa, assente em 4 pilares:

- Um mercado de energia funcional,
- A passagem para uma economia de baixo carbono,
- Aumentar a eficiência energética,
- Criar uma nova abordagem nas relações com terceiros países.

Pretende-se assim transformar a Europa numa economia energética altamente eficiente e com baixa produção de CO<sub>2</sub>, satisfazendo em simultâneo os requisitos energéticos e ambientais. Neste sentido, foi aprovado em 2009 o **Pacote Energia/Clima**, que se afigura um instrumento fundamental para colocar a Europa na linha da frente do desenvolvimento sustentável.

O Pacote Energia/Clima, estipulou entre outras, as seguintes metas:

- Uma redução de Gases com Efeito de Estufa (GEE) de 20% até 2020;

- Uma meta de 20% de incorporação de energias renováveis no consumo bruto de electricidade, em 2020, existindo ainda uma meta mínima vinculativa de 10% de incorporação de energias renováveis nos transportes;
- Uma redução de 20% do consumo de energia primária em 2020.

No âmbito da problemática das **alterações climáticas** e outras preocupações ambientais, nomeadamente da qualidade do ar, em que a **Energia** tem um papel relevante, tem levado à procura de soluções alternativas que têm contribuído para:

- Melhorar a articulação e focalização da **Inovação e Desenvolvimento (I&D)** na política energética, tendo em vista o desenvolvimento de novas tecnologias mais limpas e eficientes,
- Promover a **melhoria da eficiência energética**, como instrumento de maior potencial para contribuir para a redução das emissões dos gases com efeito de estufa e redução da dependência do petróleo,
- Aproveitar o potencial de utilização de **fontes de energia renovável** e a introdução de **tecnologias de baixo carbono**, o que irá permitir uma **diversificação das fontes energéticas** e uma **redução significativa das emissões de CO<sub>2</sub>** e contribuir para uma energia sustentável, não pondo em causa a competitividade das empresas e o crescimento económico dos países

Com vista à **segurança do abastecimento**, é fundamental promover a **diversificação do mix energético**, pelo que não se poderão eliminar os combustíveis mais poluentes como o carvão, devendo-se procurar investir nestes casos em **tecnologias menos poluentes** (captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>) e na redução do consumo - eficiência energética.

Considera-se ainda importante a aposta cada vez maior na **sensibilização do público**, numa maior informação e participação dos cidadãos na tomada de posições, conseguindo-se assim uma melhoria da **consciencialização pública e mudanças comportamentais** da sociedade.

## **1.5 ESTRATÉGIAS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

### **1.5.1 ESTRATÉGIAS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

As **Estratégias de Desenvolvimento Sustentável (EDS)** constituem referenciais das diversas políticas, não só devido à sua visão de longo prazo, mas também porque corporizam visões globais de desenvolvimento, em todas as suas vertentes. A nível da União Europeia, as EDS possuem 4 áreas prioritárias:

- Combate às alterações climáticas;
- Gestão de recursos naturais;
- Limitação de riscos para a saúde pública;
- Transportes sustentáveis.

Esta estratégia é avaliada anualmente, nos Conselhos Europeus de Primavera, com base num relatório síntese produzido pela Comissão.

### **1.5.2 PORTUGAL E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

A nível nacional, a **Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável** (ENDS), para o período 2005-2015, formula uma estratégia de referência que visa, num horizonte de 12 anos, assegurar um crescimento económico associado a uma maior coesão social, e a um elevado e crescente nível de protecção do ambiente.

A ENDS é acompanhada do respectivo **Plano de Implementação da Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável** (PIENDS), que, como o próprio nome indica, funciona como um instrumento para implementação dos objectivos e metas da ENDS, e apresenta as principais medidas públicas a concretizar. Esta medidas dividem-se em:

- Medidas de investimentos e medidas de referência, que exigem investimentos, sistemas de incentivos e programas,
- Medidas de enquadramento e intervenções complementares, apresentam um carácter legislativo, normativo e institucional, criando o enquadramento adequado.

Aquando da definição da Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável, bem como do respectivo Plano de Implementação, foram tidas em conta algumas exigências:

- A integração nas políticas de governo;
- A articulação com a estratégia de desenvolvimento sustentável, a nível comunitário;
- A coerência entre as diversas políticas públicas.

A integração de Portugal no processo de desenvolvimento sustentável pode ser revista nas seguintes iniciativas políticas:

- A Constituição da República Portuguesa de 1976 (n.º 1 do artigo 66º, na versão originária) refere o "direito a um ambiente de vida humano sadio e ecologicamente equilibrado";
- A Lei de Bases do Ambiente, de Abril de 1987 (artigo 3º), visa um "desenvolvimento integrado, harmonioso e sustentável";

- A Resolução do Conselho de Ministros sobre o Plano Nacional de Política de Ambiente (PNPA), de Abril de 1995, faz menção ao desenvolvimento sustentável como objectivo; foi discutido em 1995, mas não foi implementado;
- A consagração do conceito foi realizada na revisão constitucional de 1997 – Artigos 66º e 81º da Constituição da República Portuguesa;
- Em Agosto de 1997, foi criado o Conselho Nacional para o Ambiente e o Desenvolvimento Sustentável;
- Definiu-se o enquadramento da Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável, através da Resolução do Conselho de Ministros nº 39/2002, de 1 de Março;
- A Resolução do Conselho, de 28 de Maio de 2002, aprovou as Grandes Linhas de Orientação da ENDS e submeteu-as a discussão pública;
- A Resolução de Conselho de Ministros n.º 109/2007, de 20 de Agosto, aprova a Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável e o Plano de Implementação da Estratégia Nacional.

## **1.6 «ENERGIAS RENOVÁVEIS» COMO RECURSO ENERGÉTICO**

O recurso a Energias Renováveis é uma opção que deve obedecer a critérios técnico-económicos bem equacionados.

Muitas vezes (demasiado frequentes) a aplicação destas novas tecnologias resulta mais de aspectos subjectivos do que de estudos adequados e fundamentados, apenas satisfazendo aparências modernistas ou sintonizadas com as tecnologias de ponta. Nestes casos o investimento poderá não ser rentável e ser mesmo desastroso.

Contudo, as Energias Renováveis, nas suas diversas modalidades, têm aplicações específicas de grande utilidade e em alguns casos sobrepõem-se às energias convencionais.

A opção pela implementação de um **Sistema de Utilização de Energias Alternativas**, com base em **Energias Renováveis**, deverá ser fundamentada em duas vertentes:

- Económica
- Técnica (tecnologia)
  - a. Vertente Económica

A vertente económica deverá ser suportada por **Estudo de Viabilidade Económica** que demonstre resultados de amortização (reembolso) e de lucros (ganhos acumulados) e respectivos períodos de cálculo.

Os resultados deverão ser analisados e enquadrados no tempo (período de interesse) e é na função trinomial '*período de interesse – investimento – ganhos*' que se encontrará a opção.

**b. Vertente Técnica**

Esta vertente contemplará:

- Escolha da Fonte
  - I. Hídrica;
  - II. Fotovoltaica;
  - III. Fototérmica;
  - IV. Eólica;
  - V. Biomassa;
  - VI. Geotérmica;
  - VII. Maremotriz;
  - VIII. Olamotriz.
  
- Possibilidade de Implementação
  - I. Capacidade da Fonte;
  - II. Disponibilidade de Espaço;
  - III. Integração Ambiental
  
- Finalidade
  - IV. Produção para Utilização;
  - V. Produção para Venda (injecção na Rede Pública).

## 2 LEGISLAÇÃO

Atendendo à crise energética mundial, em evolução crescente desde os anos-70, os países com fracos recursos de energias convencionais (petróleo, carvão e gás), e não só, acordaram para a necessidade de procurar alternativas energéticas que reduzissem a sua dependência dos países produtores. A investigação acelerou e as tecnologias evoluíram de modo a que já hoje existam aplicações técnico-economicamente viáveis.

Paralelamente à investigação e comercialização das novas tecnologias os governos e a Comunidade Europeia têm produzido bastante Legislação no âmbito da Investigação, Aplicação e Financiamento das Novas Tecnologias Produtoras e Utilizadoras de Energias Renováveis, com objectivos não só económicos mas também ecológicos.

Destacamos:

### LEGISLAÇÃO PORTUGUESA APLICÁVEL AS ENERGIAS RENOVÁVEIS

Documento Legal	Sumário
<i>Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010 de 15-04-2010 Governo - Presidência do Conselho de Ministros</i>	<i>Aprova a Estratégia Nacional para a Energia 2020 (ENE 2020), revogando a Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005, de 24 de Outubro.</i>
<i>Resolução do Conselho de Ministros n.º 50/2007 de 28-04-2007</i>	<i>Aprova medidas de implementação e promoção da Estratégia Nacional para a Energia</i>
<i>Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005 de 24-10-2005 de 24-10-2005</i>	<i>Aprova a estratégia nacional para a energia</i>
<i>Resolução do Conselho de Ministros n.º 63/2003 13-03-2003 Publicado no Diário da República (DR) n.º 98, I Série-B de 28-04-2003</i>	<i>Documento que aprova as novas orientações da política energética portuguesa, no qual se define os objectivos e as medidas inerentes à concretização dessa política energética. Assim como revoga a Resolução do Conselho de Ministros n.º 154/2001, de 19 de Outubro, que aprovou o <b>Programa E4</b>, Eficiência Energética e Energias Endógenas.</i>
<i>Despacho n.º 9148/2002 15-04-2002 Publicado no Diário da República (DR) n.º 103, II Série de 04-05-2002</i>	<i>Sistema Eléctrico de Serviço Público: Electroprodutores: Sistema Eléctrico Independente: Recepção de Energia Eléctrica: Pontos de Recepção: SEP Clarifica a interpretação dos procedimentos previstos no Decreto-Lei n.º 312/2001, de 10 de Dezembro, relativos à instrução dos pedidos de atribuição do ponto de</i>

*recepção de energia eléctrica*

**Portaria n.º 383/2002 10-04-2002**  
*que alterou a Portaria n.º 198/2001, de 13 de Março, na redacção que lhe foi dada pela Portaria n.º 1219/2001, de 23 de Outubro)*

*Regulamento de Execução da Medida de Apoio ao Aproveitamento do Potencial Energético e Racionalização de Consumos (MAPE): -A MAPE tem por objectivo propiciar apoios dirigidos à produção de energia eléctrica e térmica por recurso a energias novas e renováveis, à utilização racional de energia e à conversão dos consumos para gás natural.*

**Decreto-Lei n.º 339-C/2001 29-12-2001**  
*Publicado no Diário da República (DR) n.º 300, I-A Série - Suplemento*

*Produção de Energia Eléctrica: Regime Especial – Renováveis: -Altera o Decreto-Lei n.º 168/99, de 18 de Maio, que revê o regime aplicável à actividade de produção de energia eléctrica, no âmbito do sistema eléctrico independente.*

**Decreto-Lei n.º 312/2001 10-12-2001**  
*Publicado no Diário da República (DR) n.º 284, I-A Série*

*Sistema Eléctrico de Serviço Público: Electroprodutores: Sistema Eléctrico Independente: Recepção de Energia Eléctrica: -Define o regime de gestão da capacidade de recepção de energia eléctrica nas redes do Sistema Eléctrico de Serviço Público proveniente de centros electroprodutores do Sistema Eléctrico Independente.*

**Resolução do Conselho de Ministros n.º 154/2001 19-10-2001**  
*Publicado no Diário da República (DR) n.º 243, I-B Série*

*Programas: E4  
Aprova o Programa E4, Eficiência Energética e Energia Endógenas.*

**Portaria n.º 416/90 06-06-1990**  
*Publicado no Diário da República (DR) n.º 130, I-A Série de 06-06-90*

*Produção de Energia Eléctrica: Regime Especial – Renováveis: -Aprova o Contrato-tipo compra de energia eléctrica pela EDP a produtores independentes ao abrigo do Decreto-Lei n.º 189/88 de 27 de Julho.*

**Decreto-Lei n.º 189/88 27-05-1988**  
*Publicado no Diário da República (DR) n.º 123, I-A Série de 27-05-88*

*Produção de Energia Eléctrica: Regime Especial – Renováveis: -Estabelece o regime de produção de energia eléctrica por produtores independentes, no âmbito das energias renováveis*

### **3 ENQUADRAMENTO TECNOLÓGICO**

#### **3.1 ALTERNATIVAS E INOVAÇÃO**

Atendendo à crise energética mundial, em evolução crescente desde os anos-70, os países com fracos recursos de energias convencionais (petróleo, carvão e gás), e não só, acordaram para a necessidade de procurar alternativas energéticas que reduzissem a sua dependência dos países produtores. A investigação acelerou e as tecnologias evoluíram de modo a que já hoje existam aplicações técnico-economicamente viáveis.

De forma abrangente, **inovação tecnológica** é toda a originalidade implementada em sistemas e/ou equipamentos, com base na investigação ou em investimentos, tendo como consequência o aumento da eficiência do processo produtivo ou no aparecimento de um novo ou aperfeiçoado produto. É portanto o processo que inclui as actividades técnicas, a concepção, o desenvolvimento e a gestão e que resulta na comercialização de novos (ou aperfeiçoados) produtos, ou na primeira utilização de novos (ou aperfeiçoados) processos e que podem permitir ganhos de eficiência em sistemas, quer produtivos quer administrativos ou financeiros,

Assim, a inovação tecnológica reparte-se basicamente entre produtos e processos.

Paralelamente à investigação e comercialização das novas tecnologias os governos e a Comunidade Europeia têm produzido bastante Legislação no âmbito da Investigação, Aplicação e Financiamento das Novas Tecnologias Produtoras e Utilizadoras de Energias Renováveis, com objectivos não só económicos mas também ecológicos.

Este Trabalho (Tese) é tecnologicamente inovador porque:

- Aplica Equipamentos Standard em funções não convencionais, mas comprovadamente eficientes:
  - Máquina Assíncrona como Gerador a velocidade síncrona (50Hz);
  - Bombas Hidráulicas como Turbinas Hidráulicas.
- Aproveitamento da localização estratégica das ETAs.

#### **3.2 MOTIVAÇÃO E ESCOLHA DA FONTE**

A nossa actividade, na agora empresa **AdA-Águas do Algarve, S.A.**, iniciou-se em 1995 aquando a criação das empresas Águas do Sotavento e Águas do Barlavento e de cuja fusão nasceu o **Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água do Algarve** (2003). Isto permitiu-nos

ampliar o nosso campo de actuação técnica, concretamente nos âmbitos da Engenharia Mecânica, Engenharia Hidráulica e, sobretudo, na área da Gestão Técnica e da Eficiência Energética.

Muito cedo constatámos que, num Sistema de Abastecimento de Água Global (captação, armazenamento, distribuição), existe abundante energia excedentária, em alguns casos necessária ao Processo, mas na maioria dos casos supérflua às necessidades.

A energia associada ao transporte de água nas canalizações de um Sistema Hidráulico manifesta-se sobre a forma potencial (Energia Potencial ou de Posição) e sobre a forma cinética (Energia Cinética ou de Movimento).

O transporte do fluido de um ponto para outro implica a existência de diferentes pressões nesses pontos. Isto pode ser conseguido através da existência de cotas diferentes (por gravidade) ou por aumento de pressão por processos mecânicos (bombagem).

Estes dois processos podem existir isolados (únicos no Sistema) ou sequencialmente (perfis acidentados).

A Energia necessária para elevar a água não pode ser incluída no conceito de excedentária no âmbito de Energia Potencial (energia necessária à elevação). Contudo, a Energia Cinética associada ao caudal num troço gravítico (descendente) de uma conduta, sobretudo se terminal (reservatório), é, em grande parte, energia excedentária, no sentido de que será dissipada na recepção sem aproveitamento específico.

Devemos salvaguardar os casos específicos em que a energia cinética final é fundamental para a operacionalidade e rendimento do respectivo Sistema (velocidade; força viva; etc.).

Num grande Sistema de Abastecimento de Água (Região do Algarve) existem muitas situações que se identificam com o exposto anteriormente, como é o caso das ETAs (Estação de Tratamento de Águas sanitárias).

A Microprodução através do aproveitamento da energia hídrica é recente, e o que conhecemos através da Bibliografia existente cinge-se exclusivamente à aplicação de turbinas acopladas a geradores em condutas ou equipamentos hidráulicos, cuja diversidade abrange aproveitamento da energia cinética (ou potencial) em pequenas captações fluviais (e outras), ou em redes de abastecimento e/ou de rega, sobretudo de carácter doméstico ou da pequena indústria e até em torneiras devidamente adaptadas.

Consequentemente este **trabalho é inovador** e consiste no aproveitamento da energia hídrica excedentária nas condutas de um Sistema de Captação e Distribuição de Águas Sanitárias,

através da implementação de Centrais Mini e/ou Micro Hídricas incorporadas nas condutas adutoras a montante de uma Estação de Tratamento de Águas para abastecimento público (ETA do Beliche).

### **3.3 ESCOLHA DA MODALIDADE DE EXPLORAÇÃO**

A Produção de Energia Eléctrica através de Fontes Alternativas Renováveis deve ter em consideração as seguintes condicionantes:

- i.** Impossibilidade de armazenamento da Energia Eléctrica produzida (salvo quantidades irrelevantes em baterias de acumuladores);
- ii.** Como consequência do ‘ponto’ anterior a Energia Eléctrica produzida deverá ser consumida no mesmo instante;
- iii.** A Energia Eléctrica necessária em cada instante poderá não ter correspondência na Produção, pois esta depende das condições da Fonte (horários, condições climatéricas do momento ou ainda, e neste caso, condicionamento de funcionalidade);
- iv.** Para satisfação das ‘Pontas’ a ‘Utilização da Instalação’ teria um valor reduzido e portanto com custos de Produção elevados.

Por todas estas razões a Modalidade de Exploração escolhida poderá assumir duas vertentes: Produção para Venda e/ou Produção para Consumo. Isto é:

- Toda a Produção para venda;
- Toda a Produção para Consumo;
- Produção repartida entre venda e consumo.

Apesar de qualquer destas modalidades ser possível, actualmente a MCH está a funcionar na modalidade de consumo próprio, mostrando a análise económica (vide anexo) que são situações de exploração equivalentes.

## **4 ESTADO DA ARTE – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 OBSERVAÇÕES**

Neste capítulo far-se-á uma súmula do ‘estado da arte’ com base na literatura técnica e das tecnologias convencionais mais utilizadas neste tipo de centrais hidroeléctricas, com a seguinte metodologia:

- Situação em Portugal;
- Classificação;
- Configurações.
- Sistema PaT (Pum as Turbine)

### **4.2 SITUAÇÃO EM PORTUGAL**

A primeira legislação orientada para a promoção da produção de energia eléctrica a partir de recursos renováveis concretizou-se com a publicação do Decreto-Lei nº 189/88 de 27-05 e da Portaria nº 416/90 de 06-06. Desde então, até 1994, existiu um despertar no interesse em instalações de CMH, devido às vantagens concedidas pela legislação e aos incentivos financeiros disponíveis, onde foram licenciados 120 empreendimentos de utilização de água para produção de energia. Destes 120, até a data de 2012, apenas 44 estão em funcionamento, representando um total de 170 MW de potência instalada e uma produção de 550 GWh/ano. No final do ano de 2001, as últimas estatísticas nacionais indicavam 34 mini-hídricas com uma potência total de 30 MW e produção de 100 GWh/ano, e ainda 20 do Sistema Eléctrico não Vinculado com 56 MW e produtividade de 165 GWh/ano.

Actualmente existem 98 centrais que correspondem a 256 MW de potência instalada e uma produção 815 GWh/ano. Contudo, nos últimos anos, tem vindo a reduzir o número de candidaturas, isto devido a vários factores como:

- Dificuldades nos processos de licenciamento, onde intervém uma série de 12 entidades diferentes sem coordenação entre elas;
- Dificuldades na ligação à rede eléctrica por insuficiências da mesma;
- A falta de critérios objectivos para a emissão de pareceres das diversas entidades;
- Restrições ambientais, o impacto ambiental ou a legislação podem inviabilizar estes projectos, e leva a que os processos se tornem morosos.

Em Março de 2010 existiam 324 MW de potência instalada em CMH e um total de 686 GWh de energia eléctrica produzida (sendo esta calculada desde Abril de 2009 a Março de 2010).

Em termos futuros, apesar de ser difícil estimar o potencial de exploração mini-hídrica existente, é possível apontar para valores perto dos 1.000 MW, dos quais entre 500 e 600 MW são concretizáveis num futuro próximo, com uma produção média entre 1.500 e 1.800 GWh/ano.

### 4.3 CLASSIFICAÇÃO

As CMH são dimensionadas e classificadas com base nos seguintes parâmetros:

- Potência;
- Queda;
- Caudal;
- Regime de exploração.

#### 4.3.1 POTÊNCIA

A designação CMH generalizou-se em Portugal para indicar os aproveitamentos hidroeléctricos de potência inferior a 10 MW. Este limite é geralmente usado internacionalmente como fronteira de separação entre as pequenas e as grandes centrais hidroeléctricas.

Designação	P [MW]
Pequena Central Hidroeléctrica	< 10
Mini Central Hidroeléctrica	< 2
Micro Central Hidroeléctrica	< 0,5

*Tabela -4.1 – Classificação das Centrais Hidroeléctricas em função da potência instalada*

A potência a instalar num aproveitamento hidroeléctrico obedece da informação de duas características físicas: altura de queda e fluxo de água presente no local de instalação da CMH. Assim sendo, a potência é expressa pela equação (4.1) que se apresenta de seguida:

$$P = \eta \times g \times H_u \times Q_i \dots\dots\dots(4.1)$$

Onde:

- $P$  – Potência instalada (kW);
- $\eta$  – Eficiência do sistema (%);
- $g$  – Aceleração gravítica:  $\approx 9,81$  (m/s<sup>2</sup>);
- $H$  – Queda útil (m);
- $Q$  – Caudal instalado (m<sup>3</sup>/s).

A eficiência do sistema tem valores entre 70% e 90%, e é resultado da eficiência de todos os componentes hidráulicos e eléctricos da CMH, como por exemplo a turbina, o gerador e a conduta forçada. Como acontece com qualquer conversão de energia, existem sempre perdas adjacentes ao processo de transformação.

#### 4.3.2 QUEDA

A altura de queda é um dos factores fundamentais das CMH, pois é através desta característica que se consegue retirar a energia potencial presente na água, como também da energia cinética que advém da queda. A classificação habitualmente utilizada é a seguinte:

Designação	$H_u$ (m)
Queda baixa	2 - 20
Queda média	20 - 150
Queda alta	> 150

*Tabela -4.2 – Classificação das Centrais Hidroeléctricas em função da Queda Útil*

#### 4.3.3 CAUDAL

O caudal define-se como o volume do fluxo de fluido que atravessa uma dada secção por unidade de tempo. Um conceito importante na dinâmica dos fluidos

O caudal é um parâmetro fundamental para o dimensionamento das CMH, pois este é o factor determinante e condicionante para a produção de energia eléctrica.

É importante referir que existem diversos conceitos associados ao caudal das CMH, designadamente:

- Caudal Modular ( $Q_{mod}$  [ $m^3/s$ ]) - é o caudal médio anual medido durante vários anos;
- Caudal Ecológico ( $Q_e$  [ $m^3/s$ ]) – é o caudal que não pode ser turbinável por razões ecológicas e ambientais;
- Caudal Instalado ( $Q_i$  [ $m^3/s$ ]) – também designado por caudal máximo turbinável, é o caudal **garantido** durante 20% ( $Q_{20\%}$ ) a 30% ( $Q_{30\%}$ ) do ano. Habitualmente superior ao caudal modular (que estará entre  $Q_{15\%}$  a  $Q_{20\%}$ ). É o caudal usado para dimensionar o equipamento (turbinas).

#### 4.3.4 REGIME DE EXPLORAÇÃO

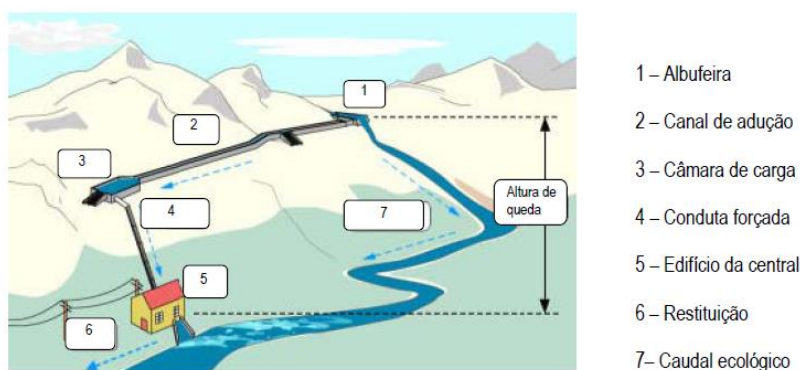
Diz respeito à existência ou não de capacidade de armazenamento de água:

- Centrais a Fio-de-Água : Sem capacidade de armazenamento;
- Centrais de Albufeira: Com capacidade de armazenamento.
  - As centrais de albufeira têm a possibilidade de acumular energia hídrica (semanas ou meses) e de fazer a gestão da mesma consoante as necessidades de produção.
  - As centrais a fio de água têm uma capacidade reduzida de armazenamento (algumas horas de utilização) apenas com a função de regularização do processo.

As CMH são, regra geral, centrais a fio de água.

#### 4.4 Constituição das CMH

Os principais elementos que constituem uma central mini-hídrica podem ser observados na **Fig-4.1**:



**Fig-4.1 – Elementos constitutivos de uma CMH**

##### 4.4.1 ALBUFEIRA E AÇUDE

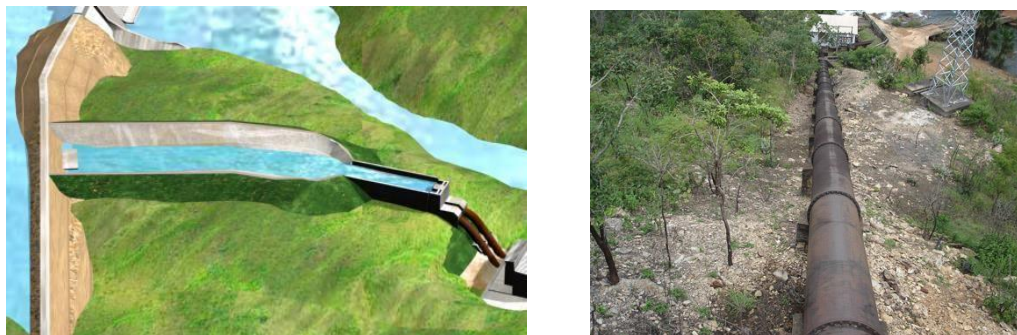
Albufeira é a designação dada ao volume da bacia hidrográfica ocupada pela água oriunda de rios e/ou ribeiras aquando a existência de uma estrutura que impede a sua passagem natural. Essa estrutura é construída por um açude, de pequenas dimensões, para centrais com exploração a fio-de-água e por barragens, de grandes dimensões, para aproveitamentos hidroeléctricos de exploração através de barragem.



**Fig-4.2 – Central Hidroeléctrica de albufeira**

#### **4.4.2 CANAL DE ADUÇÃO**

O canal de adução é o elemento responsável pela condução da água proveniente da albufeira, ou na ausência desta, desde o leito do rio até a câmara de carga. Ao longo do canal de adução o nível da água é praticamente o mesmo, existindo apenas uma pequena diferença de desnível, de forma a possibilitar a circulação da água.



*Fig-4.3 – Central Hidroeléctrica – canal de adução*

#### **4.4.3 CÂMARA DE CARGA**

A câmara de carga é a estrutura existente entre o canal de adução e a conduta forçada em algumas CMH, permitindo impulsionar a transição entre um escoamento livre existente no canal de adução e o escoamento sob pressão da conduta forçada e, ainda, atenua o choque hidráulico que acontece na conduta forçada quando se processa o fecho brusco do dispositivo de controlo do caudal na turbina.

#### **4.4.4 CONDUTA FORÇADA**

A conduta forçada é o elemento que conduz a água desde a câmara de carga até ao edifício da central onde se encontram os grupos turbina - alternador.

#### **4.4.5 EDIFÍCIO DA CENTRAL**

A central é um edifício que abriga os grupos turbina – alternador, que produzem energia eléctrica da energia hidráulica, os quadros de comando e, por vezes, os transformadores.

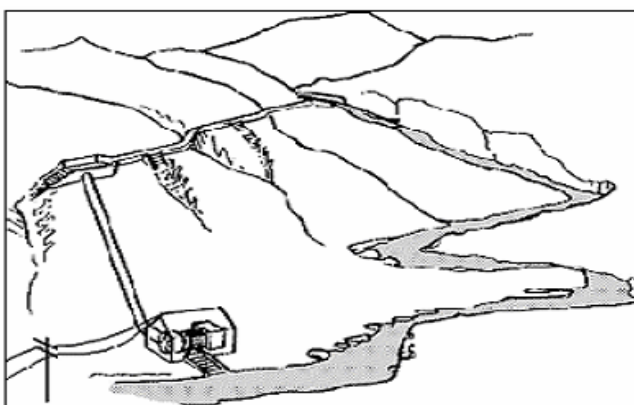
A central pode localizar-se junto do pé da barragem, aproveitando o desnível criado pela própria, ou localizar-se a jusante, por vezes a vários quilómetros, aproveitando também o desnível do rio.

#### **4.4.6 RESTITUIÇÃO**

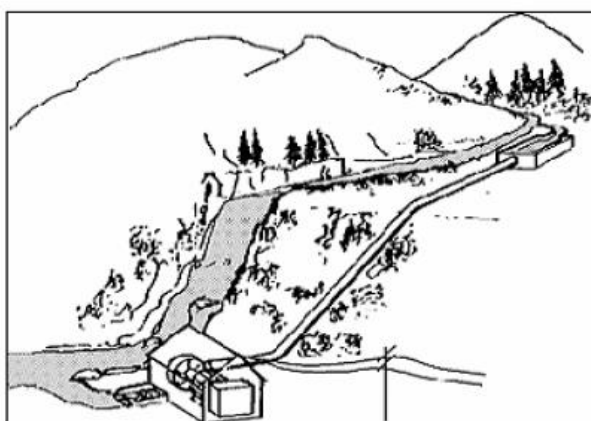
A água depois de turbinada é recolhida num canal, sendo conduzida, por meio deste, de volta ao rio, ou a outra bacia artificial, junto à qual se encontram outras tomadas de água de uma eventual central situada a jusante.

#### **4.5 CONFIGURAÇÕES**

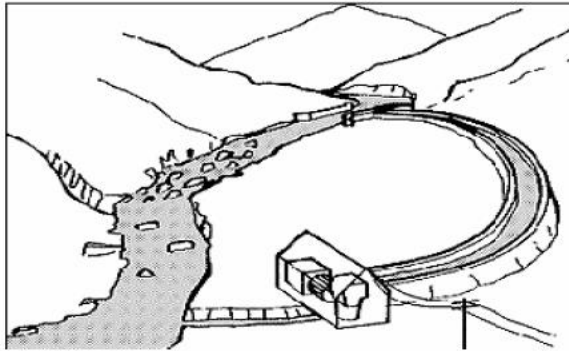
Existem diferentes configurações consoante as características do local. Apresentam-se de seguida algumas alternativas:



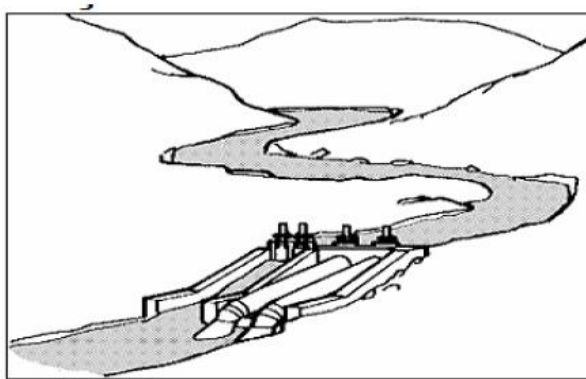
*Fig.-4.4- Central com canal de adução e conduta forçada com queda alta, longe da barragem*



*Fig.-4.5- Central só com conduta forçada e queda alta perto da barragem*



*Fig.-4.6- Central só com canal de adução e câmara de carga, queda baixa com a central afastada da barragem*



*Fig.-4.7 - Central encastrada na Barragem e Queda baixa*

#### **4.6 SISTEMA PAT (PUMP AS TURBINE)**

As crises energéticas actuais, aumentaram a necessidade de encontrar alternativas para as fontes convencionais de produção de energia. Entre as alternativas as Pequenas Centrais Hidroelétricas (CMH) são das mais promissoras e significativas. Prolifera em todo o mundo a solicitação de Projectos de CMH, porque estas podem ser estabelecidas, mesmo em situações de recursos hídricos de porte reduzido.

O problema do alto custo de capital inicial nas Centrais tradicionais está associado com o aumento da instalação de sistemas de pequenas centrais hidrelétricas em rios de água, frequentemente encontrados em áreas remotas e rurais, como florestas e áreas alpinas. As áreas remotas são comumente encontradas em países em desenvolvimento que estão enfrentando os problemas da crise de energia.

A utilização de bombas centrífugas, funcionando em sentido inverso, constitui uma forma eficaz de reduzir o custo do equipamento em regimes de CMHs.

Tomemos o caso da reconstrução da Estação de Dobromyslyansk (pequena Central Hidroeléctrica no rio Chernitsa), no Distrito de Minsk da Bielorrússia, Europa Oriental (Berlim, 1993). O problema de equipar a estação foi resolvido através da utilização de bombas como turbinas (PaT) e motores de indução como geradores para a produção de energia eléctrica. A pequena estação hidreléctrica de Dobromyslyansk tornou-se a primeira Central utilizando o **Sistema PaT** instalado no interior da Comunidade de Estados Independentes da Europa Oriental.

O uso de PaT é uma promissora solução para o problema de electrificação rural. Por exemplo, alguns projectos PaT estão a ser implementados para fornecer electricidade a áreas rurais da Tanzânia no Kinko (10 kW) (Singh et al 2006); no Quénia Thima (2,2 kW) (Maher, Smith e Williams, 2003), e no norte da Tailândia, Huai aldeia Coisa Kra (Greacen, 2006).

Para além da produção de energia, o funcionamento invertido de bombas pode também ser utilizado em sistemas de recuperação de energia, sistemas de abastecimento de água. As bombas são produzidas em série, em diversos tamanhos, e têm as vantagens de baixo custo e simplicidade.

A ideia da Produção de Energia Eléctrica utilizando o Sistema PaT surgiu por volta de 1930 (Chapallaz, EichenbergerandFischer 1992). Vários estudos sobre a utilização de PaT chegam a conclusões importantes. As Bombas são máquinas relativamente simples e facilmente disponíveis em todos os países desenvolvidos e em desenvolvimento. O Sistema PaT apresenta uma eficiência aceitável para as operações de fluxo constante. Contudo, existem ainda algumas dificuldades na utilização generalizada do Sistema PaT para a produção de energia, devido à sua limitada eficiência para pequenas cargas e reduzida capacidade de regulação. Além disso, os fabricantes de bombas não possuem informação sobre as características do desempenho e do fluxo quando as bombas funcionam como turbinas. A falta de dados do desempenho de PaT é uma barreira significativa para o uso mais generalizado de PaT (Greacen 2006, Tamm et al 2000, e Williams, 1995).

Além disso, um dos principais problemas para a produção de Energia Eléctrica através de PaT é a selecção adequada da bomba para um projecto específico.

## 5 CONCEPÇÃO DO TRABALHO

### 5.1 OBSERVAÇÕES

#### 5.1.1 OBJECTIVOS

Pretendemos aplicar os conhecimentos tecnológicos já desenvolvidos na implementação de Centrais Mini e Micro Hídricas (CMHs), nos pontos de maior disponibilidade de energia excedentária, em condutas gravíticas numa situação específica a montante de uma ETA, proporcionando o aproveitamento da energia cinética e potencial do caudal de água bruta, para a produção de energia eléctrica.

Podemos resumir a concepção do estudo:

- Aproveitamento da Energia Hídrica excedentária em Condutas Gravíticas de Águas Sanitárias de grande capacidade (caudais; pressões; velocidades);
- Localização imediatamente a montante de uma Estação de Tratamento de Águas sanitárias (ETA);
- Funcionamento integrado no Processo de Tratamento, relativamente aos Sistema de Comando e Controlo da ETA (adaptação às necessidades das ETA sem condicionalismos);
- Utilização de Bombas como Turbinas (PaT) acopladas a Geradores Assíncronos;

#### 5.1.2 INOVAÇÃO

Este Projecto, para além de utilizar tecnologias ainda em fase de experimentação e desenvolvimento, apresenta as seguintes características inovadoras:

- i. Incorporação das Centrais Micro e Mini Hídricas (CMH) em **Condutas Adutoras imediatamente a montante de ETA's;**
- ii. **Integração das CMH na automatização da ETA;**
- iii. **Utilização dos Sistema PaT** (Bombas como Turbinas) para produção 'industrial' de Energia Eléctrica;
- iv. **Produção adaptada a Potências de 2 a 3 dígitos de kVA.**

## **5.2 ESCOLHA DO LOCAL**

Os Estudo em questão é realizado no Sistema Primário de Distribuição das Águas do Algarve. De acordo com o já descrito, a localização terá de ser em troços gravíticos terminais de modo a não influir na rendibilidade do Sistema, isto é, não deverá implicar perdas de carga a vencer pelo sistema hidropressor.

Nestas circunstâncias os locais possíveis são os seguintes:

- **Listagem dos locais com capacidade inferior a 30 kW) :**

1. ETA do Beliche – Inter – fases;
2. Reservatório Inicial do Adutor Ocidental - Reservatório Palmeirinha;
3. Reservatório Espinhaço de Cão - Reservatório Aldeia Velha;
4. Reservatório Inicial do Adutor Oriental - Reservatório Pinhal Albufeira;
5. Reservatório Inicial de Tavira - Reservatório Sto. Estevão II;
6. Reservatório Inicial de Tavira - Reservatório Sto. Estevão I;
7. Reservatório Inicial de Tavira - Reservatório Moncarapacho;
8. Reservatório Inicial de Tavira - Reservatório Murtais;
9. Reservatório Inicial de Tavira - Reservatório Quelfes;
10. Reservatório Inicial de Tavira - Reservatório Pechão;
11. Reservatório Inicial de Tavira - Reservatório Conceição 2;
12. Reservatório Inicial de Tavira - Reservatório Pocinho;
13. Reservatório Inicial de Tavira - Reservatório Altura;
14. Reservatório Vale do Gato - Reservatório Odeleite;
15. Reservatório Vale do Gato - Reservatório Foz de Odeleite;
16. EE das Fontainhas - Reservatório VII;
17. EE das Fontainhas - Portela 2;
18. EE Fonte do Bispo - Reservatório Prego (Malhão);
19. EE Beliche - Reservatório Monte Francisco II;
20. EE Azinhal 1 e 2 - Reservatório Azinhal (Zona Baixa);

21. EE Martim Longo - Reservatório Pereiro;
22. EE Balurcos - Reservatório Corte das Donas.

- **Listagem dos locais com capacidade superior a 30 kW :**

1. Barragem do Funcho - ETA de Alcantarilha;
2. Barragem de Beliche - ETA do Beliche;
3. ETA de Alcantarilha – Inter – fases;
4. ETA das Fontainhas – Inter – fases;
5. ETA de Tavira – Inter – fases;
6. Reservatório Inicial do Adutor Ocidental - Reservatório Chão das Donas;
7. Reservatório Inicial do Adutor Ocidental - Câmara de Válvulas de Penina;
8. Reservatório Inicial de Tavira - Reservatório Olhão (Brancanes);
9. Reservatório Inicial de Tavira - Reservatório Tavira (Pero Gil);
10. EE Alcantarilha Adutor Ocidental - Reservatório Vale de Lousas.

Atendendo aos objectivos do nosso Estudo a escolha recaiu sobre uma ETA e entre as possíveis foi escolhida a ETA do BELICHE.

### **5.3 DOCUMENTAÇÃO BASE**

A decisão da localização dependeu da análise dos dados existentes na Exploração, fundamentalmente:

- Projecto Hidráulico da Conduta Adutora;
- Mapas de Caudais (disponíveis e/ou utilizados);

Esta documentação que se apresenta em anexo foi fornecida pelos Serviços de Exploração e de Manutenção das AdA – Águas do Algarve, S.A..

### **5.4 ANÁLISE DA DOCUMENTAÇÃO (METODOLOGIA)**

Após a decisão do local da Instalação, e com base no traçado do sistema implantado em cartografia à escala 1: 25000 (vide anexo), procedemos a um cálculo preliminar da energia disponível, estimando-se as perdas energéticas em função do caudal transportado e das características do subsistema.

Estes valores estão apresentados em Tabela anexa (Micro-Hídrica do Beliche – Produção Eléctrica) nas Colunas:

- Cota do Espelho;
- Queda Disponível;
- Cauda Turbinável.

## **5.5 CÁLCULOS PRELIMINARES (ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO)**

Os cálculos preliminares tiveram por suporte o ‘Modelo Simplificado’ (desenvolvido em Rui Castro) com o objectivo de, por um processo simples, conhecer a Potência Real disponível e com base nesses valores e no estudo do Diagrama de Exploração conseguir uma primeira directriz relativamente a:

- Potência a Instalar;
- Número de Grupos

Considerámos um horizonte de Projecto de 14 anos (2007-2020) relativamente à Projecção de Caudais para amortização do Sistema e com base nestes valores foi feita uma Estimativa de Produção

Com base nas produções limites correspondentes aos anos de 2007 e 2020, em termos dos caudais que virão a ser disponibilizados para turbinagem e das respectivas perdas energéticas, foram calculadas as produções para os anos intermédios entre aquelas duas datas obtidos por simples interpolação.

### **5.5.1 MODELO DE OPTIMIZAÇÃO – ANÁLISE PRÉVIA**

#### **5.5.1.1 Introdução**

O objectivo deste Trabalho é desenvolver um modelo que optimize a estratégia de operação de uma CMH adaptada à ‘entrada’ de uma Estação de Tratamento de Água.

O regime de funcionamento desta CMH é atípico relativamente à grande maioria das suas congéneres Reservatório.

De facto a grande maioria das CMH são do tipo Fio-de-Água e são aplicadas em cursos de água (naturais ou artificiais) ou, em casos especiais, em Instalações com caudais interessantes.

Nestes casos os caudais podem ser funções de variáveis temporais, como é o caso de ‘estações do ano’, ‘horários diários’, ‘períodos de laboração’, etc.

Portanto a gestão na Produção de Energia Eléctrica vai depender das condições temporais e merecerão um adequado tratamento de exploração.

No caso concreto deste Estudo a dependência temporal depende do regime de funcionamento da ETA.

É curioso sublinhar que, inclusivamente, o regime de funcionamento de uma CMH, com esta aplicação, tem um diagrama quase que em oposição de carga aos casos tradicionais.

Atentemos, p.ex., que uma ETA funciona com maiores caudais no verão ainda que os rios e seus afluentes sejam menos caudalosos nesse período.

### **5.5.1.2 Estratégia de Operação**

É extremamente importante ter conhecimento do regime de funcionamento da ETA (diagrama de exploração) para que seja possível identificar o regime de exploração.

Tendo em consideração a informação da produção anual de uma CMH e do seu regime de exploração, pode retirar-se a estratégia de operação aplicada aos aproveitamentos desta natureza.

Uma característica fundamental deste tipo de CMH é que têm uma produção permanente ao longo do ano, o que, à priori, dá algumas garantias de um ‘retorno de investimento’ a curto-médio prazo.

Foram estudados os Diagramas de Produção em função dos Diagramas de Caudais Tratados.

### **5.5.1.3 Energia Eléctrica Produtível – Estimativa**

#### **5.5.1.3.1 Metodologia Simplificada**

Numa análise prévia simplificada, tendo em vista a estimativa da potência e do número de grupos a instalar na fase de anteprojecto, vamos recorrer a critérios simplificados com base na experiência na hidromecânica.

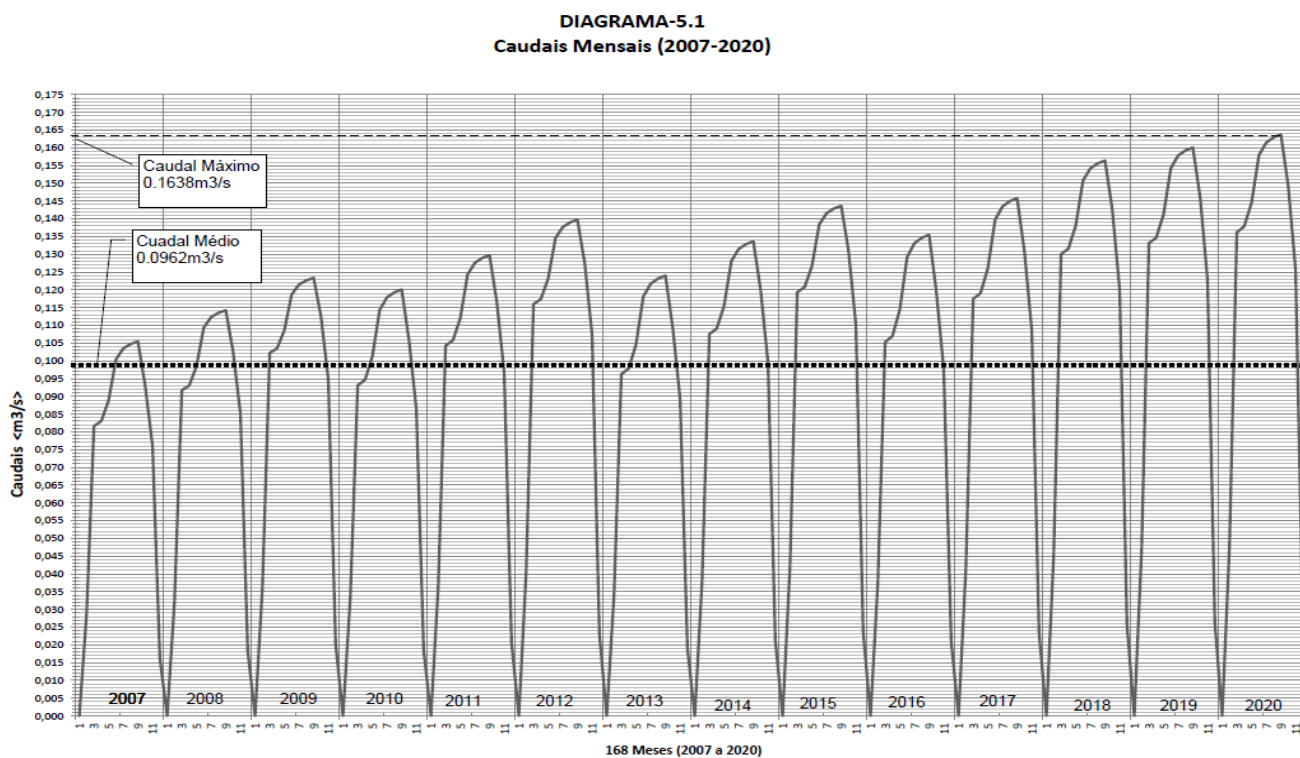
#### **5.5.1.3.2 Potência Nominal**

Numa primeira fase estudaremos a utilização de um único grupo turbina/gerador. Contudo neste ESTUDO, será considerada a instalação de 2 Grupos em que poderão trabalhar em regime

individual (um grupo apenas a funcionar) ou em paralelo atendendo à previsão de ampliação das instalações.

Recorrendo à **curva de duração de caudais**, a turbina é, em primeira aproximação, dimensionada para um caudal nominal turbinado igual ao que é excedido, numa certa percentagem, em dias de ano médio, dependendo a escolha desta percentagem da forma da curva.

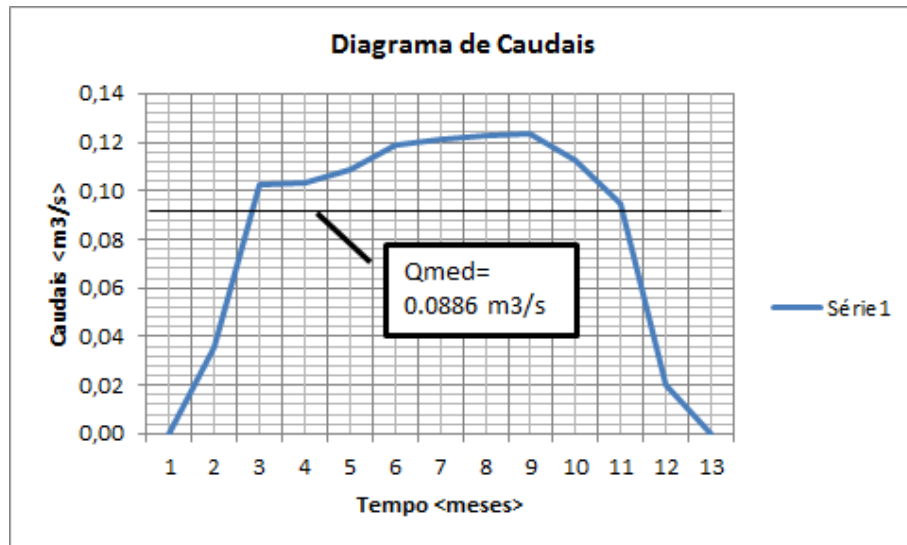
Conforme se indica no **Diagrama-5.1**, os caudais apresentam uma certa regularidade e semelhança de ano para ano, tendo um valor máximo no verão e, atendendo à paragem da ETA em Dezembro, os caudais não nulos neste mês.



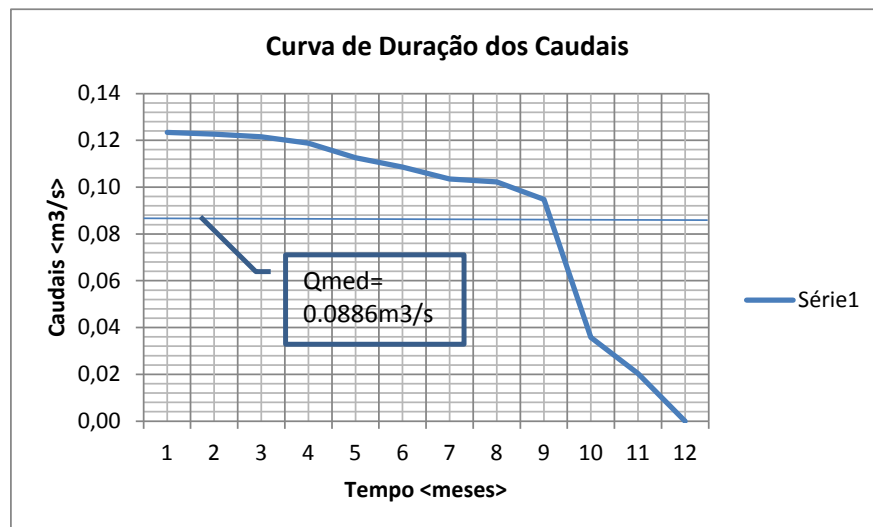
**Diagrama-5.1 –Projecção de Caudais 2007-2020**

Atendendo à forma da curva, praticamente podemos considerar como utilizável todo o regime anual, considerando a paragem em Dezembro.

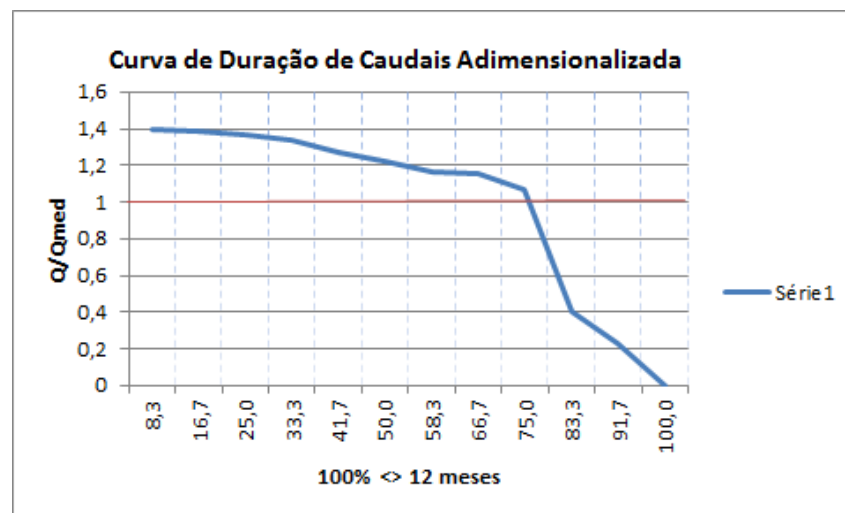
Escolhendo 2009 como ano representativo de caudais conhecidos (de facto), podemos construir os respectivos diagramas anuais de caudais (caudais<>meses ; curva de duração de caudais; curva de duração de caudais adimensionalizada) –**Diagramas 5.2-a,b,c**:



*Diagrama-5.2a –Diagrama de Caudais ano 2009*



*Diagrama-5.2b –Curva de Duração de Caudais ano 2009*



*Diagrama-5.2c –Curva de Duração de Caudais adimensionalizada - ano 2009*

Verificamos que no ano-2009 o caudal médio tem o valor  $Q_{med}=0.0866 m^3/s$ .

Se utilizarmos este caudal para o dimensionamento da Turbina chegaríamos a valores subdimensionados e portanto com possíveis consequências invejáveis. De facto se atentarmos na sequência de caudais anuais exposta no Diagrama-1, e que é o resultado dos valores projectados indicados na Tabela junta, verificamos que há uma evolução significativa até ao ano 2020.

Assim, pensamos ser conveniente utilizar o caudal médio no horizonte dos 14 anos (2007-2020), que tem o valor de  $Q_{med}=0.0962 m^3/s$ .

Quando não há dados para fundamentar solidamente a escolha de um determinado caudal nominal, de entre a gama indicada, é prática habitual tomar o caudal nominal ( $Q_N$ ) igual ao caudal médio ( $Q_{med}$ ).

Esta opção é muitas vezes tomada pelos projectistas na fase de anteprojecto. Contudo, com base no Diagrama de Caudais (*Diagrama-5.1*), verificamos que os Caudais anuais mantêm variações cíclicas muito semelhantes e bem ‘preenchidas’ com uma curva envolvente (superior) crescente.

Contudo, numa primeira aproximação utilizaremos o critério mais usual:

$$Q_N=Q_{med}=0,0962 m^3/s.....(5.1)$$

Definido o caudal nominal e tomando, nesta fase, como constantes a altura de queda e o rendimento, a potência eléctrica nominal a instalar,  $P_N$  (W), é estimada pela equação (5.2).

$$P_N = \gamma \times Q_N \times H_b \times \eta_c [kW].....(5.2)$$

onde:

- $\gamma = 9.810 N/m^3$  é o peso volúmico da água;
- $Q_N$  ( $m^3/s$ ) é o caudal nominal,  $H_b$  (m) é a altura de queda bruta - desnível entre montante e jusante;
- $\eta$  é o rendimento global de todo o aproveitamento hidroeléctrico.

A potência nominal (em kW) instalada numa central **mini-hídrica** pode ser estimada através de uma expressão prática, de cálculo muito simplificado indicada em (5.3):

$$P_N = 7 \times Q_N \times H_b .....(5.3)$$

No que resulta:

$$P_N = 7 \times Q_N \times H_b = 7 \times 0,0962 \times 16,32 = 11 kW .....(5.4)$$

A gama de potências nominais dos equipamentos existente no mercado é discreta, pelo que a opção se fará pelo grupo turbina/gerador, de entre os que o mercado oferece, cuja potência nominal mais se aproxima do valor calculado.

Como veremos adiante, e atendo aos cálculos directos (Tabela de Dados e Cálculos em anexo), a opção final é  $P_N=2x 5.5 kW$ .

### 5.5.1.3.3 Estimativa da Energia Produtível

Para o cálculo da energia produtível, em regra, utiliza-se um diagrama de caudais anual representativo do objectivo.

Atendendo à semelhança dos diagramas anuais, a exploração (caudais) terá um carácter cíclico e semelhante.

Como o ponto de partida para o cálculo da energia eléctrica produtível, em ano médio, é a curva de duração de caudais vamos considerar tal curva mas para todo o período de projecção (2007-2020) em vez do ano médio. Assim os valores que vamos obter estarão melhor sustentados.

Na Tabela de Dados e Cálculos anexa, está calculada directa e iterativamente a estimativa da energia disponível, quando totalmente aproveitada (transformada). Contudo vamos aplicar o método empírico para comparar os valores assim obtidos.

Como verificamos na referida Tabela, o projecto de uma central mini-hídrica é um processo iterativo que envolve o balanço de despesas e receitas para várias possíveis soluções de potências nominais. A hipótese inicial será a instalação de um único grupo turbina/gerador, escolhido com base nos critérios apresentados anteriormente.

No método de cálculo simplificado a turbina é escolhida para um determinado caudal nominal, que, normalmente se verificará apenas em cerca de **20% a 30%** dos dias, em ano médio.

Segundo [Moura] e [Betâmio] os factores dos limites de exploração das turbinas em função do caudal turbinado estão indicados na **Tabela-5.1** seguinte:

<b>Tabela-5.1 - Limites de Exploração das Turbinas</b>		
<b>TURBINA</b>	$\alpha_1 = Q_{\min}/Q_N$	$\alpha_2 = Q_{\max}/Q_N$
<b>Pelton</b>	0,1 a 0,2	1,15
<b>Francis</b>	0,3 a 0,4	1,15
<b>Kaplan com dupla regulação</b>	0,25	1,25
<b>Kaplan com rotor regulado</b>	0,4	1,0
<b>Hélice</b>	0,75	1,0

Como já dissemos, o ponto de partida para o cálculo da energia eléctrica produtivo, em ano médio, é a curva de duração de caudais (**Diagrama-5.3**). Nesta curva, foram marcados os limites de exploração da turbina ( $Q_{min}$  e  $Q_{max}$ ), (expressões (5.5) e (5.6)):

$$Q_{min} = \alpha_1 \times Q_N = 0,35 \times 0,0962 = 0,03367 \text{ m}^3 / \text{s} \dots\dots\dots(5.5)$$

$$Q_{Max} = \alpha_2 \times Q_N = 1,15 \times 0,0962 = 0,11 \text{ m}^3 / \text{s} \dots\dots\dots(5.6)$$

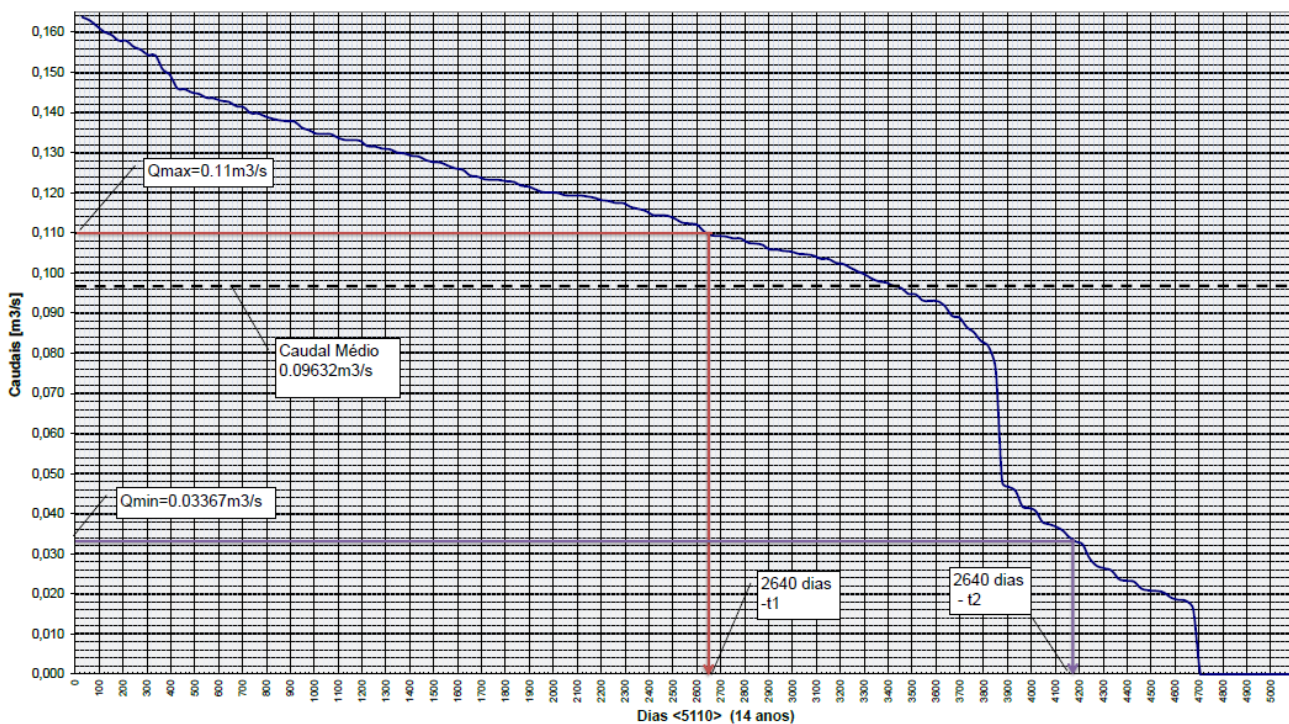
Atendendo ao tipo de Diagramas anuais, bastante cheios, considerámos  $t_o = 0$  para o tempo do caudal de cheia  $Q_c$ .

Deste modo, ficam definidos os tempo  $t_1$  e  $t_2$  que representam os períodos de tempo em que o caudal máximo de operação e o caudal mínimo de operação são igualados ou excedidos, respectivamente. Lemos no **Diagrama-5.3**:

$$Q_{min} = \alpha_1 \times Q_N = 0,03367 \text{ m}^3 / \text{s} \Rightarrow t_2 = 4186 \text{ d} \dots\dots\dots(5.7)$$

$$Q_{Max} = \alpha_2 \times Q_N = 0,11 \text{ m}^3 / \text{s} \Rightarrow t_1 = 2640 \text{ d} \dots\dots\dots(5.8)$$

**CURVA DE DURAÇÃO DE CAUDAIS [2007-2020]**



**Diagrama-5.3 - Curva de Duração de Caudais (2007-2020)**

Considerando que o rendimento global e a altura de queda são constantes, a energia produtível é proporcional à área de exploração marcada na curva de duração de caudais, podendo ser estimada através de:

$$E_a = 7 \times H_b \times \left[ (t_1 - t_o) \times \alpha_2 \times Q_N + \int_{t_1}^{t_2} Q(t) \times dt \right] \text{ kWh} \dots\dots\dots(5.9)$$

$$E_a = 7 \times 16,32 \times \left[ (2640 - 0) \times 1,15 \times 0,0962 + \int_{2640}^{4186} Q(t) \times dt \right] \times 24 \text{ kWh} \dots\dots(5.10)$$

O valor do Integral da expressão anterior pode ser calculado através da área indicada no **Diagrama-5.3**:

$$A = \frac{0,11 + 0,08}{2} \times (3380 - 2640) + \frac{0,047 + 0,033}{2} \times (4186 - 3880) = 82,52 \dots\dots\dots(5.11)$$

$$E_a = 7 \times 16,32 \times (292,063 + 82,52) \times 24 = 1.027.020 \text{ kWh} \dots\dots\dots(5.12)$$

(E<sub>a</sub> - Energia prevista num horizonte de 14 anos)

### 5.5.2 OPÇÃO POR DOIS GRUPOS TURBINA/GERADOR

Esta CMH está incorporada na conduta adutora da ETA, o que implica que o seu funcionamento está condicionado pela gestão do processo de operação.

Os caudais de entrada de uma ETA não estão sujeitos a variações bruscas pois o processo de tratamento é contínuo e predeterminado. Assim poderão prever-se, e estipular-se, determinados ‘set-points’, preferencialmente nas faixas de rendimento máximo.

Isto poderia ser facilmente conseguido através da instalação de vários grupos perfazendo a potência total disponível. Isto requer um estudo económico atento.

Contudo se pensarmos num número reduzido de grupos (2 ou 3) esta solução poderá ser economicamente viável.

Nesta solução um dos grupos deverá funcionar em ‘rampa’ e os restantes em ‘escalão’.

Contudo, o caso mais simples consiste em ter dois grupos iguais, com repartição de caudais entre turbinas segundo uma regra pré-fixada. O caudal máximo turbinável, **QMT**, é:

$$QMT = \alpha_1 \times Q_{N1} + \alpha_2 \times Q_{N2} \dots\dots\dots(5.13)$$

A situação mais usual (e mais conveniente) corresponderá a:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 1 \quad e \quad Q_{N1} = Q_{N2} \quad \Rightarrow \quad Q_N = 2 \times Q_{N1} = 2 \times Q_{N2} \dots (5.14)$$

em que  $Q_{Ni}$  é o caudal nominal de cada turbina em  $m^3/s$ . Para este caso os regimes de funcionamento poderão ser os apresentados na **Tabela-5.2**, onde  $Q_j$  é um determinado caudal efluente:

<b>Tabela-5.2 - Regimes de Funcionamento das Turbinas</b>		
$Q_j$	<b>Turbina 1</b>	<b>Turbina 2</b>
$0 \leq Q_j \leq Q_N/2$	$Q_j$	0
$Q_N/2 \leq Q_j \leq 1,25 \times Q_N$	$Q_j/2$	$Q_j/2$

Como já foi calculado, em termos de potência teremos 2 grupos de 5.5kW

## 5.6 MODELO REAL

Na Análise Prévia seguimos, no aplicável, alguns ‘passos’ propostos na diversa literatura da especialidade, com preponderância da sebenta **Introdução à Energia Mini-Hídrica de Rui M.G. Castro**.

Como já foi dito, os resultados simulados diferem algo da realidade sobretudo atendendo às características dos caudais que são contínuos e anualmente cíclicos sem grandes desvios. A Curva de Duração de Caudais deste ESTUDO é bem diferente das curvas apresentadas na Sebenta anteriormente citada que suportam a teoria e cálculos aí apresentados.

Numa fase de anteprojecto são suficientes os estudos realizados com as metodologias expostas anteriormente. As conclusões retiradas podem permitir seleccionar, de entre várias alternativas possíveis, as que devem passar à fase seguinte para serem objecto de estudos detalhados.

Na fase de projecto não são admissíveis modelos simplificados, sendo necessário aplicar modelos com um grau de detalhe mais ou menos elevado ou utilizar dados concretos com base empírica comprovada, como é o nosso caso.

Devemos ainda referir que o Estudo Preliminar apresentado tem por base o sistema tradicional (*bomba+turbina*), não tendo em consideração a utilização do Sistema PaT. Contudo

tratando-se de um processo simples para obtenção de uma ordem de grandeza das Potências em causa, aceitamos esta técnica como interessante.

Isto vai confirmar-se na solução final deste trabalho como vamos constatar.

Devemos ainda sublinhar que na **Tabela de Dados e Cálculos (Projecção 14 anos)** apresenta uma energia disponível de 1.507.705 kWh num horizonte de 14 anos.

Nos cálculos preliminares anteriores, que são cálculos de prévio dimensionamento, chegámos a um valor de energia produtível de 1.027.020 kWh, o que corresponde a 68% de aproveitamento.

## **6 GERADOR DE ENERGIA ELÉCTRICA**

A abordagem que vamos fazer sobre a Máquina Assíncrona tem dois propósitos:

- Análise descritiva sucinta mas que possibilite o entendimento dos princípios electromecânicos que fundamentam o funcionamento da Máquina e a sua aplicação como Gerador;
- Dedução dos DIAGRAMAS (Vectorial, Equivalente e Diagrama do Circulo) e utilização destes como ferramenta analítica fundamental para percepção das variáveis e dos parâmetros electromecânicos envolvidos no ponto de funcionamento proposto.

### **6.1 A MÁQUINA ASSÍNCRONA**

O motor de indução assíncrono, devido às suas características electromecânicas, é o de maior utilização no universo dos motores de corrente alternada. Deve-se esta preferência à sua robustez, simplicidade, fácil manutenção e à circunstância de as suas características de funcionamento adaptarem-se às exigências do trabalho e à velocidade constante.

Como Motor, a sua aplicação é bastante diversificada quer na indústria quer na agricultura, no accionamento de máquinas operatrizes, bombas de água, moinhos, correias transportadoras, ventiladores, exaustores, serras e outros usos.

Como Gerador é cada vez mais utilizado sobretudo no âmbito das Energias Alternativas em projectos de mini ou microprodução de energia eléctrica (Centrais Eólicas e Centrais Hidroeléctricas).

O núcleo do estator é feito de aço para fins eléctricos e contém ranhuras (cavas) onde se alojam os condutores, enrolados (espiras) em forma de bobina. O núcleo do rotor também é fabricado em aço, com ranhuras; nestas são introduzidos os condutores que são ligados entre si nos topos (cabeças) (rotor em curto-circuito) ou ligados a anéis (rotor bobinado).

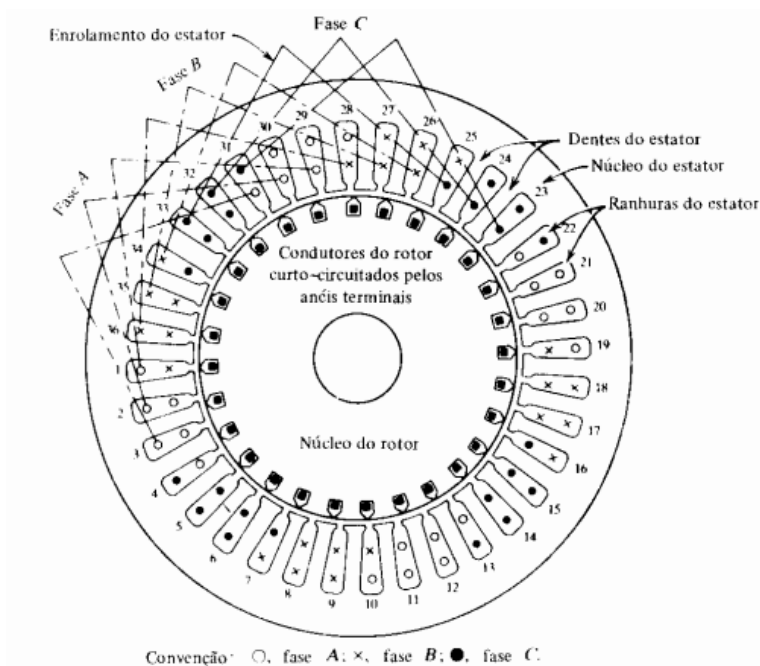
No caso de rotor em gaiola, estes condutores são constituídos ou por barras de cobre ou de ligas metálicas, ou então por alumínio fundido. Este conjunto é instalado entre mancais (chumaceiras com rolamentos) dentro do estator e separado deste por um entreferro.

O enrolamento do estator pode ser monofásico ou trifásico. A **Fig.-6.1** mostra um corte transversal de uma máquina assíncrona trifásica. Nela observa-se que o estator e o rotor são constituídos por 36 e 28 ranhuras, respectivamente.

Em funcionamento, as tensões trifásicas aplicadas ao enrolamento do estator estabelecem correntes trifásicas através das bobinas do mesmo; estas correntes criam campos magnéticos alternados que, somados a cada instante, dão origem a um único campo magnético resultante cujos pólos giram em torno de um eixo, formando assim o **campo girante** da máquina. A velocidade, em rotações por minuto, do campo girante da máquina é dada pela equação:

$$N_g = \frac{50\text{Hz} \times 60\text{s}}{\text{pares de pólos}} = \frac{3000}{p} \dots \dots \dots (6.1)$$

$N_g$  é a velocidade do Campo Girante (velocidade síncrona) do motor e  $p$  representa o número de pares de pólos da máquina.



**Fig.-6.1 -Corte transversal de uma máquina assíncrona (NASAR,SA.)**

O campo girante e o rotor, no Motor Assíncrono, têm velocidades angulares diferentes. Podem observar-se então três possibilidades de funcionamento:

- Se a velocidade do rotor for menor que a do campo girante, mas no mesmo sentido, a máquina assíncrona se comporta como motor, fornecendo potência mecânica no seu eixo;
- Se a velocidade do rotor for maior do que a velocidade síncrona, a máquina transforma-se em gerador de energia eléctrica; neste caso uma outra máquina deve ser ligada ao seu eixo e desta forma transferir-lhe energia mecânica através do eixo que será convertida em energia eléctrica nos terminais do estator;
- Se o campo girante da armadura e o rotor tiverem sentidos de rotação diferentes, a máquina funciona com Travão (região de frenagem); o binário motor de origem eléctrica e que actua sobre o eixo é o binário resistente.

## 6.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento das máquinas eléctricas baseia-se fundamentalmente na interacção electromagnética entre um elemento indutor e um outro elemento induzido. Nas máquinas rotativas, esses elementos correspondem ao estator e ao rotor.

Como já foi referido, devido às suas características electromecânicas, os motores de indução são os de maior utilização no âmbito dos motores de corrente alternada e, de acordo com o respectivo princípio de funcionamento, dividem-se em máquinas síncronas e máquinas assíncronas.

Nas máquinas síncronas a relação entre a frequência da tensão aplicada ao estator ( $f$ ) e o número de rotações por segundo do rotor ( $N$ ) é dada por:

$$f = p N \dots\dots\dots(6.2)$$

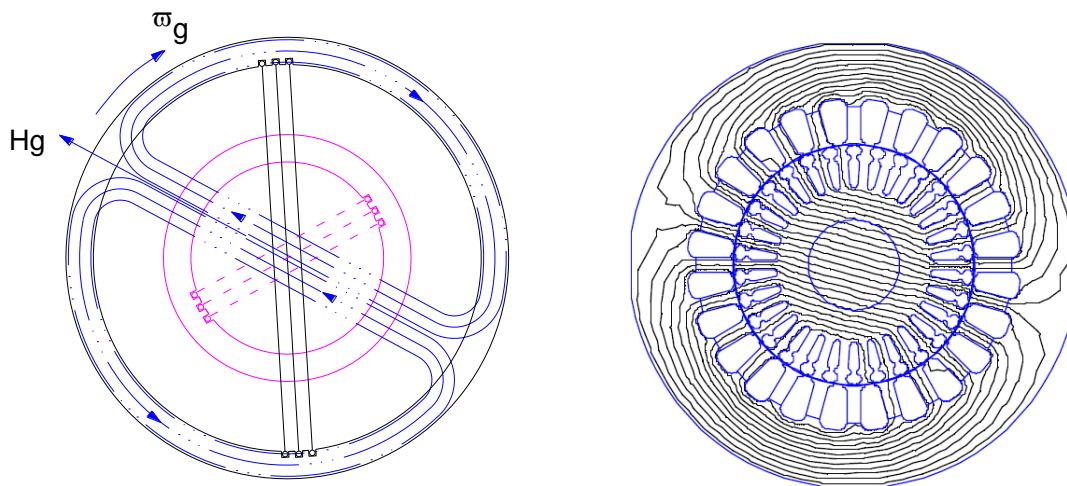
em que  $p$  é o número de pares de polos;

Nas máquinas assíncronas, função do objectivo de utilização, o número de rotações do rotor está relacionado com a frequência fundamental da Tensão através das expressões:

$$f < pN \quad \text{ou} \quad f = pN \quad \text{ou} \quad f > pN \dots\dots\dots(6.3)$$

Nas máquinas assíncronas os dois enrolamentos, o do estator e o do rotor, estão ligados, magneticamente, por um campo girante criado pelo primeiro, como já foi referido, cujo fluxo comum a ambos fecha-se através dos respectivos núcleos.

Na **Fig.-6.2** esquematizamos a constituição da máquina assíncrona, na qual o enrolamento do estator está desenhado a negro (traço contínuo) e o enrolamento do rotor a magenta (tracejado), alojados em cavas na periferia interna do rotor e do estator.



**Fig.-6.2 – Máquina Assíncrona – Campo de indução (princípio de funcionamento)**

O vector  $H_g$  representa o campo girante de amplitude constante e a rodar à velocidade angular  $\omega_g$ , em sincronismo com a velocidade  $\omega_s$  do estator, com o sentido indicado.

Para se criar um campo girante é necessário que os enrolamentos dos estator constituam um sistema polifásico, que em máquinas trifásicas corresponderão a conjuntos de três bobinas, cada uma alimentada pela respectiva fase.

Consideremos um motor assíncrono trifásico. Cada bobina do estator será percorrida por uma corrente da seguinte forma:

$$\begin{cases} i_1 = I_{max} \times \cos(\omega t) \\ i_2 = I_{max} \times \cos(\omega t - 120^\circ) \\ i_3 = I_{max} \times \cos(\omega t - 240^\circ) \end{cases} \dots\dots\dots(6.4)$$

Em cada eixo da respectiva bobina, cada corrente induz um campo (próprio) da forma:

$$\begin{cases} H_1 = K \times I_{max} \times \cos(\omega t) \\ H_2 = K \times I_{max} \times \cos(\omega t - 120^\circ) \\ H_3 = K \times I_{max} \times \cos(\omega t - 240^\circ) \end{cases} \dots\dots\dots(6.5)$$

Considerando um ponto P periférico interior do estator, deslocado em relação à origem de um ângulo  $\tau$ , a contribuição de cada campo nesse ponto será (projectção segundo o ‘eixo-  $\tau$ ’):

$$\begin{cases} H_{1,\tau} = K \times I_{max} \times \cos(\omega t) \times \cos(\tau) \\ H_{2,\tau} = K \times I_{max} \times \cos(\omega t - 120^\circ) \times \cos(\tau - 120^\circ) \\ H_{3,\tau} = K \times I_{max} \times \cos(\omega t - 240^\circ) \times \cos(\tau - 240^\circ) \end{cases} \dots\dots(6.6)$$

O campo total será:

$$H_g = H_{1,\tau} + H_{2,\tau} + H_{3,\tau} \dots\dots\dots(6.7)$$

$$H_g = K \times I_{max} [\cos(\omega t) \times \cos(\tau) + \cos(\omega t - 120^\circ) \times \cos(\tau - 120^\circ) + \cos(\omega t - 240^\circ) \times \cos(\tau - 240^\circ)]$$

$$H_g(t, \tau) = \frac{3}{2} \times (K \cdot I_{max}) \times \cos(\omega t - \tau) = \frac{3}{2} \times H_{1,2,3max} \times \cos(\omega t - \tau) \dots(6.8)$$

Concluimos:

- O valor máximo do Campo  $H_g$  tem um valor de 1.5 do valor máximo de cada bobina;
- $H_g$  deixa de ser campo pulsante (fixo no espaço) passando a ser um campo girante (variável no tempo e no espaço);
- O campo ‘gira’ a uma velocidade síncrona:

$$(\tau - \omega t) = C.te \rightarrow \frac{d}{dt}(\omega t - \tau) = \omega - \frac{d\tau}{dt} = 0 \rightarrow \frac{d\tau}{dt} = \omega \dots(6.9)$$

### 6.3 RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

Como dissemos, os enrolamentos de estator e do rotor estão ligados magneticamente entre si, o que se pode assemelhar a um transformador em que a ligação magnética pulsante é substituída por um campo girante que liga magneticamente o primário (estator) e o secundário (rotor).

É esta particularidade que distingue essencialmente a máquina assíncrona de um transformador.

Consequentemente, os conhecimentos adquiridos no estudo do transformador vai ser preponderante no estudo da máquina assíncrona, com as devidas adaptações electrotécnicas resultantes de o fluxo comum ao primário e ao secundário ser pulsante na máquina assíncrona e girante no transformador.

No transformador, a razão entre a tensão no primário  $V_1$  e a tensão no secundário  $V_2$  define a relação de transformação da máquina estática, que é ainda igual ao cociente entre o número de espiras respectivamente do primário e do secundário, e é geralmente representada por  $t$ . Na máquina assíncrona  $t$  é agora o cociente entre a tensão do estator (tensão primária  $V_1$ ) e a tensão do rotor (tensão secundária  $V_2$ ), no pressuposto da semelhança dos enrolamentos.

Contudo, em consequência da natureza não-estática (rotativa) da máquina assíncrona, para além da relação de transformação  $t$  entre as tensões do rotor e do estator, uma nova variável há que considerar, correspondendo à defasagem entre as referidas tensões. Enquanto que no transformador as tensões estão apenas em fase ou em oposição, nas máquinas assíncronas temos mais um “grau de liberdade”: a defasagem.

Todas as considerações anteriores têm por pressuposto que a máquina está a funcionar como um regulador de indução, isto é, o estator se encontra imobilizado (bloqueado).

Na máquina assíncrona podemos modificar facilmente o número de fases do secundário (estator) em relação às do primário (rotor), o que não se verifica no transformador, para o que bastará modificar o número de bobinas que constituem o enrolamento do rotor. Contudo o número de fases do estator será sempre igual ao das fases da rede de a que se encontra ligado.

Com base no que dissemos, a máquina assíncrona pode funcionar como ‘regulador de fase’ modificando a posição relativa do rotor em relação ao estator, mantendo-o depois imobilizado.

A frequência das f.e.ms. induzidas no rotor depende da velocidade do rotor em relação à velocidade do campo girante, onde devemos considerar duas situações:

a) Rotor a rodar no mesmo sentido do campo girante:.

$$f_r = k (\omega_s - \omega_r) \dots\dots\dots (6.10a)$$

b) Rotor a rodar no sentido contrário do campo girante:.

$$f_r = k (\omega_s + \omega_r) \dots\dots\dots (6.10b)$$

$f_r$  – frequência relativa das correntes induzidas

$\omega_s$  – velocidade angular do estator

$\omega_r$  - velocidade angular do rotor

$k$  – constante de proporcionalidade

#### **6.4 REGIMES DE FUNCIONAMENTO**

A grande utilização da máquina assíncrona é como motor e como gerador A utilização da máquina assíncrona como regulador de indução e como regulador de fase é bastante específica..

Na utilização como motor ou como gerador pressupõe a existência de um binário no rotor, resistente (carga) aquando do funcionamento como motor, impulsor (generativo) aquando do funcionamento como gerador.

Na utilização como motor o binário motor no rotor é originado pelas acções electrodinâmicas do campo girante (do estator) sobre as correntes induzidas nas espiras do rotor, pela variação do fluxo girante através destas, e que só existirão se os respectivos enrolamentos estiverem em circuito fechado.

Portanto, as duas condições necessárias para que exista um binário motor são:

- O fluxo através do rotor deve ser variável. Isto só é verificável quando a velocidade do rotor e a velocidade síncrona (velocidade do campo girante) forem diferentes;
- Os enrolamentos do rotor devem estar em circuito fechado, condição necessária para que a variação do campo girante induza correntes.

Verificando-se estas duas condições podemos explicar os fundamentos electromecânicos do funcionamento da máquina assíncrona.

Ligar a máquina corresponde a ligar o estator à rede. Então, surge um campo girante que roda com a velocidade angular  $\omega_s$ , que, como o rotor está imobilizado (arranque), é afinal a velocidade em relação ao rotor.

A variação do campo girante (cortando as espiras do rotor) induz correntes que dão origem ao aparecimento de forças electrodinâmicas (binário motor) que tendem a fazê-lo rodar no mesmo sentido (do campo girante).

O binário é consequência do ‘princípio de energia mínima’ que tende a opor-se (a velocidade tende a aumentar), à causa que lhe deu origem (variação do fluxo), o que só é possível rodando no mesmo sentido do fluxo, tendendo a ‘acompanhá-lo’.

A ‘energia mínima’ só seria conseguida quando o rotor rodasse com uma velocidade correspondente à velocidade síncrona, pois só nestas condições se consegue atingir um estado de equilíbrio. Contudo, a existência de perdas (atritos), nunca permitirá que o rotor atinja a velocidade síncrona, sendo a velocidade ligeiramente inferior.

Como motor, a máquina só pode funcionar entre  $N=0$  (arranque, rotor parado) e  $N=N_s$  (velocidade de sincronismo).

Contudo, como veremos mais adiante, ainda podemos considerar duas situações diferentes:

- A máquina assíncrona trabalha com uma velocidade de valor superior a  $N_s$ . Nestas condições a máquina passa a trabalhar como gerador.
- A máquina assíncrona trabalha com o rotor girando em sentido oposto ao campo girante (velocidade "negativa"). Neste caso a energia mecânica no veio transforma-se em energia eléctrica no rotor, que se adiciona à energia proveniente do estator. Nesta situação funcionará como gerador.

Na condição de funcionamento como gerador, se pudermos variar a corrente que percorre os enrolamentos do estator, variará a intensidade do campo girante, e como consequência o binário resistente que o rotor oferece à máquina de accionamento também variará. Temos assim o funcionamento da máquina assíncrona como travão.

No funcionamento como travão, podemos dispor, no estator de frequências superiores às frequências da rede pelo que a máquina assíncrona é designada por ‘conversor de frequência’.

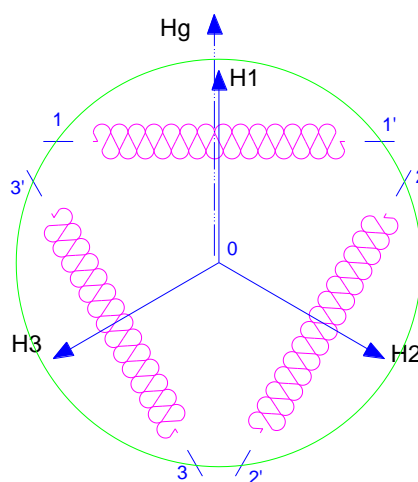
## 6.5 ANÁLISE DOS REGIMES DE FUNCIONAMENTO

### 6.5.1 OS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

Conforme já afirmámos, das máquinas polifásicas as de maior interesse são as trifásicas e são constituídas por três grupos de bobinas iguais, cada um deles ocupando 1/3 da periferia do estator e colocados simetricamente uns em relação aos outros, de modo a termos um campo girante quando o conjunto é alimentado por um sistema trifásico de tensões.

Com o recurso ao coeficiente de Kapp podemos reduzir o conjunto de bobinas que constituem cada uma das fases do enrolamento a uma única bobina.

Numa máquina assíncrona o enrolamento do estator é constituído por um conjunto de três bobinas iguais e simetricamente colocadas uma em relação às outras, alimentadas por um sistema trifásico, como se esquematiza na (**Fig.6.3**).



**Fig.-6.3 – Campos das Bobinas ( $H_1$ ;  $H_2$ ;  $H_3$ ) e Campo Girante ( $H_g$ )**

O campo total será:

$$H_g = H_{1,\tau} + H_{2,\tau} + H_{3,\tau} \dots\dots\dots(6.11)$$

e conforme já foi deduzido,

$$H_g = \frac{3}{2} \times (K \cdot I_{max}) \times \cos(\omega t - \tau) = \frac{3}{2} \times H_{1,2,3max} \times \cos(\omega t - \tau) \dots\dots(6.12)$$

No instante em que o campo da bobina for máximo, o campo girante coincide com o campo próprio das bobinas, e é máximo para esse eixo.

Portanto, por exemplo, no instante em que a corrente é máxima na fase-1 o campo girante é dirigido no sentido do campo próprio da bobina correspondente.

$$H_{g \max} = \frac{3}{2} \times H_{1,2,3 \max} \dots\dots\dots(6.13)$$

Num sistema trifásico verifica-se que a amplitude do campo girante é 3/2 da amplitude máxima do campo em cada uma das fases.

### 6.5.2 VELOCIDADE E SENTIDO DE ROTAÇÃO

Como vimos o campo girante é gerado no espaço por 3 correntes desfasadas de 120° entre si. A velocidade deste campo (velocidade de sincronismo) é tal que, se num dado instante coincidir com o campo próprio da bobina-1 ( $H_1$ ),  $1/3$  de período depois estará dirigido segundo  $H_2$  e  $2/3$  de período depois a sua direcção coincidirá com a de  $H_3$ .

O número de rotações do campo é igual à frequência da tensão aplicada ao estator, e portanto igual à frequência das correntes das bobinas. Como a frequência da rede é 50 Hz (Europa), o campo girante terá uma frequência de 50 Hz (sentido directo), pois como já vimos:

$$(\tau - \omega t) = C.t^e \rightarrow \frac{d}{dt}(\omega t - \tau) = \omega - \frac{d\tau}{dt} = 0 \rightarrow \frac{d\tau}{dt} = \omega \dots(6.14)$$

Em regra utiliza-se como unidade de velocidade rotativas ‘rotações por minuto’ (r.p.m) pelo que, para um motor bipolar (um par de polos por fase) teremos  $N=50 \text{ Hz} \times 60s=3.000 \text{ r.p.m}$ .

Põe-se agora a questão de se averiguar qual será o andamento. No instante em que as linhas de força do campo girante têm o valor máximo numa das fases (a corrente é máxima), os campos em relação a essas duas fases são dirigidos em sentido contrário., pois a corrente é negativa nas outras duas fases.

Considerando a corrente  $i_1$ , no instante em que é máxima, o campo girante na fase-1 será  $H_1$ , enquanto nas fases 2 e 3 terão sentidos contrários (e terá um valor de 50%).

Podemos concluir que o estator, magneticamente, funciona como se indica na **Fig.-6.15**, possuindo um polo norte e um pólo sul, rodando com a velocidade de sincronismo, para corresponder ao sentido do campo girante nas diversas *fases*.,

Como já foi referido, além da velocidade de 3.000 r.p.m., (velocidade de sincronismo) podem obter-se outras velocidades. Se dispusermos de  $p$  grupos de 3 bobinas iguais, e simetricamente, dispostos, obteremos uma velocidade que é  $p$  vezes menor que a anterior.

Atendendo a que o motor assíncrono não funciona à velocidade de sincronismo, é fundamental definir um parâmetro (variável) que represente o ‘ponto de funcionamento’ da máquina.

Seja  $\omega_g$  a frequência angular do campo girante e  $\omega_r$  a frequência angular de rotação do rotor, o escorregamento do rotor em relação ao campo girante é definido pela expressão:

$$s = \frac{\omega_g - \omega_r}{\omega_g} = 1 - \frac{\omega_r}{\omega_g} \dots\dots\dots (6.15)$$

Da expressão concluímos:

- Funcionamento em sincronismo:  $\omega_r = \omega_g, \implies s = 0$  ;
- Rotor estiver imobilizado (arranque):  $\omega_r = 0 \implies s = 1$

Concluímos, interessar que  $s$  tenha valores relativamente pequenos para que o rendimento seja o maior possível. Com efeito o rotor não roda com a velocidade de sincronismo, atrasando-se em relação ao campo girante, pelo facto de haver sempre uma certa dissipação de energia mecânica, cuja existência se verifica mesmo quando o rotor não fornece energia ao exterior devido às perdas de atrito nos apoios e no ar.

Com base na relação  $f = pN$ , e do que foi dito anteriormente sobre  $s$ , facilmente concluímos quais as velocidades possíveis de funcionamento do motor assíncrono como exemplificamos na **Tab.-05**.

Como foi dito, o processo de obtenção dessas velocidades depende do número de grupos de três bobinas que se montam no estator. Estes valores são ligeiramente inferiores devido ao escorregamento.

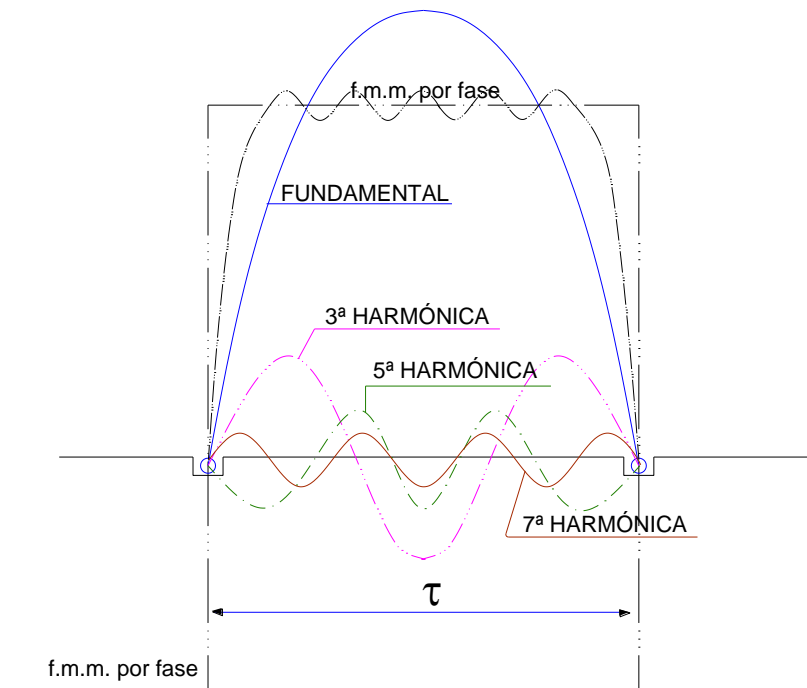
Para inverter o sentido de marcha do motor assíncrono basta trocar a ordem das fases, de modo a inverter-se o sentido do campo girante.

Concluímos que o sentido de rotação depende da ordem de sucessão das fases. Para o motor rodar em sentido contrário não temos mais do que trocar as ligações de duas fases mantendo a terceira.

### **6.5.3 FORÇA MAGNETOMOTRIZ E CAMPO GIRANTE**

A passagem da corrente no enrolamento do estator (bobinas) cria uma f.m.m. que origina o campo girante.

As bobinas correspondentes a cada uma das fases, com um passo espacial igual ao passo polar, quando atravessadas por uma corrente, geram a uma f.m.m. rectangular que, recorrendo à série de Fourier, pode ser decomposta num termo fundamental e numa série de harmónicas, em geral, de ordem 3 e 5 (**Fig.-6.4**).



**Fig.-6.4 – F.m.m do Campo Girante**

Verificamos que a sucessão de fases da 5ª harmônica é inversa da sucessão de fases do termo fundamental (**Fig-10**), sendo esta a sucessão de fases da harmônica de ordem 7.

Também nesta figura verificamos que a f.m.m., que não é sinusoidal, pode ser decomposta num termo fundamental e em diversas harmônicas. Então, temos um campo girante fundamental que roda num determinado sentido (dependendo da ordem de sucessão das fases), uma 5ª harmônica que roda em sentido contrário e uma 7ª harmônica que roda no mesmo sentido do termo fundamental. No campo girante a 3ª harmônica anula-se por compensação das harmônicas parciais das bobinas.

Nesta abordagem, e por simplificação, vamos desprezar as harmônicas considerando apenas o termo fundamental, o que corresponde a supor sinusoidal o campo girante no entreferro.

Nas máquinas assíncronas, a corrente em vazio tem carácter predominantemente reactivo. A componente activa é relativamente pequena e representa a potência necessária para compensar as perdas magnéticas (perdas no ferro).

Como já foi referido, o rotor roda em relação ao campo girante com uma velocidade:

$$\omega_s - \omega_r \dots\dots\dots (6.16)$$

em que  $\omega_s$  e  $\omega_r$  são respectivamente , as velocidades angulares do estator e do rotor.

Em funcionamento normal, o escorregamento é relativamente reduzido ( $\omega_s \approx \omega_r$ ) Consequentemente, no rotor a frequência de magnetização é muito pequena e, portanto, as perdas também o serão (quer as perdas por histerese, quer as perdas por correntes de Foucault). Portanto, as perdas magnéticas aparecem principalmente no estator onde a frequência de magnetização é 50 Hz., que atingem valores apreciáveis se o rotor estiver imobilizado.

Portanto, as perdas no rotor são insignificantes pelo que podemos considerar as existentes no estator como as únicas de valor apreciável.

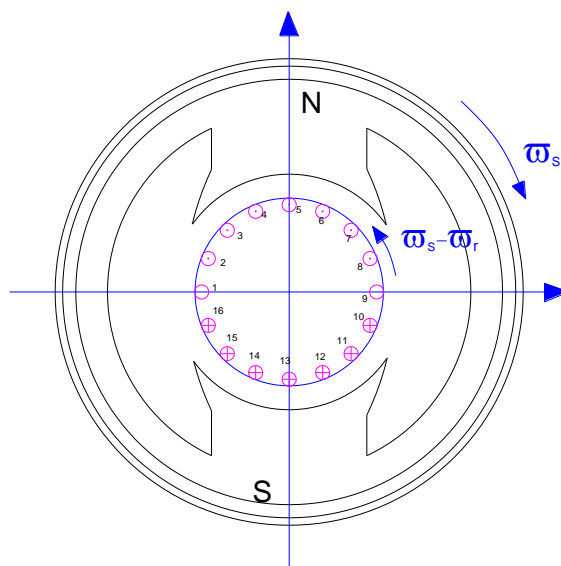
#### 6.5.4 NATUREZA DAS BOBINAS E BINÁRIOS

Já foi referido que os condutores que constituem o enrolamento do rotor são alojados em cavas na periferia do rotor, uniformemente distribuídas, e com passo polar  $\mathcal{T}$ .

Assim os condutores constituindo uma bobina estão afastados de um passo polar, tendo as bobinas disposição diametral.

Quando o estator estiver ligado à rede vamos ter um campo girante no entreferro que roda com a velocidade angular  $\omega_s$ .

Suponhamos  $\omega_r = 0$ , o que corresponde ao rotor imobilizado.

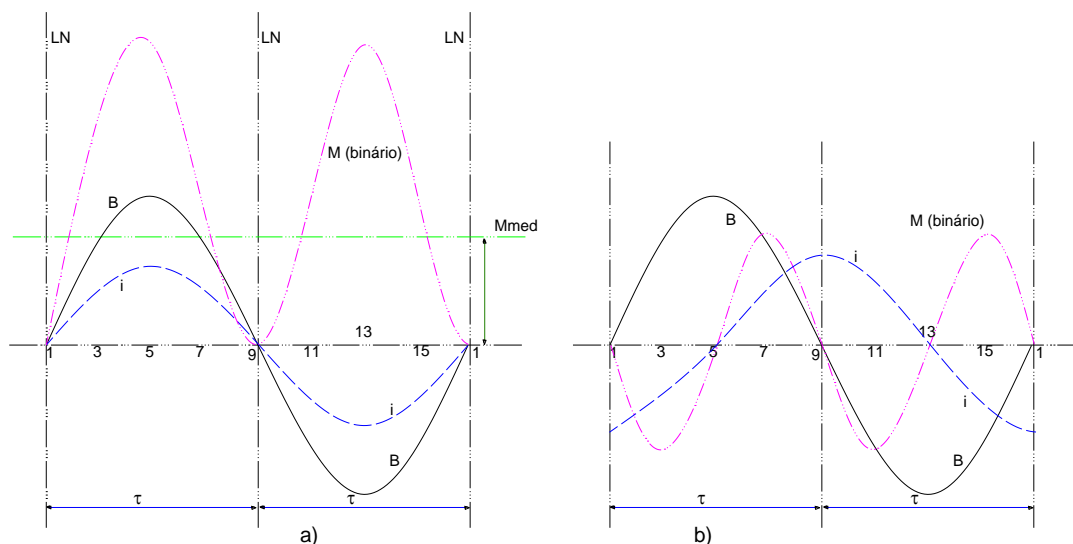


**Fig.-6.5 – Esquema constitutivo equivalente da máquina assíncrona.**

Atendendo ao fluxo girante gerado pela ligação do estator à rede, são induzidas f.e.m. em cada uma das bobinas. Deste modo os condutores próximo do 'polo-N' vão ser percorridos por uma corrente

com um determinado sentido, enquanto os condutores próximo do ‘polo-S’ são percorridos por uma corrente em sentido contrário.

Numa certa escala, podemos representar estas f.e.m. pelas correntes correspondentes como se indica na **Fig.-6.6a**:



**Fig.-6.6 – Corrente, f.e.m. e binário (correspondência)**

A f.e.m. induzida em cada um dos condutores é representada por esta curva, que é afinal a distribuição do campo no entreferro.

A f.e.m. induzida nas bobinas origina uma corrente dada por:

$$i = \frac{e}{R+jX} \dots\dots\dots (6.17)$$

Onde:

- $e = Blv$  ( $v=C^te$ ) é a f.e.m, induzida na bobina
- $R$  = resistência da bobina
- $X$  = reactância da bobina

**6.5.4.1 Bobinas Resistivas**

O conceito de Bobinas Resistivas corresponde à condição teórica de ( $R \neq 0$  ,  $X=0$ ).

Estas condições podem ser equiparadas à situação de um condutor cuja secção seja muito reduzida, e portanto de resistência com um valor relativamente elevado, possuindo a reactância um valor tão pequeno que se pode desprezar face ao valor dessa resistência.

Portanto vamos considerar o caso limite de ser  $X = 0$ , isto é, as bobinas serem puramente resistivas. As correntes estão portanto em fase com as f.e.ms. (**Fig.6.6a**).

Serão induzidas f.e.ms. que vão solicitar os condutores em sentidos concordantes, pois sob o **pólo-N** as correntes têm um determinado sentido e sob o **pólo-S** um sentido inverso.

Porém, as f.e.ms. são todas concordantes pois debaixo desses polos o campo girante tem também sentidos opostos. Por esse motivo, vamos ter um binário ( $M$ ) em cada um dos condutores, resultante das forças electrodinâmicas que sobre eles se exercem, sendo o binário total a soma dos diversos binários parciais.

Em cada um dos condutores gera-se um binário que é proporcional ao produto da intensidade da corrente pela intensidade do campo. Deste modo o binário resultante (curva  $M$ ) será dado pelo produto das ordenadas relativas às curvas  $B$  e  $i$  da **Fig.-6.6a**.

Como se pode concluir o binário varia de ponto para ponto da periferia do estator, variando de bobina para bobina. Contudo, ainda que com diferentes grandezas, os binários que correspondem aos diversos condutores da periferia do estator, têm sentidos concordantes, actuando no mesmo sentido de rotação.

A partir da curva do binário poderemos definir um binário médio que multiplicado pelo número de condutores seja igual ao binário total.

Concluimos que a existência de um valor médio do binário garante a existência de um binário de arranque quando o rotor está imobilizado.

Também podemos inferir que quanto maior for o número de condutores (cavas) mais uniforme será o binário. No caso limite de um número infinito de condutores, uniformemente distribuídos sobre toda a periferia do estator, o binário permanecerá constante.

#### **6.5.4.2 Bobinas Indutivas**

O conceito de Bobinas Indutivas corresponde à condição teórica de ( $X \neq 0$ ,  $R=0$ ).

Esta situação poderá assemelhar-se a bobinas constituídas por condutores de secção considerável ( $R \ll$ ) e com elevado número de espiras ( $L \gg$ ). Nestas condições consideraremos que a resistência das bobinas tem um valor nulo, e portanto, as bobinas são indutivas puras.

Agora, a corrente  $i$  vai estar em atraso de  $90^\circ$  em relação à respectiva tensão, pelo que a curva respectiva será a indicada a traço interrompido na **Fig.6.6b**.

Considerando o produto das duas curvas referidas (**B** e **i**) obteremos a curva do binário (**M**) na mesma figura. Como se verifica, o binário médio é nulo pois há compensação entre as alternâncias positivas e negativas.

Sendo o binário médio nulo, concluímos que o binário de arranque nulo.

Conforme já dissemos, os casos considerados anteriormente (um dos parâmetros nulo) são teóricos, não são mais do que casos limites que não se verificam na prática.

Na realidade a resistência e a reactância das bobinas possuem sempre valores não nulos. Assim a designação de bobinas resistivas ou indutivas depende da relação de valores entre estes parâmetros.

Consequentemente existirá sempre um **cosφ** diferente de 1 ou de 0, pelo que teremos sempre uma componente activa e uma componente reactiva da corrente, que podemos obter por decomposição desta.

Conforme já referimos, a componente reactiva dá origem a um binário médio nulo, pelo que podemos considerar que a existência de um binário se deve à componente activa e deverá ser proporcional à componente activa da corrente.

Podemos escrever,

$$M_a = C^{te} \cdot I_r \cdot \cos\varphi_r \dots\dots\dots (6.18)$$

Onde:

- $M_a$  - binário de arranque;
- $I_r$  - intensidade da corrente que atravessa o rotor;
- $\varphi_r$  - defasagem da corrente no rotor.

No binário, a corrente  $I_r$  e o  $\cos\varphi_r$  influem no binário em sentidos contrários. De facto à medida que a resistência do rotor aumenta cresce o valor de  $\cos\varphi_r$  e a sua impedância aumenta também. Consequentemente a corrente  $I$  diminui.

Portanto:

- Se  $R_r=0$  então  $\cos\varphi_r=0$  e a corrente é puramente reactiva, pelo que será nulo o binário de arranque resultante de todas as bobinas que constituem o rotor.
- Se  $R_r = \infty$ , o binário de arranque é igualmente nulo, pois  $I_r=0$ .

Consequentemente, o binário será nulo de início, (**R=0**) e aumenta quando a resistência aumenta, passa por um máximo, começando depois a diminuir de intensidade, tendendo para zero, pois anula-se para **R =∞**.

Estas conclusões também podem ser obtidas através da expressão do binário que vamos deduzir.

Com efeito, com base na expressão (6.17) a equação do Binário pode ser escrita sob outra forma:

$$M_a = C^{te} \cdot I_r \cdot \cos\varphi_r \dots\dots\dots (6.19)$$

$$M_a = C^{te} \cdot \frac{E}{\sqrt{R_r^2 + X_r^2}} \cdot \frac{R_r}{\sqrt{R_r^2 + X_r^2}} \dots\dots\dots (6.20)$$

sendo  $R_r$  e  $X_r$ , respectivamente, a resistência e a reactância do rotor.

Como a tensão aos terminais é relativamente constante, a *f.e.m.*  $E$  será sensivelmente constante, o mesmo se verificando com a reactância do rotor, pois a frequência do rotor é igual à frequência do estator, e esta é igual à da rede que é constante.

O valor de  $M_a$  máximo, em função do valor de  $R_r$ , é determinado através do ‘cálculo do zero’ da derivada  $dM/dR_r$ .

Concluimos que o binário de arranque é máximo quando  $R_r=X_r$ , a que corresponde  $\cos\varphi_r=0,7$ .

### 6.5.5 ESCORREGAMENTO

Consideremos o esquema fictício da *Fig.-6.5* que representa o rotor em movimento.

Considerando  $\omega_s$  a velocidade angular do estator e  $\omega_r$  a velocidade angular do rotor, tudo se passa como se o rotor rodasse em relação ao estator com uma velocidade  $(\omega_s - \omega_r)$ , independentemente da referencia rotor ou estator.

A velocidade do rotor em relação à do estator exprime-se não em valor absoluto mas sim em valor relativo, isto é:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{N_s - N_r}{N_s} \dots\dots\dots (6.21)$$

onde  $N_s$  e  $N_r$  são o número de rotações na unidade de tempo, respectivamente, do campo girante (velocidade de sincronismo) e do rotor, da máquina assíncrona. Em percentagem teremos:

$$s\% = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \cdot 100\% = \frac{N_s - N_r}{N_s} \cdot 100\% \dots\dots\dots (6.22)$$

Através das expressões anteriores podemos obter o significado de  $s$ .

$s$  significa que a velocidade do rotor se atrasa (escorrega) em relação ao campo girante da máquina.

Consultando valores dos fabricantes verificamos que em vazio o escorregamento é da ordem de 0,5%, normalmente nunca atingindo 1%.

A plena carga o escorregamento depende da potência da máquina. Num motor de potência reduzida e de construção menos cuidada  $s=5\%$  a  $7\%$ . Para potências muito elevadas o escorregamento, tem o valor de  $3\%$  a  $5\%$  para motores de construção normal; para um motores de melhor qualidade (mais eficientes)  $s=2\%$  a  $3\%$ .

Com base na expressão do escorregamento podemos construir a **Tabela-6.1**, sendo:

$$N_r = N_s(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s) = \frac{3000}{p}(1 - s) \dots\dots\dots (6.23)$$

Em que:

$f$  - frequência no estator (50Hz)

$p$  - número de pares de polos equivalentes ou grupos de três bobinas.

Verifica-se, com base na **Tabela-6.1** que o motor assíncrono é um motor de velocidade praticamente constante mesmo a plena "carga".

Pares de Pólos	N <sub>s</sub> (r.p.m.)	Vazio		Plena carga	
		S (%)	N <sub>r</sub> (r.p.m.)	S (%)	N <sub>r</sub> (r.p.m.)
1	3.000	0.6	2.982	2	2940
				4	2880
				6	2820
2	1.500	0.5	1.492	2	1470
				4	1440
				6	1410
3	1.000	0.4	996	2	980
				4	960
				6	940
4	750	0,4	747	2	748
				4	747
				6	746

**Tabela-6.1 – Velocidade em função dos pares de pólos da máquina assíncrona**

De acordo com a definição, a relação entre a frequência no rotor e a frequência no estator é dada por:

$$f_r = s f_s \dots\dots\dots (6.24)$$

Com a máquina parada  $s=1$  e a frequência no rotor é igual à frequência no estator. À medida que o escorregamento diminui a frequência no rotor diminui também, e quando a máquina atingir a velocidade de sincronismo ( $s=0$ ), a frequência no rotor é nula.

Em pleno funcionamento, a frequência no rotor tem valores, em geral, relativamente pequenos, coincidindo estes com as respectivas frequências de magnetização. Por esse motivo, no rotor, são muito baixas as perdas magnéticas, quer as correntes de Foucault quer as de histerese.

O mesmo não se pode dizer em relação ao circuito do estator, onde a frequência da magnetização (igual à da rede) é de 50 Hz, pelo que as respectivas perdas magnéticas são apreciáveis.

Deste modo, podemos concluir que as perdas magnéticas do motor assíncrono são quase exclusivamente provenientes do circuito magnético do estator.

Como a pulsação no rotor depende do escorregamento, a reactância do rotor também vai igualmente depender de  $s$ , de acordo com a expressão (coeficiente de auto-indução do rotor constante):

$$X_{r,s} = s X_r \dots\dots\dots (6.25)$$

Onde:

$X_{r,s}$  - reactância do rotor para um dado  $s$  ;

$X_r$  = reactância do rotor para a máquina parada.

A f.e.m. induzida no rotor depende igualmente de  $s$ :

$$E_{r,s} = s E_r \dots\dots\dots (6.26)$$

onde:

$E_{r,s}$  - f.e.m. do rotor para um dado  $s$ ;

$E_r$  – f.e.m. do rotor para a máquina parada.

Ao variar a velocidade do rotor (frequência), vai variar o fluxo que atravessa o rotor, o que dá origem à alteração da f.e.m. Então, quando o escorregamento tiver um valor  $S$ , o rotor é atravessado por uma corrente cuja intensidade é  $I_{r,s}$  dada por:

$$I_{r,s} = \frac{E_{r,s}}{Z_{r,s}} = \frac{sE_r}{R_r + jsX_r} \dots\dots\dots (6.27)$$

Temos considerado que as grandezas afectadas do índice ( $r,s$ ) referem-se ao rotor, quando a máquina está em movimento e com um escorregamento  $s$ , e as grandezas afectadas do índice  $r$  referem-se ao rotor quando a máquina está parada.

Como o efeito pelicular não se modifica apreciavelmente para as variações normais do escorregamento, a resistência  $R_r$  é praticamente independente de  $s$ , e portanto podemos escrever

$$I_{r,s} = \frac{E_r}{\frac{R_r}{s} + jX_r} \dots\dots\dots (6.28)$$

Na expressão (6.28) não tem qualquer significado físico para o regime de funcionamento considerado visto que a resistência  $R_r$  aparece na dependência de  $s$ , o que não corresponde à realidade. É uma relação puramente matemática que permite a obtenção de um valor para a corrente  $I$ , idêntico ao que a equação (6.27) possibilita.

Contudo a expressão (6.28) tem o mérito de mostrar como a intensidade de corrente no rotor varia com o escorregamento.

Em concordância como o que, por outras vias, já tínhamos concluído, para  $s=0$  a corrente é nula também. À medida que  $S$  aumenta a corrente aumenta também, atingindo um valor máximo quando  $s = 1$ . Concluimos que a intensidade de corrente diminui à medida que o motor acelera.

Com base na definição, o **Factor de Potência** no rotor é dado pelo cociente entre as respectivas resistência e impedância,

$$\cos\varphi_{r,s} = \frac{R_r}{R_r + jX_{r,s}} \dots\dots\dots (6.29)$$

Na velocidade síncrona o factor de potência é igual à unidade e à medida que o escorregamento aumenta  $\cos\varphi_{r,s}$  diminui, sendo mínimo quando  $s=1$ .

Portanto, podemos concluir:

- $\cos\varphi$  é mínimo no arranque e é máximo para a velocidade de sincronismo,
- A corrente no rotor é máxima no arranque e mínima para a velocidade de sincronismo.

#### 6.5.6 CONDIÇÕES DE ARRANQUE

Há conveniência em que no arranque a resistência no rotor seja elevada porque esse facto tem a dupla vantagem de simultaneamente diminuir a intensidade de corrente e melhorar o factor de potência, isto é, melhorar o binário de arranque.

Atendendo a que a intensidade de corrente no arranque é máxima, convém limitar o seu valor. Contudo isso resulta no inconveniente da diminuição do binário de arranque. Para contrabalançar este inconveniente, há necessidade de se melhorar o  $\cos\varphi$ . Isso consegue-se aumentando a resistência do rotor, devidamente dimensionada, de modo que evitando no arranque sobreintensidades muito elevadas, tendo o binário de arranque os valores mais convenientes.

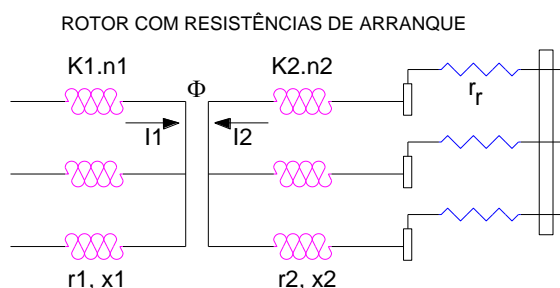
Quando o motor acelera a corrente no rotor diminui de intensidade, e à medida que tal se verifica vai melhorando o factor da potência, pelo que podemos diminuir a resistência do rotor sem que o binário

seja prejudicado. Portanto, nestas condições, a intensidade de corrente não tem valores elevados e o  $\cos\phi$  é relativamente pequeno.

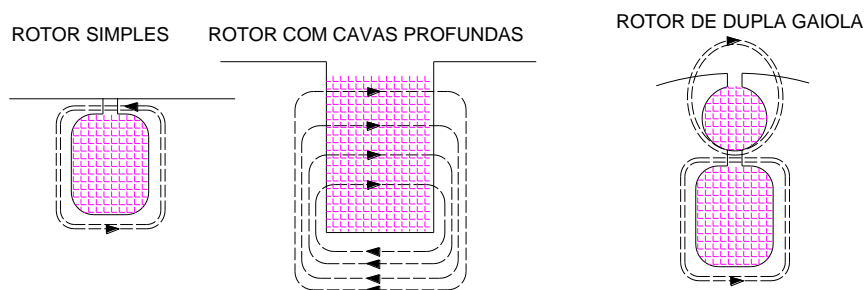
Para dar uma resposta adequada a este problema fabricam-se vários tipos de rotor que sucintamente podemos agrupar:

- Rotor de gaiola simples de resistência variável (**Fig.-6.7**): Os terminais das bobinas são acessíveis exteriormente e ligados a resistências possibilitando variar os respectivos valores. Para o regime de funcionamento normal a resistência verá ter valor mínimo e para o arranque deverá ter valor máxima;
- Rotor de gaiola simples (**Fig.-6.8a**);
- Rotor de cavas profundas (**Fig.-6.8b**);
- Rotor de dupla gaiola (**Fig.-6.8c**).

Nestas duas modalidades (cavas profundas e dupla gaiola) a distribuição das correntes no arranque (baixa velocidade) e em regime normal (velocidade nominal) varia do exterior para o interior obtendo-se assim o mesmo efeito de variação de resistência das bobinas.



**Fig.-6.7 – Rotor bobinado (resistências variáveis)**



**Fig.-6.8 (a,b,c) – Tipos de rotores relativamente às cavas**

## 6.6 O GERADOR ASSÍNCRONO

Com base no estudo pormenorizado da máquina assíncrona vamos tirar conclusões sobre o respectivo funcionamento como gerador, utilizando uma análise vectorial.

Se a carga de um motor assíncrono diminuir, o escorregamento diminuirá, assim como a tensão induzida no circuito do rotor, com a conseqüente diminuição da corrente do rotor  $I_2$ . A corrente de linha  $I_1$  resultante também diminuirá, tomando o valor mínimo quando a carga no eixo do motor for igual a zero. Nesta situação  $I_1$  terá um valor muito próximo a  $I_0$ .

Se, com ajuda de uma máquina acoplada ao eixo, aumentarmos a velocidade do rotor, na velocidade síncrona a potência necessária a suprir as perdas por ventilação e atrito será fornecida por esta máquina primária, e a máquina assíncrona absorverá apenas energia reactiva para a sua magnetização, isto é,  $I_1$  será igual a  $I_0$ . Aumentando a velocidade da máquina primária o rotor atingirá uma velocidade superior à síncrona; com velocidade supersíncrona, isto é, com o escorregamento negativo, a máquina passa a funcionar como gerador assíncrono.

No gerador assíncrono, o sentido relativo do movimento do enrolamento do rotor se inverte em relação ao campo girante; as barras do rotor cortam o fluxo do campo girante em sentido contrário e como conseqüência, as correntes de rotor são invertidas em relação ao sentido que tinham quando funcionava como motor. O binário que era motor agora é um binário resistente. As correntes do rotor geram no estator uma corrente que, quando fasorialmente decomposta apresenta a componente referente à potência activa desfasada de  $180^\circ$  em relação à operação da máquina como motor. A máquina assíncrona passa a funcionar então como gerador assíncrono.

## 6.7 DIAGRAMA VECTORIAL E ESQUEMA EQUIVALENTE

Consideremos que dispomos de um motor de rotor bobinado e que permite a ligação ao circuito do rotor de algumas impedâncias adicionais. Variando convenientemente as impedâncias adicionais. Consegue-se assim variar, no rotor, a resistência e a reactância (e portanto a impedância) obtendo-se os valores que se pretender, (*Fig.-6.7*) e assim o regime de funcionamento que nos interessa.

Podemos então construir um motor que tenha no rotor uma impedância igual à impedância de curto-circuito, e tendo em conta todas estas possibilidades, no que diz respeito à variação da resistência do rotor, vamos considerar o motor de rotor bobinado.

Consideremos que o motor é trifásico e que o estator e o rotor estão ligados em **Y**. As conclusões a que se chega com este tipo de ligação, são válidas quando aqueles enrolamentos estão ligados em  $\Delta$ .

Designando por  $K_1$  e  $n_1$  respectivamente o coeficiente de Kapp e o número de espiras do estator, sejam respectivamente  $K_2$  e  $n_2$  os valores das mesmas grandezas no rotor. Podemos ainda considerar  $r_1$  e  $r_2$  como sendo, respectivamente, a resistência do estator e do rotor e  $x_1$  e  $x_2$  como as impedâncias respectivas [20], [21], [23].

Se o rotor estiver imobilizado as f.e.ms. induzidas pelo estator no rotor (pelo fluxo girante  $\Phi$  comum) estão entre si na razão directa da relação de transformação  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{E_1}{E_2} = \frac{K_1 n_1}{K_2 n_2} \dots\dots\dots (6.30)$$

Os parâmetros  $K_1$  e  $K_2$  permitem reduzir um enrolamento de várias bobinas dispostas de uma maneira qualquer, numa única bobina que lhe seja equivalente.

Tendo em conta (6.21) podemos escrever

$$E_1 = \lambda E_2 = E'_2 \dots\dots\dots (6.31)$$

em que  $E'_2$  é a *f.e.m.* do rotor reduzida ao estator.

Se for  $s$  o escorregamento do rotor a f.e.m. nele induzida será  $s$  vezes a f.e.m. induzida no rotor, no caso de este estar parado, isto é,

$$\lambda = \frac{E_1}{E_{2,s}} = \frac{K_1 n_1}{s K_2 n_2} \dots\dots\dots (6.32)$$

e portanto

$$E'_2 = s E_1 \dots\dots\dots (6.33)$$

Consideremos o *Diagrama-02*, que diz respeito ao **Diagrama de Funcionamento** do motor. Representemos pelo vector  $\phi$  o fluxo comum ao estator e ao rotor; a f.e.m. induzida no rotor está em quadratura e atraso em relação ao fluxo, cuja grandeza é igual à f.e.m. do secundário reduzida ao primário quando o rotor estiver imobilizado.

Quando o motor estiver a rodar com um escorregamento  $s$  a f.e.m. passa a ser  $s.E_1$ , que vai diminuindo com o escorregamento, embora se mantenha sempre em fase com  $E_1$ .

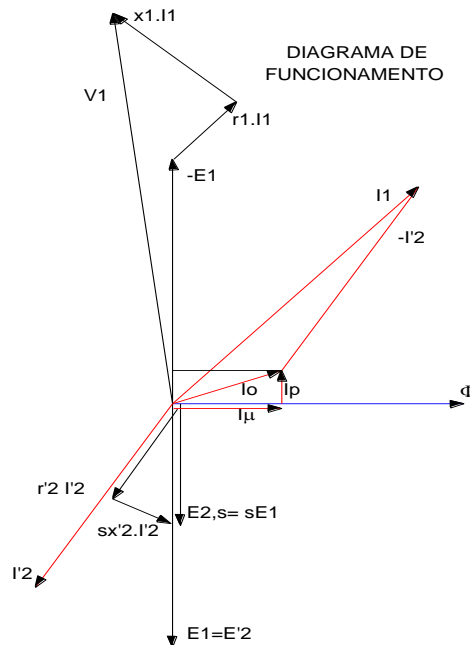
A *f.e.m.* induzida anula-se quando a velocidade do rotor coincide com a velocidade de sincronismo ( $s=0$ ).

As f.e.ms., do estator têm uma frequência sensivelmente constante e igual à frequência da rede, enquanto a frequência das do rotor é  $s$  vezes a frequência do estator. Desta maneira podemos concluir que a frequência das f.e.ms. induzidas no rotor não se mantém constantes, pois são função do escorregamento.

Todavia estas frequências mantêm-se invariáveis em relação ao campo girante  $\Phi$ , pois as f.e.ms., rodam sempre com a mesma velocidade em relação àquele campo.

Consideremos  $I'_2$  como a corrente que percorre o rotor reduzida ao estator:

$$I'_2 = I_2 / \lambda \dots\dots\dots(6.34)$$



**Diagrama – 6.1 - Diagrama vectorial da máquina assíncrona**

No **Diagrama-6.1** traçaram-se os vectores,  $r'_2 I'_2$  (em fase com  $I'_2$ ) e  $s x'_2 I'_2$  (em quadratura em relação a  $I'_2$ ) tal que:

$r'_2$  - resistência do rotor reduzida ao estator quando  $S=1$  (rotor estiver imobilizado);

$x'_2$  - reactância do rotor reduzida ao estator quando  $S=1$  (rotor estiver imobilizado),

onde:

$$r'_2 = \lambda^2 r_2 \dots\dots\dots(6.35)$$

$$x'_2 = \lambda^2 x_2 \dots\dots\dots(6.36)$$

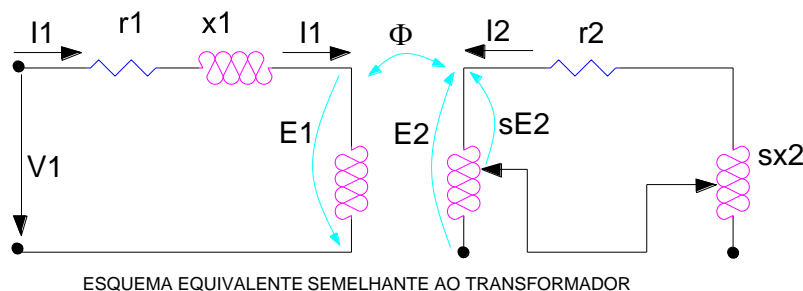
Para produzir o fluxo  $\Phi$  é necessário uma corrente  $I_o$  com as suas componentes:

$I_\mu$ - corrente magnetizante que induz a f.e.m. necessária para criar um certo fluxo  $\Phi$

$I_p$ - componente activa, que é responsável pelas perdas de magnetização,

A corrente no estator (primário) será a corrente  $I_1$ , soma vectorial de  $I_0$  com  $(-I_2')$ . Tendo em consideração estas condições podemos concluir que a tensão aos terminais do estator será  $V_1$ .

O esquema equivalente do motor assíncrono deduz-se do respectivo diagrama de funcionamento, semelhante ao do transformador (**Fig -6.9**).



**Fig. – 6.9**

O estator, com uma resistência  $r_1$  e uma reactância de dispersão  $x_1$ , está magneticamente ligado ao rotor onde se induz uma f.e.m.  $sE_2$ , sendo  $E_2$  a f.e.m. no caso de o rotor estar parado.

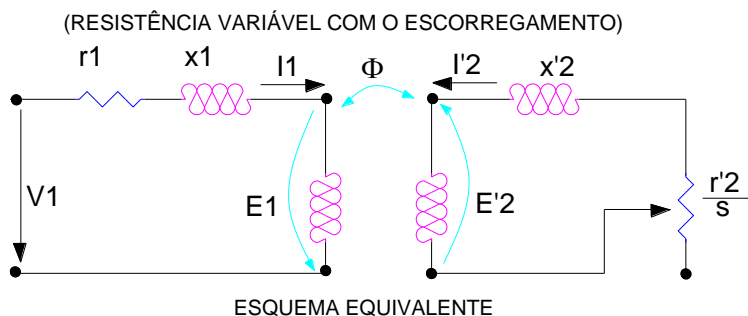
No rotor temos uma resistência  $r_2$  e uma reactância  $sx_2$  sendo  $x_2$  a reactância de dispersão quando o rotor está imobilizado.

A f.e.m. diminui (aumenta) à medida que o escorregamento diminui (aumenta) e, portanto, tudo se passa como se tivéssemos um cursor  $C$ , cuja posição depende de  $s$ .

No rotor temos a corrente (supondo constantes  $E_2$  e  $x_2$ ):

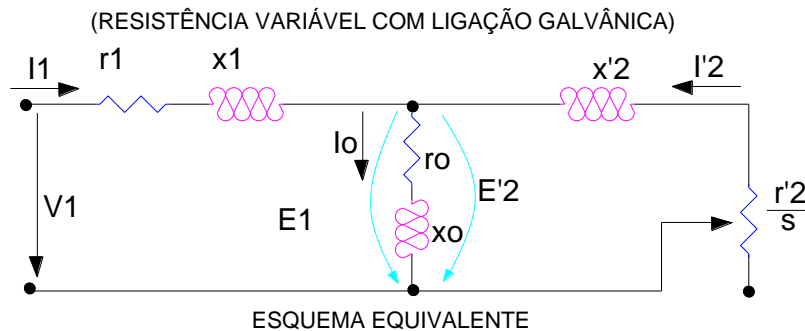
$$I_r = \frac{sE_2}{r_2 + jsx_2} \rightarrow I_r = \frac{E_2}{\frac{r_2}{s} + jx_2} \dots\dots\dots (6.37)$$

Temos portanto no rotor uma resistência variável com o escorregamento, pelo que o esquema equivalente pode ser apresentado como na **Fig.-6.10**. Em ambos os esquemas a corrente no rotor  $I_1$  tem o mesmo valor, pelo que se podem considerar equivalentes.



**Fig. – 6.10**

Temos de reduzir as *f.e.m.* do secundário às grandezas do primário, de modo que  $E_1$  e  $E'_2$  sejam iguais, permitindo suprimir a ligação magnética entre o estator e o rotor, passando a ter uma ligação galvânica. Na **Fig.-6.11**,  $I_o$  é a corrente de excitação necessária para a produção de  $\Phi$ .



**Fig. - 6.11**

Qual o significado físico de  $r'_2/s$  ?

Considerando  $r'_2/s$  como uma resistência fictícia, a energia dissipada nesta é:

$$\frac{r'_2}{s} I_2'^2 = \frac{r_2}{s} I_2'^2 \dots\dots\dots (6.38)$$

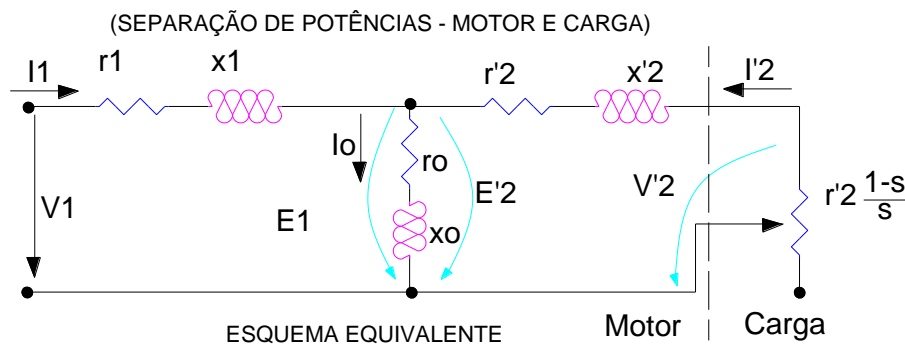
que é afinal uma fracção da potência dissipada por efeito Joule na resistência do rotor  $r'_2$  quando esta é atravessada pela corrente  $I'_2$ .

Esta potência, que é transmitida do estator ao rotor, divide-se em dois termos:

- perdas por efeito Joule no rotor:  $r'_2 I_2'^2 \dots\dots\dots (6.39)$
- potência mecânica do motor:  $r'_2 \frac{1-s}{s} I_2'^2 \dots\dots\dots (6.40)$

$$\frac{r'_2}{s} I_2'^2 = r'_2 I_2'^2 + r'_2 \frac{1-s}{s} I_2'^2 \dots\dots\dots (6.41)$$

No esquema da **Fig.-6.12** explicitamos estes parâmetros:



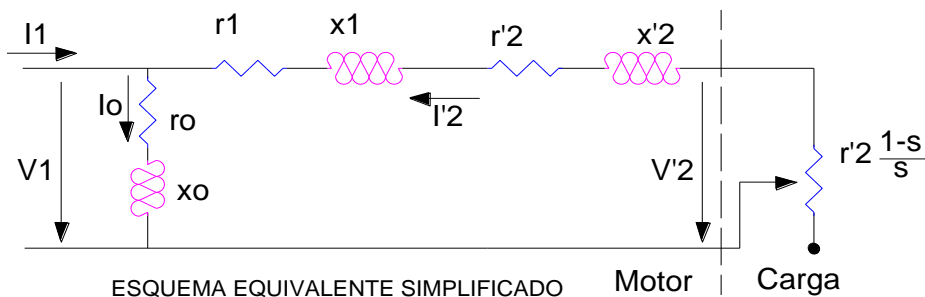
**Fig.-6.12**

Temos portando no estator as quedas de tensão na resistência  $r_1$  e na reactância  $x_1$  e no rotor as que se verificam em  $r'_2$  e  $x'_2$ , acrescidas da queda de tensão na resistência fictícia:

$$\left( r'_2 \frac{1-s}{s} \right) = \frac{r'_2}{s} - r'_2 \dots\dots\dots(6.42)$$

que traduz a potência mecânica transmitida ao veio do motor (circuito de carga).

Por simplicidade vamos considerar um esquema tal como se indica na **Fig.6.13** , em que o circuito de excitação é transportado para os terminais do motor. É o esquema equivalente simplificado.



**Fig -6.13**

A existência de um entreferro na máquina assíncrona dá origem a uma queda de tensão na impedância do estator, o que não acontece no transformador.

Em virtude da corrente  $I_o$  no transformador ser muito pequena (da ordem de 1 a 5% da corrente nominal), era admissível deslocar o circuito de excitação para a posição indicada na **Fig.-6.13**.

Porém, devido à existência de um entreferro na máquina assíncrona, , estes valores são da ordem de 20% a 76% da corrente nominal. Consequentemente, as intensidades das correntes vêm falseadas pelo que as potências são afectadas de um erro de aproximadamente 100%, o que não é lícito.

Isto requer uma correcção de modo a poder-se obter uma aproximação suficiente [23].

Para tal, os parâmetros  $r_1$ ,  $x_1$ ,  $x'_2$  e  $r'_2$  deverão ser substituídos por  $R_1$ ,  $X_1$ ,  $X'_2$  e  $R'_2$  , em que:

- $R_1 = \partial r_1$  .....(6.43a)
- $R'_2 = \partial^2 r'_2$  .....(6.43b)
- $X_1 = \partial x_1$  .....(6.43c)
- $X'_2 = \partial^2 x'_2$  .....(6.43d)

Verifica-se também que:

- $R_o = r_o + r_1$  .....(6.44a)
- $X_o = x_o + x_1$  .....(6.44b)

O valor do coeficiente  $\sigma$  é determinado pela expressão (6.36) :

$$\partial = 1 + \frac{z_1}{z_o} \dots \dots \dots (6.45)$$

sendo  $z_1$  a impedância do estator e  $z_o$  a impedância do circuito de excitação.

Como as resistências são muito pequenas em face das reactâncias, a expressão (6.36) pode escrever-se sob a forma

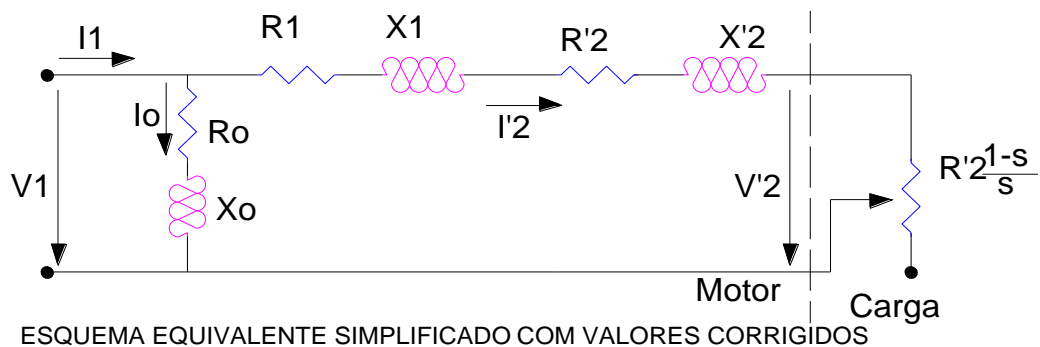
$$\partial = 1 + \frac{X_1}{X_o} = 1 + \frac{\phi_{1d}}{\phi_o} \dots \dots \dots (6.46)$$

Sendo:

- $\phi_{1d}$  o fluxo de dispersão do estator;
- $\phi$  o fluxo comum ao estator e ao rotor;
- $\sigma$  toma normalmente os valores entre 1,04 e 1,08.

Para a generalidade dos casos, a corrente  $I'_2$  que circula no rotor, conduz à determinação de potências, binários e do diagrama de funcionamento, com uma aproximação suficiente .

Portanto, passamos a adoptar o esquema (**Fig.-6.14**) em que  $R_l$ ,  $X_l$ ,  $R'_2$  e  $X'_2$  são valores fictícios, função do coeficiente  $s$  como mostram as expressões (6.34).



**Fig.-6.14**

Portanto, as considerações feitas como base nas expressões (6.30), (6.31) e (6.32) mantêm-se, agora de acordo com as novas expressões:

- potência de perdas por efeito Joule :

$$R_2 I_2'^2 \dots \dots \dots (6.47)$$

- potência mecânica :

$$R'_2 \frac{1-s}{s} I_2'^2 \dots \dots \dots (6.48)$$

pelo que:

$$\frac{R_2'}{s} I_2''^2 = R_2' I_2''^2 + R_2' \frac{1-s}{s} I_2''^2 \dots\dots\dots(6.49)$$

Em que o primeiro membro representa a potência cedida pelo estator ao rotor  $P_{s \rightarrow r}$

Então:

$$P_j = R_2' I_2''^2 = s P_{s \rightarrow r} \dots\dots\dots(6.50)$$

$$P_{mec} = (1 - s) P_{s \rightarrow r} \dots\dots\dots(6.51)$$

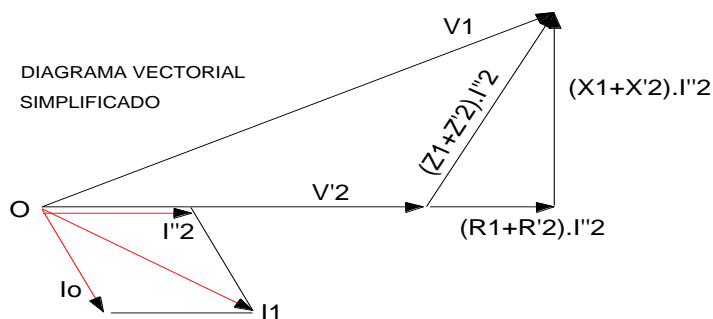
Como se observa, parte da potência transmitida do estator ao rotor dissipa-se em perdas por efeito Joule e a outra transforma-se em potência mecânica, como se pode concluir das expressões (6.42) e (6.43). Consequentemente, interessa trabalhar com escorregamentos pequenos pois menores serão as perdas por efeito Joule e mais eficiente será a transformação da energia eléctrica absorvida à rede pelo estator, em energia mecânica no veio da máquina, o que se traduz por um aumento de rendimento.

Consideremos agora a **Fig.-6.14**. Com base neste esquema equivalente simplificado e corrigido vamos construir o respectivo Diagrama Vectorial.

Seja  $I_2''$  a corrente no rotor reduzida ao estator que se marca a partir do ponto O (**Diagrama-6.2**). Com a mesma origem traça-se em seguida o vector  $V_2'$  que é a queda de tensão na resistência fictícia já considerada, isto é:

$$V_2' = R_2 \frac{1-s}{s} I_2'' \dots\dots\dots(6.52)$$

que está em fase com  $I_2''$  já que se trata de uma queda óhmica.



**Diagrama-6.2**

Onde:

- O vector  $(R_1+R_2') I_2''$  representa as quedas de tensão na resistência equivalente do motor;

- O vector  $(X_1 + X'_2) I''_2$  a representa queda de tensão na sua reactância equivalente do motor;
- A corrente total  $I_1$  será a soma vectorial de  $I_o$  com  $I''_2$ .
- $(Z_1 + Z'_2) I''_2$  representa a queda de tensão total na impedância do estator e do rotor reduzida ao estator, onde

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad e \quad Z'_2 = R_2 + jX'_2 \quad \dots\dots\dots(6.53)$$

O *Diagrama-6.2* é o diagrama vectorial simplificado da máquina assíncrona.

### 6.8 REGIMES DE FUNCIONAMENTO

Como deduzimos, as expressões que permitem a obtenção das potências em cada fase são:

$$P_j = R'_2 I''_2{}^2 \quad \dots\dots\dots(6.54)$$

$$P_{mec} = R'_2 \frac{1-s}{s} I''_2{}^2 = V'_2 I''_2 \quad \dots\dots\dots(6.55)$$

A soma destas duas potencias representa a potência por fase que o estator transmite ao rotor  $P_{s \rightarrow r}$ , e é dissipada no rotor, isto é,

$$P_{s \rightarrow r} = R'_2 \frac{1}{s} I''_2{}^2 \quad \dots\dots\dots(6.56)$$

que é uma função de  $s$ .

A potência total (3 fases) será:

$$P_{s \rightarrow r} = 3 \times R'_2 \frac{1}{s} I''_2{}^2 \quad \dots\dots\dots(6.57)$$

Contudo, temos de ter em atenção que a expressão (6.47) dá o valor da potência mecânica total e não a potência útil, pois há que ter em conta as perdas mecânicas da máquina.

Não é desejável exprimir as potências em função da corrente  $I''_2$ , como temos vindo a indicar. É mais conveniente em função da tensão.

Com base no esquema equivalente da *Fig.-6.14* deduzimos as seguintes relações entre  $I''_2$  e  $V_1$ :

$$I''_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_2 \frac{1-s}{s})^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad \dots\dots\dots(6.58)$$

$$I''_2 = \frac{s V_1}{\sqrt{(sR_1 + R'_2)^2 + s^2 (X_1 + X'_2)^2}} \quad \dots\dots\dots(6.59)$$

Substituindo  $I''_2$  por  $V_I$  na expressão (6.47) obtemos o binário mecânico total em função de  $V_I$ :

$$P_{mec} = \frac{3 R'_2 V_1^2}{(sR_1 + R'_2)^2 + s^2(X_1 + X'_2)^2} \times s(1 - s) \dots\dots\dots(6.60)$$

Podemos verificar que a potência mecânica anula-se, quer para  $s=0$  quer para  $s=1$ , à parte as perdas mecânicas, considerando constantes todas as grandezas incluídas na expressão

Do mesmo modo, substituindo  $I''_2$  por  $V_I$  na expressão (6.48) obtemos a expressão da potência cedida pelo estator:

$$P_{s \rightarrow r} = \frac{3 R'_2 V_1^2}{(sR_1 + R'_2)^2 + s^2(X_1 + X'_2)^2} \times s \dots\dots\dots(6.61)$$

Analise os possíveis regimes de funcionamento da máquina assíncrona. Para tal vamos utilizar as expressões (6.52) e (6.53).

1) Funcionamento como motor:

$$0 < S < 1 \quad \rightarrow \quad P_{mec} > 0 \quad \text{e} \quad P_{s \rightarrow r} > 0 \dots\dots\dots(6.62a)$$

A máquina absorve a potência  $P_{s \rightarrow r}$  à rede e fornece potência mecânica no veio.

2) Funcionamento como gerador:

$$S < 0 \quad \rightarrow \quad P_{mec} < 0 \quad \text{e} \quad P_{s \rightarrow r} < 0 \dots\dots\dots(6.62b)$$

A máquina absorve potência mecânica no veio e transmite-a ao estator sob a forma de potência eléctrica. Nestas condições a transferência da energia é feita do rotor para o estator.

3) Funcionamento como travão ou conversor de frequência:

$$S > 1 \quad \rightarrow \quad P_{mec} < 0 \quad \text{e} \quad P_{s \rightarrow r} > 0 \dots\dots\dots(6.62c)$$

A máquina absorve potência mecânica no veio e o rotor recebe a energia proveniente do estator. A energia no rotor será a soma dessa energia mecânica com a que já possuía quando a máquina estava imobilizada.

4) Funcionamento como regulador de indução:

$$S = 1 \quad \rightarrow \quad P_{mec} = 0 \quad \text{e} \quad P_{s \rightarrow r} \neq 0 \dots\dots\dots(6.62d)$$

O rotor recebe energia do estator e a máquina vai funcionar como um transformador de campo girante.

5) A máquina não arranca.

$$S = 0 \quad \rightarrow \quad P_{mec} = 0 \quad \text{e} \quad P_{s \rightarrow r} = 0 \dots\dots\dots(6.62e)$$

### 6.9 VARIAÇÃO DA POTÊNCIA MECÂNICA E DO BINÁRIO COM O ESCORREGAMENTO

No estudo da máquina assíncrona uma grandeza fundamental é o binário desenvolvido na máquina, que é dado pela expressão:

$$M = \frac{P_{mec}}{\omega} = \frac{P_{mec}}{2\pi N_r} = \frac{P_{mec}}{2\pi N_s(1-s)} \dots\dots\dots(6.63)$$

em que:

- $\omega$  – frequência angular
- $N_r$  – nº de rotações do rotor;
- $N_s$  – velocidade de sincronismo (velocidade do campo girante).

Tendo em consideração que  $f = p (N_s/60)$ , temos:

$$M = \frac{P_{mec}}{2\pi 60 f} \times \frac{1}{1-s} \dots\dots\dots(6.64)$$

Substituindo  $P_{mec}$  pela expressão (6.52) teremos:

$$M = \frac{3 p}{2\pi \cdot 60 f} \times \frac{R'_2 V_1^2}{(sR_1 + R'_2)^2 + s^2(X_1 + X'_2)^2} \times s \dots\dots\dots(6.65)$$

$$M = C^{te} \times \frac{R'_2 V_1^2}{(sR_1 + R'_2)^2 + s^2(X_1 + X'_2)^2} \times s \dots\dots\dots(6.66)$$

Podemos concluirmos que o binário é proporcional à potência transmitida do estator ao rotor. Devemos sublinhar que o binário assim obtido não é o binário útil, mas sim o binário electromagnético total, incluindo as perdas da máquina.

Consequentemente o binário é função do escorregamento. Sendo nulo o binário para  $s = 0$  a curva  $M = M(s)$  passa pela origem e tende assintoticamente para zero quando  $s \rightarrow +\infty$  (Fig.-6.15), passando por um valor máximo.

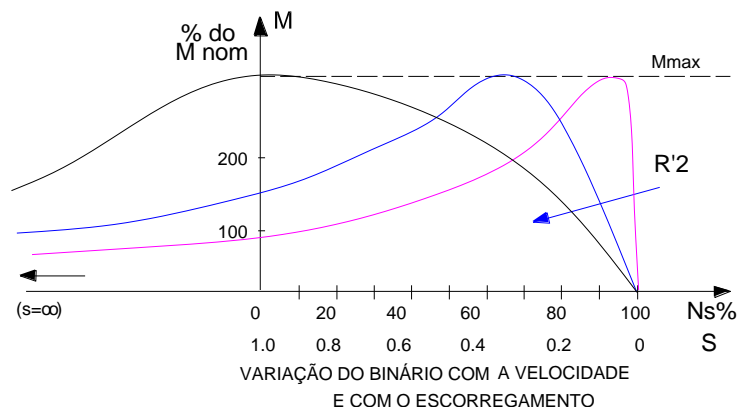


Fig.-6.15

Determina-se o binário máximo através da derivada  $dM/ds$  considerando todas as grandezas constantes com exceção do escorregamento, e igualar a zero.

O valor máximo do binário corresponde a um valor de  $s$  dado pela expressão:

$$s_{M_{max}} = \frac{R'_2}{R'_2 + Z} \dots\dots\dots(6.67)$$

sendo:

$$Z = \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \dots\dots\dots(6.68)$$

Como as resistências  $R_1$  e  $R'_2$  são muito pequenas em face das respectivas reactâncias podemos escrever

Atendendo a que  $(R_1 ; R'_2) \ll (X_1 ; X'_2)$ , podemos aproximar:

$$s_{M_{max}} = \frac{R'_2}{X'_2 + X_1} \dots\dots\dots(6.69)$$

Substituindo este valor na expressão (6.57) obtemos

$$M_{max} = C^{te} \times \frac{V_1^2}{2 \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]} \dots\dots\dots(6.70)$$

Assim podemos tirar as seguintes conclusões:

**1) O binário máximo é independente da resistência do rotor**

O binário máximo depende apenas da resistência do estator e das reactâncias do estator e do rotor. Esta propriedade verifica-se quaisquer que sejam as resistências adicionais que se ligam aos anéis da máquina, pois elas apenas influenciam o escorregamento.

O valor de  $s$  para o qual se atinge o binário máximo, dependente da resistência do rotor e é proporcional a  $R'_2$ , crescendo com este valor.

Portanto, se traçarmos as curvas  $M=M(s)$  tendo como parâmetro  $R'_2$ , obtemos uma família de curvas tal como a que se apresenta na **Fig.-6.16**.

Podemos considerar o eixo das abcissas graduado em velocidades ( $N$ - número de rotações do rotor) pelo que a  $s=1$  corresponde  $N_r=0$ , e a  $s=0$  corresponde  $N_r=N_s$ . Podemos assim concluir que para  $0 < s < 1$  a máquina funciona como motor, para  $s < 0$  trabalhará como gerador e se  $s > 1$  funcionará como travão (**Fig.-6.16**).

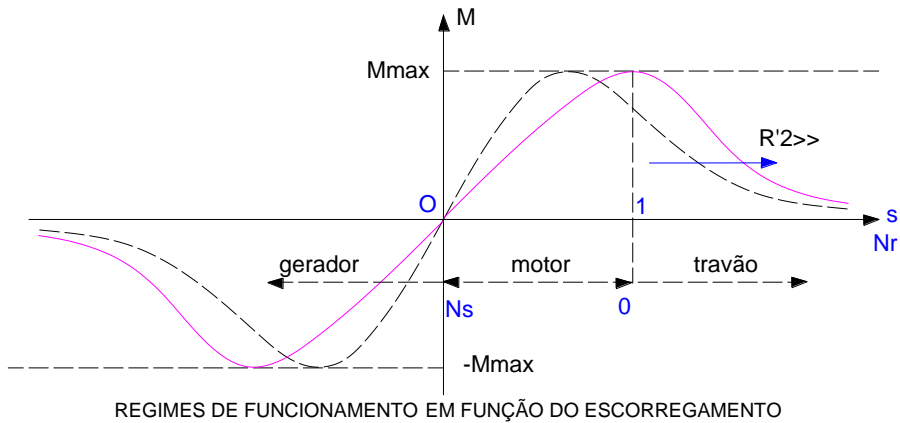


Fig.-6.16

Conclui-se que actuando convenientemente sobre  $R'_2$  podemos conseguir que o binário máximo se verifique para  $s=1$ . Nestas circunstâncias o binário de arranque será igual ao binário máximo da máquina.

Verifica-se que, no arranque, o binário será máximo quando

$$R'_2 = X_1 + X'_2 \dots\dots\dots(6.71)$$

Donde o binário de arranque tomará a seguinte expressão:

$$M_a = C^{te} \times \frac{R'_2 V_1^2}{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \dots\dots\dots(6.72)$$

Desta relação podemos inferir que:

2) O binário cresce com o quadrado da tensão

O binário cresce com o quadrado da tensão aplicada aos terminais da máquina.

3) O binário depende da frequência

O binário depende da frequência diminuindo com o seu aumento (Fig.-6.17).

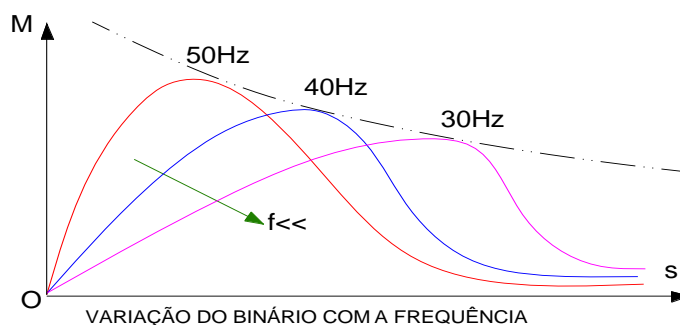
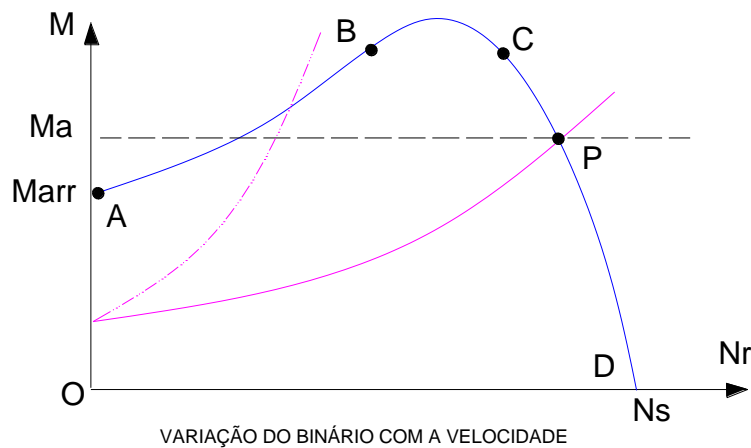


Fig.-6.17

Com efeito, tendo em conta as expressões (6.55) a (6.57) verificamos a dependência do binário com a frequência  $f$ , tal como as reactâncias.



**Fig.-6.18**

Para um dado binário resistente a curva  $M(N_s)$  é interceptada no ponto  $P$ , a que corresponde um valor  $Ma$ . No troço  $CD$  (**Fig.-6.18**) o funcionamento é estável, enquanto no ramo  $AB$  o funcionamento é instável.

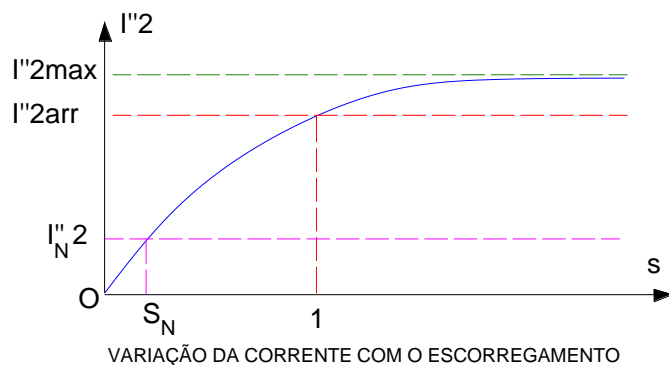
No arranque, a intensidade de corrente no rotor, varia em função de  $s$ , de acordo com a expressão:

$$I''_2 = \frac{V}{\sqrt{(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \dots\dots\dots(6.73)$$

Portanto  $I''_2=0$  quando  $s=0$ .

O valor máximo de  $I''_2$  é assintótico quando  $s=\infty$  (**Fig.-6.19**).

$$I''_{2,m} = \frac{V}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \dots\dots\dots(6.74)$$



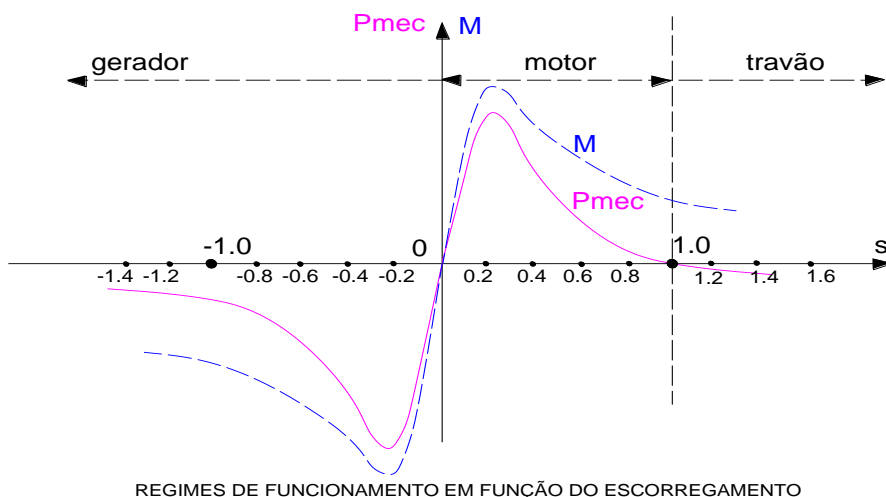
**Fig. - 6.19**

A variação da potência mecânica do motor em função do escorregamento será assim deduzida:

$$P_{mec} = \frac{R_1^2 V_1^2}{(sR_1 + R_2')^2 + s^2(X_1 + X_2')^2} \times s(1 - s) \dots\dots\dots(6.75)$$

$$P_{mec} = \frac{R_1^2 V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2} \times \frac{1-s}{s} \dots\dots\dots(6.76)$$

Donde se reafirma que  $P_{mec} = 0$  quer para  $s=0$  quer para  $s=1$ , como se verifica na **Fig.-6.20**.



**Fig.-6.20**

Para determinar a potência mecânica máxima, podemos derivar a expressão (6.65) em ordem a  $s$  e igualar a zero, isto é,  $d(P_{mec})/ds=0$ , equação que permite a obtenção de um determinado valor de  $s$ , que é dado por:

$$s_{P_{mec,max}} = \frac{R_2'}{R_2' + Z} \dots\dots\dots(6.77)$$

em que  $Z$  é a impedância total do motor:

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2} \dots\dots\dots(6.78)$$

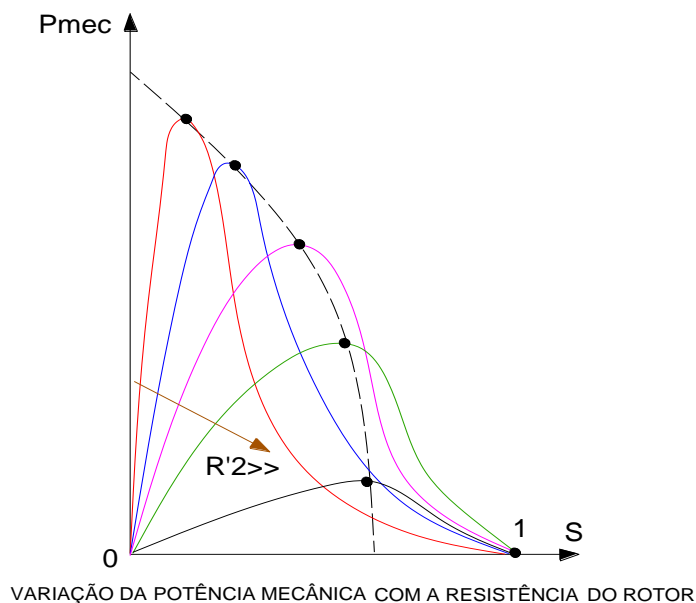
Dando para valor da potência mecânica máxima (por fase):

$$P_{mec,max} = \frac{V_1^2}{2 [(R_1 + R_2') + Z]} \dots\dots\dots(6.79)$$

Ou, para um motor trifásico:

$$P_{mec,max} = \frac{3 V_1^2}{2 [(R_1 + R_2') + Z]} \dots\dots\dots(6.80)$$

Concluimos que a potência mecânica do motor depende da resistência do rotor, o que não acontecia com o binário. Considerando esta dependência podemos traçar as curvas a cheio da **Fig.-6.21**.



**Fig. – 6.21**

Se tomarmos, para cada valor da resistência do rotor, o valor máximo das curvas  $P_{mec}=P_{mec}(s)$  e os unirmos obtemos a curva a tracejado.

## 6.10 ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

### 6.10.1 DIAGRAMA DO CIRCULO

O **diagrama do círculo** é um diagrama vectorial de impedâncias e admitâncias onde as grandezas (vectoriais) aí representadas são função do escorregamento  $s$ , que aparece associado à resistência fictícia:

$$\frac{R'_2}{s} \dots\dots\dots(6.81)$$

Ou, mais a propósito, a que representa a variação da carga.

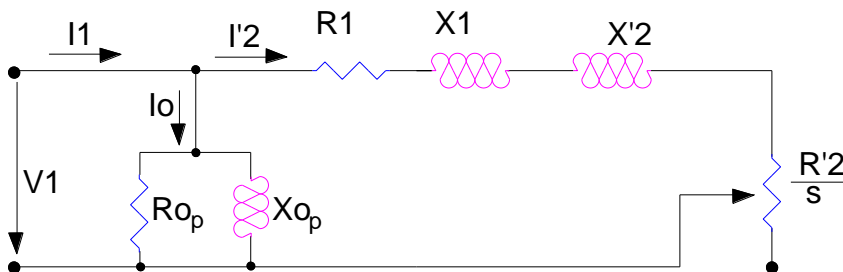
$$R'_2 \frac{1-s}{s} \dots\dots\dots(6.82)$$

Considerando constante a tensão da rede nos diferentes regimes de funcionamento, este diagrama permite-nos ler, a uma dada escada, as intensidades de corrente da máquina e permite deduzir com facilidade e aproximação suficiente a potência, o binário, o rendimento e o factor de potência, propriedades da máquina assíncrona que mais interessa conhecer, dando-nos ao mesmo tempo, uma ideia de como se processara as condições de funcionamento e como se devem dimensionar alguns dos parâmetros que o condicionam.

Por estas razões o diagrama do círculo é uma importante ferramenta de análise prática pelo que se compreende a sua grande importância e o cuidado com que deve ser abordado.

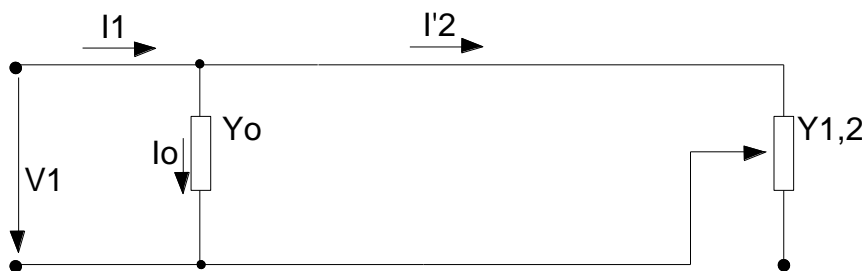
A dedução do Diagrama terá por base o esquema equivalente da máquina já deduzido anteriormente.

Contudo uma outra versão do esquema equivalente considera como circuito de magnetização equivalente um paralelo de impedâncias e não a série destas, onde  $I_o$  terá o mesmo valor. Deste modo o diagrama da **Fig.-6.14** transformar-se-á no seguinte:



**Fig. – 6.22 -Esquema equivalente com circuito de magnetização paralelo**

Este esquema pode ser transformado num esquema de admitâncias concentradas, como se mostra na **Fig.-6.23**:



**Fig. – 6.23 -Esquema equivalente de admitâncias**

Onde:

$$Y_o = \frac{1}{R_o} + \frac{1}{X_o} = G_o - jB_o \quad \text{e} \quad Y_{1,2} = \frac{1}{Z_{1,2}} = \frac{1}{(R_1 + \frac{R'_2}{s}) + j(X_1 + X'_2)} \dots\dots\dots(6.83)$$

Num diagrama vectorial os afixos de  $Z_{1,2}$  terão uma recta por lugar geométrico:

$$Z_{1,2} = \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right) + j(X_1 + X'_2) \dots \begin{cases} \text{abcissas: } R_1 + \frac{R'_2}{s} \\ \text{ordenada: } X_1 + X'_2 \end{cases} \dots\dots\dots(6.84)$$

Portanto, os afixos do vector inverso ( $Y_{1,2}$ ) terão por lugares geométricos uma circunferência que passa pela origem e terá por diâmetro:

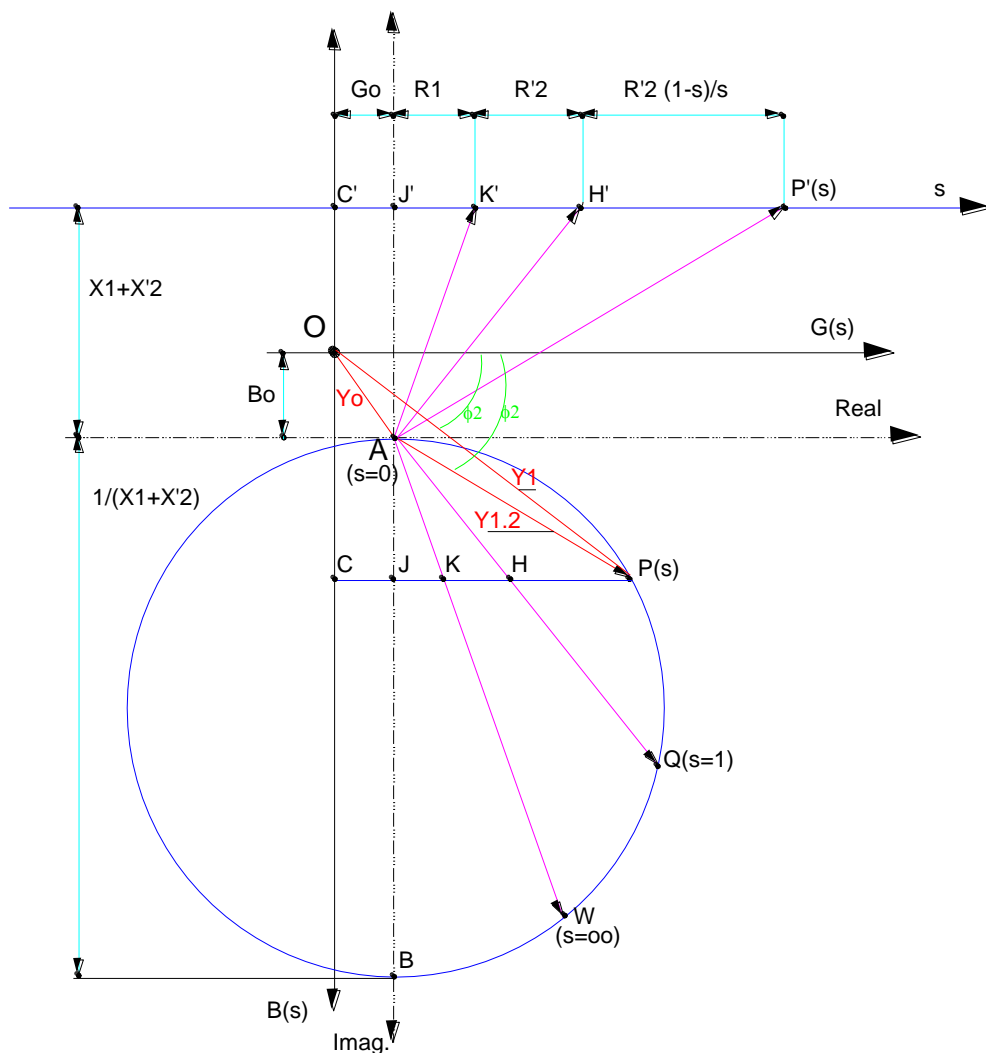
$$\text{Diâmetro: } \frac{1}{X_1+X'_2} \dots\dots\dots (6.85)$$

Atendendo a que  $Y_t=Y_o+Y_{1,2}$ , o vector  $Y_o$  será adicionado, por conveniência de construção, através de um mudança de origem do referencial, como se indica no **Diagrama-6.3**.

Se multiplicarmos as admitâncias por  $U_L$ , real e pressupostamente constante, obteremos:

$$\begin{cases} I_o = Y_o \times U_1 \\ I_1 = Y_1 \times U_1 \\ I'_2 = Y_{1,2} \times U_1 \end{cases} \text{ e } \begin{cases} P_1 = 3 \times U_1 \times I_1 \times \cos\phi_1 \\ Q_1 = 3 \times U_1 \times I_1 \times \sin\phi_1 \\ S_1 = 3 \times U_1 \times I_1 \end{cases} \dots\dots\dots (6.86)$$

Deste modo, e através de relações geométricas, utilizando escalas convenientes, podemos obter por leitura directa, os valores das correntes, das potências, o binário, o rendimento e o factor de potência e o escorregamento para um determinado ponto de funcionamento ( $s$ ) de uma máquina assíncrona.

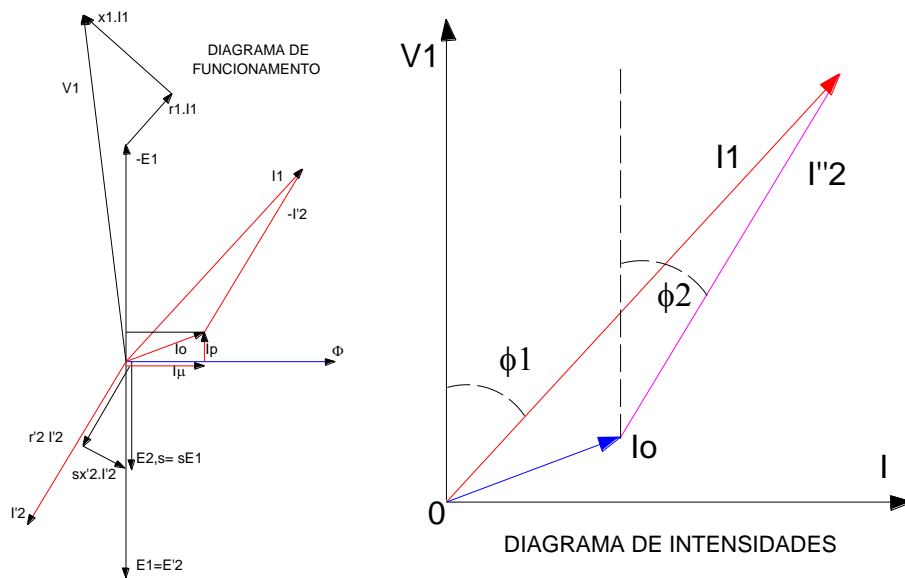


**Diagrama -6.3 –Diagrama de Impedâncias e Admitâncias**

Contudo, vamos fazer a dedução pormenorizada do diagrama do círculo a partir do ‘diagrama de funcionamento’ e do ‘esquema equivalente’ (circuito de magnetização série) [ 20 ], [21], [23] anteriormente deduzidos.

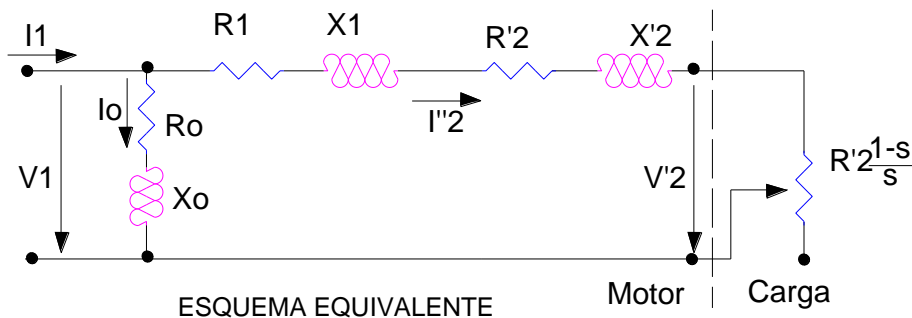
Conforme se indica no **Diagrama-6.4**, do ‘diagrama de funcionamento’ extraímos o ‘diagrama das intensidades’.

As intensidades de corrente que se indicam no ‘diagrama das intensidades’ estão ligadas entre si pela soma vectorial de  $I_1$  (corrente do estator) e  $I''_2$  (corrente do rotor), sendo  $\phi_1$  e  $\phi_2$  as respectivas defasagens em relação à tensão  $V_1$ .



**Diagrama-6.4**

Para a dedução do Diagrama utilizaremos o esquema equivalente (**Fig.-6.24**) supondo que a tensão  $V_1$ , a frequência da rede, as resistências e as reactâncias nele incluídas são grandezas constantes. Consequentemente, o escorregamento é a única variável da qual depende o valor da resistência fictícia [20], [21], [22], [23].



**Fig. - 6.24**

Do esquema equivalente (*Fig.—6.24*) deduzimos:

$$I_2'' = \frac{V_1}{Z_t} \dots \dots \dots (6.87)$$

Onde:  $Z_t = \sqrt{\left(R_1 + R_2' + R_2' \frac{1-s}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2} \dots \dots \dots (6.88)$

Considerando:  $\text{sen } \phi_2 = \frac{X_1 + X_2'}{Z_t} \dots \dots \dots (6.89)$

E substituindo em (6.71) teremos:

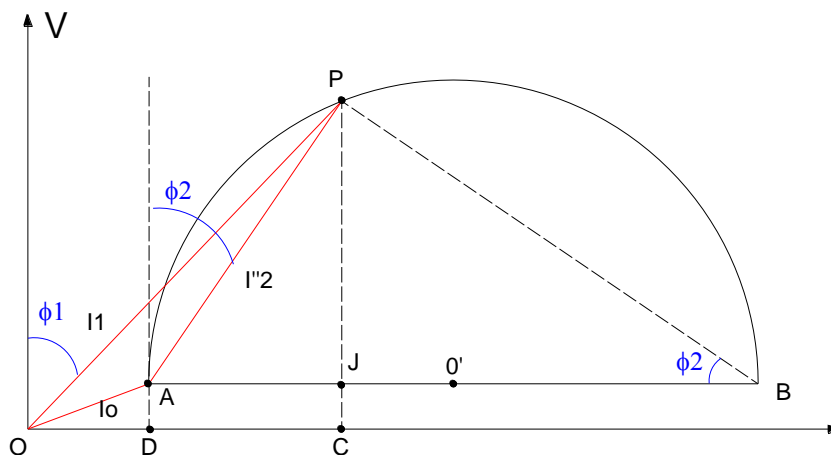
$$I_2'' = \frac{V_1}{X_1 + X_2'} \text{sen } \phi_2 \dots \dots \dots (6.90)$$

Como  $V_1$ ,  $X_1$  e  $X_2'$  são constantes a fracção (6.91) também será constante:

$$\frac{V_1}{X_1 + X_2'} \dots \dots \dots (6.91)$$

Da expressão (6.90) concluímos que  $I_2''$  será o cateto de um triângulo rectângulo cuja hipotenusa é o cociente (6.91).

Tendo por base o ‘diagrama de correntes’ (*Diagrama-6.4*), a extremidade do vector  $I_o$  define o ponto  $A$ , pelo qual se traça uma perpendicular ao eixo dos vectores tensão. Sobre esta perpendicular marcamos o segmento  $AB$ , cujo comprimento representa, numa dada escala o valor de (6.91).



**Diagrama-6.5 – Diagrama do Circulo - Correntes**

Os afixos dos vectores  $I_1$ , e  $I_2''$  coincidem em  $P$ , que unido com o ponto  $B$  definimos um triângulo rectângulo  $[APB]$ , em que a hipotenusa é  $AB$ , sendo portanto recto o ângulo em  $P$ .

Nestas circunstâncias, quando  $\varnothing_2$  varia, e devido à relação (6.90), o lugar geométrico do ponto  $P$  corresponde a uma circunferência com centro no ponto  $O'$ , cujo diâmetro, numa dada escala, representa o valor do cociente (6.91)

Os vectores  $OP$  e  $AP$  dão-nos, a uma dada escala, os valores de  $I_1$ , e  $I''_2$  (*Diagrama-6.5*).

### 6.10.2 Leitura do Binário e da Potência

Como se verifica, na escala das correntes,  $PC = I_1 \cos \varphi_1$ . Atendendo a que consideramos que  $V_1$  é constante, numa outra escala, teremos:

$$PC \Leftrightarrow V_1 I_1 \cos \varphi_1 = P_1 \dots\dots\dots(6.92)$$

que corresponde à potência absorvida à rede, por fase ( $P_1$ ) e para o regime de funcionamento correspondente ao ponto  $P$ , cujo valor de  $I''_2$  é indicado por  $AP$  no *Diagrama-6.5*.

A corrente no rotor  $I''_2$  diminui com o ângulo  $\varphi_2$  anulando-se quando o ponto  $P$  coincidir com o ponto  $A$ . Vejamos a que corresponde este funcionamento. O anulamento da corrente  $I''_2$  significa que a impedância do circuito é infinita, o que só se verifica se  $s=0$ , pois por hipótese  $V_1$  é constante e diferente de zero, de acordo com a expressão (6.88).

Portanto, o ponto  $A$  corresponde ao funcionamento da máquina com a velocidade de sincronismo, isto é,  $s=0$

Devido ao escorregamento resultante da necessidade de um binário suficiente para vencer as perdas mecânicas (binário resistente), a corrente  $I''_2$  nunca se pode anular e portanto nunca se pode atingir o ponto  $A$ .

Consequentemente, o ensaio em vazio dá-nos  $I_1 = I_o + I''_{2,0}$  e não  $I_o$ , uma vez que a resistência fictícia não será infinita. Contudo, podemos supor que, em vazio,  $I''_{2,0} \approx 0$  e portanto podemos aceitar a aproximação  $I_1 = I_o$  desprezando a corrente  $I''_{2,0}$ .

Assim teremos no *Diagrama-6.5*:

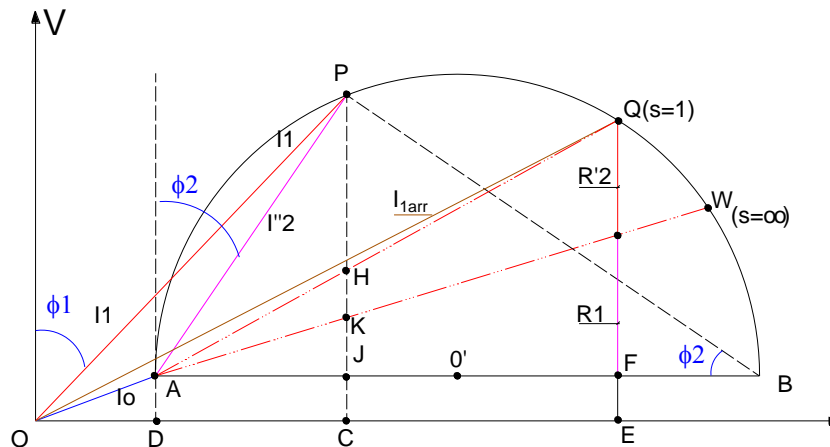
$$AD \Leftrightarrow p_{magn} + p_{mec} \quad (\text{em vazio}) \dots\dots\dots(6.93)$$

Na prática consideramos que esta perda se mantém constante em todos os regimes de funcionamento.

Porém, à medida que o escorregamento aumenta as perdas mecânicas tornam-se menores (menos atrito), e aquela afirmação não é perfeitamente exacta se bem que cresçam as perdas magnéticas (maior magnetização função de  $f$ ).

Também as perdas suplementares e que são devidas à dispersão do fluxo nas cavas e nos dentes e às correntes de Foucault (o campo no entreferro “não é constante) são função do regime de funcionamento, uma vez que o escorregamento também não é constante.

Se considerarmos que o ângulo  $\phi_1$  aumenta (**Diagrama-6.6**), o ponto **P** vai deslocar-se sobre a circunferência no sentido de **A** para **B**, com o conseqüente aumento do escorregamento. Deste modo haverá um ponto **Q** que corresponde ao rotor parado ( $\omega_r = 0$ ;  $s = 1$ )



**Diagrama-6.6 – Diagrama do Círculo - Potências**

Para este ponto **Q** ( $s=1$ ):

- $AQ \diamond I'_2$  (rotor no arranque);
- $OQ \diamond I_1 \dots OQ \diamond I_{larr.}$  (corrente de arranque).

Através do ‘ensaio em curto-circuito’, que corresponde ao rotor imobilizado (ensaio a tensão reduzida) o ponto **Q** pode determinar-se facilmente. Nesta situação, como  $s=1$  a resistência fictícia, que representa a carga aos terminais da máquina, é nula e tudo se passa como se o secundário estivesse em curto-circuito.

Assim o segmento **QE**, numa escala apropriada, mede-nos as perdas quando o motor estiver parado (perdas em curto-circuito), e como neste caso não há perdas mecânicas temos apenas de considerar as perdas magnéticas e suplementares, cuja soma corresponde a segmento em causa:

- $QE \diamond P_{magn} + P_{supl}$  (rotor imobilizado – arranque)
- $FE \diamond P_{madn}$  (perdas no ferro)
- $QF \diamond P_{supl}$  (perdas de Joule no Rotor e no Estator)

O segmento **FE** mede as perdas suplementares e como se admite que as perdas magnéticas são constantes, o segmento **QF** dá-nos, na escala adequada, o seu valor no funcionamento em curto-circuito, isto é, as perdas de Joule na resistência do estator **R<sub>1</sub>**, e na resistência do rotor **R'<sub>2</sub>**.

Os valores das perdas de Joule podem ser separados em cada uma das resistências referidas.

Consideremos um segmento com extremidades em **A** e no ponto **W** ( $s=\infty$ ). Por intersecção com o segmento **QE** obtemos o ponto **G**.

Ficam assim determinados os segmentos **QG** e **GF** que são proporcionais às respectivas resistências:

$$\frac{QG}{GF} = \frac{R'_2}{R_1} \dots\dots\dots(6.94)$$

Portanto, numa dada escala,

- **QG** - representa as perdas por efeito Joule no rotor.
- **GF** - representa as perdas por efeito Joule no estator.

Da observação do **Diagrama-6.6** podemos ainda concluir que **PH** é a diferença entre **PC** (potência absorvida à rede) e **CH** que nos dá o valor das perdas mecânicas, magnéticas, por efeito Joule e suplementares, isto é, o valor das perdas totais do motor.

Então:

- **PH** - representa a potência mecânica do motor

Unindo os pontos **A** e **G** obtemos um ponto **K** tal que:

- **JK** - representa as perdas por efeito Joule no estator;
- **KH** - representa as perdas de Joule no rotor

para um determinado ponto de funcionamento **P**.

Podemos concluir que o segmento **PK** representa a potência mecânica no veio menos as perdas por efeito Joule no rotor, ou seja a potência recebida pelo motor, que, por sua vez, é proporcional ao binário da máquina. Temos portanto:

$$PK \propto \text{binário total da máquina} \quad (\text{Diagrama-6.6})$$

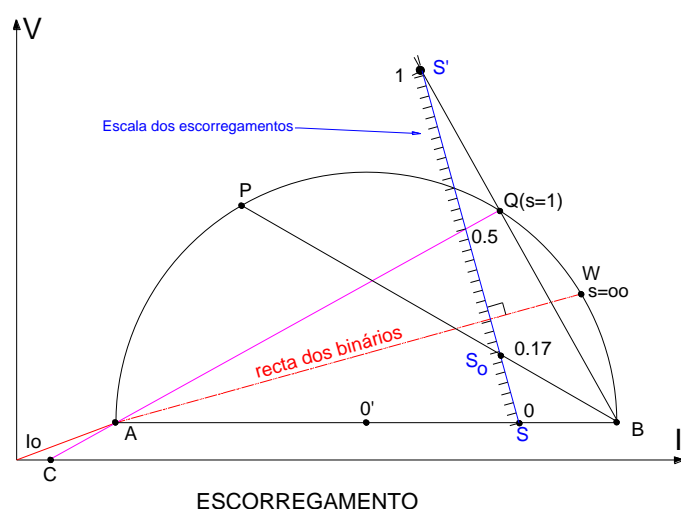
Verificamos que, através do ‘diagrama do círculo’, para cada ponto de funcionamento (ou passa valor de **s**), podemos medir a potência mecânica, o binário e as intensidades de corrente e as perdas, que determinam o funcionamento da máquina assíncrona.





### 6.10.4 ESCORREGAMENTO

O diagrama do círculo também permite conhecer o escorregamento do ponto de funcionamento.



**Diagrama – 6.9 - Diagrama do Círculo – Escorregamento**

No diagrama do círculo são conhecidos os pontos  $Q(s=1)$  e o ponto  $W(s=\infty)$  (*Diagrama-6.9*).

Unimos o ponto  $Q$  com a extremidade  $B$  do círculo e prolongamos o respectivo segmento marcando sobre este um ponto  $S'$  arbitrário. Por este ponto traça-se uma perpendicular à recta dos binários  $AW$ , que determina sobre  $AB$  um ponto  $S$ . Dividindo o segmento  $SS'$  em 100 partes obtemos a escala dos escorregamentos.

Para o ponto  $P$  do funcionamento da máquina o escorregamento é determinado unindo  $P$  e  $B$  por um segmento que intersecta a escala do escorregamento no ponto  $S_0$ , que indica  $S \approx 17\%$ .

## 6.11 DIAGRAMA DO CÍRCULO E REGIÕES DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

Na secção '6.8' deduziram-se expressões que explicaram os vários regimes de funcionamento da máquina assíncrona. Vamos analisar e determinar a que regiões do diagrama do círculo correspondem os diversos regimes.

### 6.11.1 FUNCIONAMENTO COMO MOTOR

No funcionamento como Motor interessa que o rendimento e o factor de potência tenham os maiores valores possíveis. Não coincidindo os respectivos 'pontos' haverá que escolher uma opção otimizada.

O rendimento máximo corresponderá à potência máxima cujo ponto  $P_1$  obtém-se traçando uma tangente ao círculo uma paralela à recta das potências (*Diagrama-6.10*).

Do mesmo modo o valor máximo do factor de potência, é conseguido traçando por  $O$  uma tangente ao círculo de modo a obter-se o ponto  $P_2$ .

Consequentemente a região que interessa trabalhar a plena carga (funcionamento nominal) está compreendida entre  $P_1$  e  $P_2$ , onde o rendimento e o factor de potência são elevados. Resulta daqui uma propriedade muito importante do motor assíncrono: os pontos de **rendimento máximo** e  **$\cos \phi_1$  máximo** são praticamente coincidentes.

Quando a máquina está a trabalhar em regime de sobrecarga, ela não é prejudicada em virtude de poder fornecer uma potência relativamente maior que a potência nominal, que corresponde ao binário nominal, visto esta ser muito menor que a potência máxima (em binário máximo), que a máquina pode fornecer

Convém trabalhar com um binário nominal muito próximo do binário máximo a fim de a máquina poder suportar com facilidade uma sobrecarga.

Como já tínhamos concluídos através das expressões deduzidas anteriormente, também no diagrama do círculo, verifica-se que o binário máximo que a máquina pode fornecer não depende da resistência do estator ( $R_1$ ) o que não se verifica em relação à resistência do rotor  $R'_2$ .

Numa dada escala, a resistência  $R'_2$  é representada pelo segmento  $QG$  (*Diagrama-6.10*), e portanto corresponde ao binário de arranque da máquina quando  $s=1$ . Se formos aumentando a resistência do rotor, o ponto  $Q$  deslocar-se-á para a esquerda ( $Q'$ ) (*Diagrama-6.10*), isto é, vamos aumentando o binário de arranque e em determinada altura ele será igual ao binário máximo, situação que se verifica no ponto  $Q'$ , e portanto para valores da resistência do rotor maiores, ou menores, que o valor correspondente ao segmento  $Q'G'$ , o binário é, respectivamente, maior ou menor que  $M_{max}$ .

As intensidades de arranque (intensidade solicitada à rede no instante de arranque) são medidas pelos segmentos  $AQ(I_2''_{arr})$  e  $OQ(I_{1arr})$ .

Deste modo, verifica-se que o aumento de  $R'_2$  provoca o aumento do binário de arranque e simultaneamente, a diminuição da intensidade de arranque.

Apesar de o diagrama do círculo não ser exacto, em primeira aproximação, os resultados que possibilita são aceitáveis. Normalmente, o rendimento dos motores assíncronos é cerca de 90% (valor médio). Para motores de baixa tensão (230 V, 400 V) o rendimento anda à volta de 80% a 85%.

Os valores do factor de potência rodam os 80%, podendo atingir 85% nos motores de gaiola de baixa potência e cerca de 90% nos motores de gaiola de grande potência.

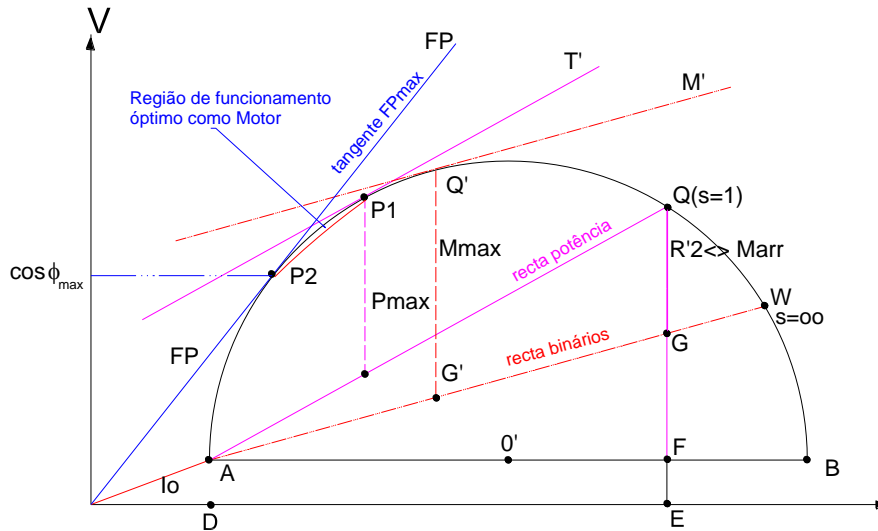


Diagrama – 6.10 - Diagrama do Círculo – Região de Funcionamento ótimo como motor

### 6.11.2 REGIMES DE TRAVÃO E DE GERADOR

Até agora nos temos debruçado sobre a região do diagrama do círculo entre  $s=0$  e  $s=1$ , verificando-se que o binário tende para zero quando  $s \rightarrow \infty$ . Neste caso, entre A e Q ( $0 < s < 1$ ) a máquina assíncrona funciona como motor (*Diagrama-6.11*).

Na região entre Q e E ( $1 < s < \infty$ ) a máquina trabalha como conversor de frequência ou travão;

Na região entre E e A ( $s < 0$ ) a máquina funciona como gerador.

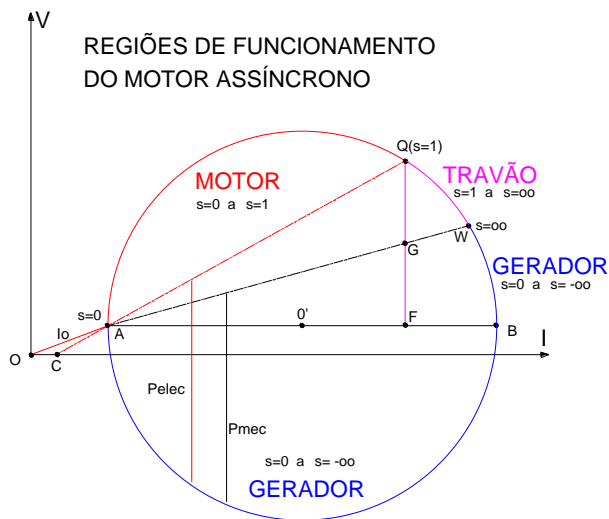


Diagrama – 6.11 - Diagrama do Círculo – Regiões de Funcionamento

### 6.11.3 OBTENÇÃO DO DIAGRAMA DO CÍRCULO

#### 6.11.3.1 Construção

Tal como no Transformador, o Diagrama do Circulo constrói-se a partir das grandezas determinadas em dois ensaios básicos: o ensaio em vazio e o ensaio em curto-circuito (rotor imobilizado).

O ensaio em vazio permite obter a localização do ponto **A**, extremidade do diâmetro do círculo (*Diagrama-6.12a*), através da corrente de magnetização  $I_o$  e do factor de potência  $\cos \phi_o$ , cujo valor permite o conhecimento do ângulo  $\phi_o$ .

Do mesmo modo, a determinação da posição do ponto **Q** consegue-se pelo ensaio com o rotor imobilizado (*Diagrama-6.12a*). Desta maneira o traçado do diagrama corresponde ao traçado de um círculo que passa pelos pontos **A** e **Q** e cujo centro **O'** se encontra sobre uma perpendicular ao eixo das ordenadas (*Diagrama-6.12b*).

Assim dividindo ao meio o segmento **AQ** e tirando por esse ponto uma perpendicular ao mesmo (**AQ**), obtemos com facilidade o ponto **O'**. O segmento **AO'** determina a grandeza do raio do círculo pretendido.

O ensaio com o rotor imobilizado também não pode ser realizado sem que se sejam ponderados alguns factores importantes. É evidente, portanto, que não se determina a corrente  $I_{cc}$  que corresponderia à tensão nominal mas sim um valor  $I'_{cc}$  proveniente da aplicação de uma tensão inferior àquele valor.

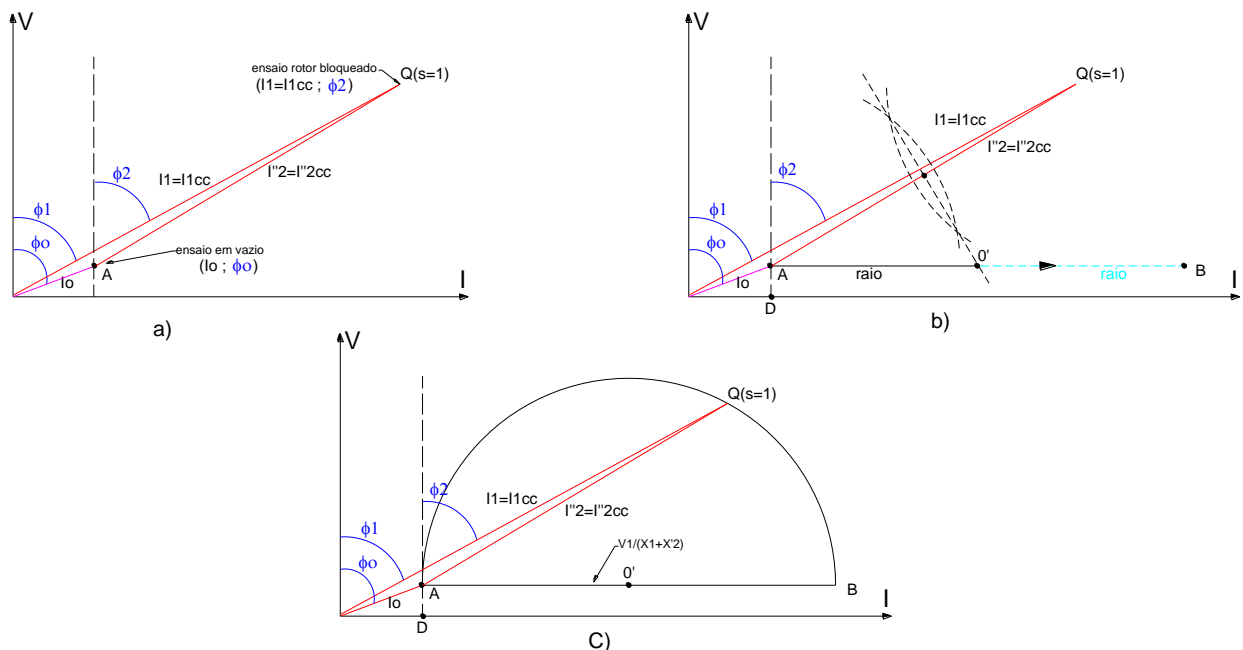


Diagrama - 6.12 - Construção do Diagrama do Circulo

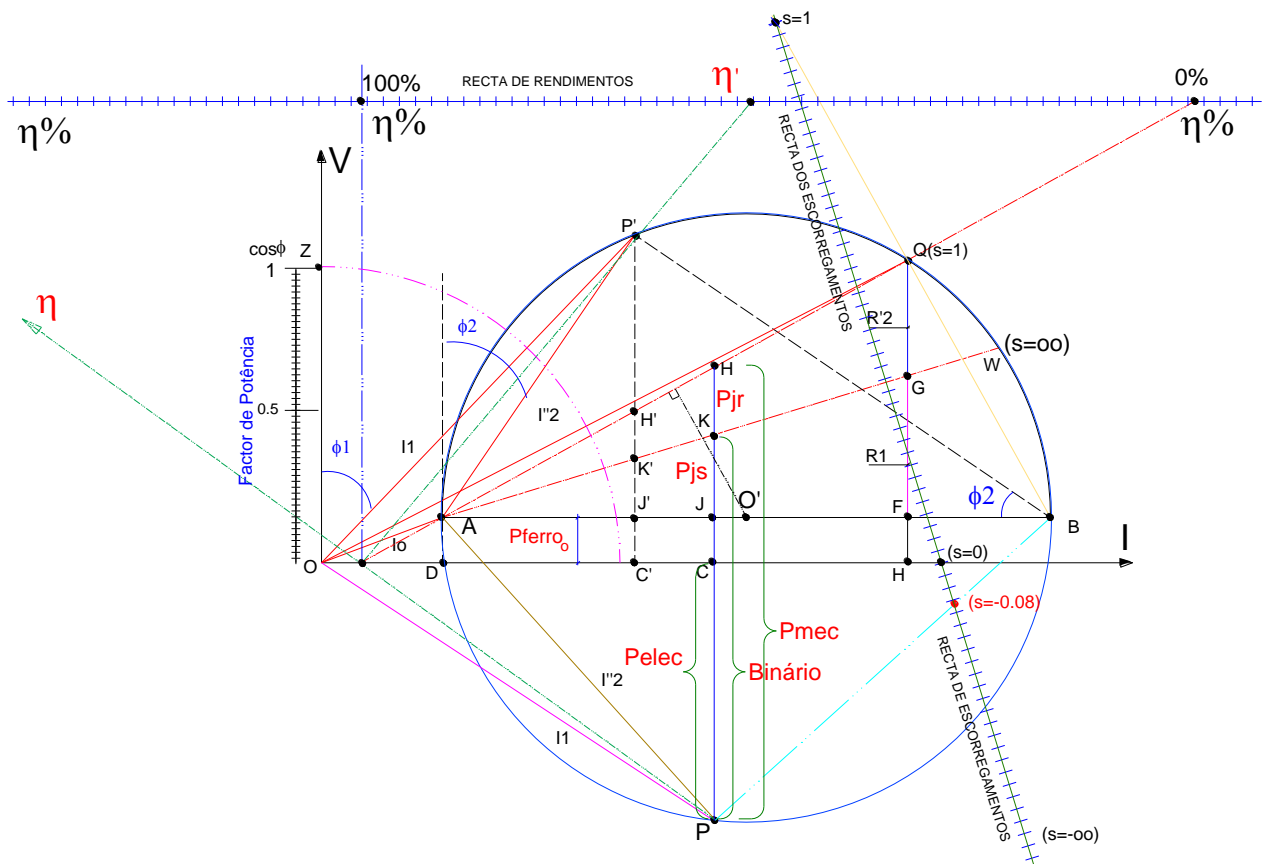
Todavia, para o traçado do diagrama do círculo, é indispensável o conhecimento de  $I_{cc}$ , pelo que se admite que a relutância do circuito magnético se mantém constante e, portanto, a existência de proporcionalidade entre as tensões e as correntes respectivas:

$$\frac{I_{cc}}{V_1} = \frac{I'_{cc}}{V'_1} \dots \dots \dots (6.96)$$

Porém, a um aumento da tensão corresponde um aumento do fluxo e conseqüentemente a saturação, pelo que a relutância não se manterá constante. Então, a proporcionalidade indicada não se verifica e a corrente  $I_{cc}$  teria um valor superior ao dado pela relação anterior.

**6.11.3.2 Leitura**

Nos itens anteriores demonstrou-se, através de relações de proporcionalidade entre segmentos relacionados com o Diagrama do Círculo, a representatividade, a uma escala conveniente, das grandezas em jogo no funcionamento da Máquina Assíncrona.



**Diagrama – 6.13 - Diagrama do Círculo Global**

No *Diagrama-6.13* apresentamos uma construção completa que permite obter os valores dos seguintes parâmetros:

Tabela-6.2 - Quadro de Leitura

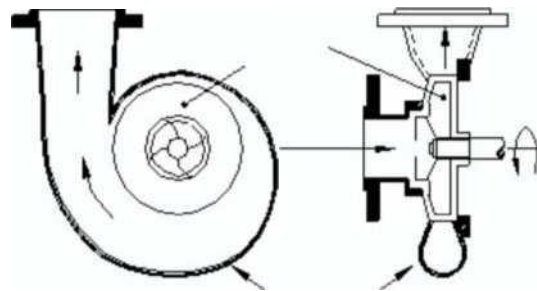
SEGMENTO	SIGLA	ESCALA	DESIGNAÇÃO
OP	$I_1$	<A>	corrente estatórica (gerador)
OP'	$I_1$	<A>	corrente estatórica (motor)
AP	$I_2$	<A>	corrente rotórica reduzida ao estator (gerador)
AP'	$I_2$	<A>	corrente rotórica reduzida ao estator (motor)
AO	$I_0$	<A>	corrente em vazio
OQ	$I_{arr}$	<A>	corrente de arranque
P'H'	$P_{em}$	<W>	potência electromecânica
PH	$P_{em}$	<W>	potência electromecânica (gerador)
HK	$P_{jr}$	<W>	perdas de Joule no rotor
KJ	$P_{js}$	<W>	perdas de Joule no estator
JC	$P_o$	<W>	perdas no ferro
P'C'	P	<W>	potência eléctrica activa total
PC	P	<W>	potência eléctrica activa total (gerador)
OC'	Q	<VA>	potência eléctrica reactiva total
OP'	S	<VAr>	potência eléctrica aparente total
P'K	$T_e$	<T>	binário electromagnético
QG	$R'_2$	<Ohm>	resistência do rotor reduzida ao estator
GF	$R_1$		resistência do estator

## 7 SISTEMA PaT ('Pump as Turbine')

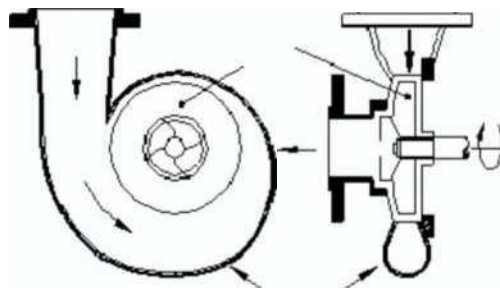
Os Sistemas de Energia Hidroelétrica típicos convertem a energia de uma queda de água em energia mecânica numa turbina. Em alguns casos, pode ser mais adequado substituir a turbina por uma bomba de água centrífuga, e trabalhar em sentido inverso.

Nestes casos as expressões «bomba» e «turbina» são usados de forma reversível, tal como as palavras "motor" e "gerador".

A utilização de uma “bomba como turbina” (Sistema PaT – ‘Pump as Turbine’) tem diversas vantagens onde sobressaem o aspecto económico (muito mais barato) e o aspecto de instalação e de manutenção (muito mais simples e consequentemente muito menos oneroso).



*Fig.-7.1 - Fluxo da água na Bomba operando como tal (Viana,1987)*



*Fig.-7.2 - Fluxo da água na Bomba operando como Turbina (Viana,1987)*

De acordo com a bibliografia da especialidade a implementação de um Sistema PaT permite obter rendimentos de transformação hidroelétrica com valores acima dos esperados através de turbinas do tipo Francis.

Para que a bomba opere como turbina é necessário que se faça a inversão do fluxo de água, que tem como consequência a inversão do sentido de rotação do rotor. As figuras anteriores ilustram, respectivamente, os sentidos do fluxo de água aquando o bombeamento de água e aquando a geração de energia mecânica.

No entanto, para que a bomba opere como turbina não basta a inversão do fluxo, mas também o aumento da altura e do caudal em relação aos dados nominais fornecidos pelo fabricante.

Vários métodos têm sido sugeridos para prever o desempenho duma PaT com base nos dados de desempenho duma bomba na melhor eficiência, mas produzem resultados muito diferentes. Nenhum desses métodos dá uma previsão precisa para todas as bombas; na melhor das hipóteses, apenas obtemos uma primeira estimativa do desempenho da turbina.

Vários autores têm publicado artigos sobre a previsão de desempenho duma turbina utilizando elevados valores de eficiência.

O Método de Viana para seleção de *PaT* (Viana LHPCH-UNIFEI 1987), tornaram possível a dedução de coeficientes experimentais, baseados em ensaios de bombas bombeando água e operando como PaT, que permitem a determinação da altura e da caudal nominal para uma determinada bomba operar como turbina.

Também Chapallaz et al. (1992) realizou estudos onde foram determinados coeficientes experimentais para o cálculo da altura e dos caudais da bomba que irá operar como PaT.

Em 1962, Childs, S. M. (Convert pumps to turbines and recover HP. Hydrocarbon Processing and Petroleum Refiner) indicou que o ponto de melhor eficiência da turbina e o ponto de melhor eficiência de bomba, para as mesmas máquinas, são aproximadamente iguais.

Stepanoff (Centrifugal and axial flow pumps -1957) propôs que a razão entre a altura da queda e o caudal no funcionamento da bomba como turbina estão na proporção inversa do quadrado da eficiência e do rendimento da bomba, respectivamente.

Alatorre-Frenk (The pumps as turbines approach to small hydropower. -1990) apresenta formulações baseadas em equações deduzidas para um número limitado de dados do PAT.

Outras relações foram propostos por Engel [Rücklaufdrehzahlen der Kreiselpumpen. PhD. Thesis, Tech. Hochschule Braunschweig] e Sharma [Small hydroelectric projects- use of centrifugal pumps as turbines. - 1985].

Vários autores publicaram equações que relacionam as relações entre a altura da queda e o caudal para o funcionamento da bomba e da correspondente turbina ou entre a velocidade específica da turbina, como se constata em, por exemplo, Buse [Using centrifugal pumps as hydraulic turbines – 1981]; Lewinsky [Pumpen als Turbinen fur Kleinkraftwerke - 1987] e Grover [Conversion of pumps to turbines -1980].

Burton [Performance prediction of pumps as turbines (PaTs) using the area ratio method.3] estudou a previsão da performance das PaT turbinas que utilizam o ‘método da razão’, que é uma boa ferramenta para a concepção de bombas centrífugas, pelo que o melhor ponto de funcionamento é determinado pela interação do impulsor e das características de voluta. As equações gerais para impulsor e características de voluta no modo PaT são deduzidas e utilizados para se obter o melhor ponto de funcionamento.

Rodrigues [Hydraulic analysis of a pump as a turbine with CFD and experimental data] estudaram a previsão da performance de PaT com Computational Fluid Dynamics (CFD) e os desvios encontrados situam-se dentro de 5% a 10% para a maior parte dos parâmetros analisados (carga total, binário hidráulico, eficiência hidráulica).

Os fabricantes não fornecem qualquer informação sobre as características de desempenho e de fluxo quando as bombas são utilizadas como turbinas. A falta de dados sobre o desempenho da bomba como turbina (PaT) é uma barreira considerável para uma maior utilização de PAT.

Nas últimas duas décadas tem sido feita uma considerável investigação teórica, experimental e computacional no âmbito da utilização de uma bomba hidráulica funcionando em sentido inverso. Tem-se verificado um amplo crescimento na área de Análise de Fluidos Computacional (CFD) ao longo das últimas décadas. Esta tecnologia tem sido amplamente utilizada em várias áreas da engenharia, tais como aviação, mecânica dos fluidos e oceanografia. CFD ajuda a prever o fluxo do fluido através de modelagem matemática, ferramentas de software e métodos numéricos.

Aplicação de CFD é uma tentativa recente para prever o desempenho do sistema PaT. Embora no sistema CFD as predições dos parâmetros hidráulicos se comparam favoravelmente com os resultados experimentais, verificam-se alguns desvios da ordem de 5% a 10%.

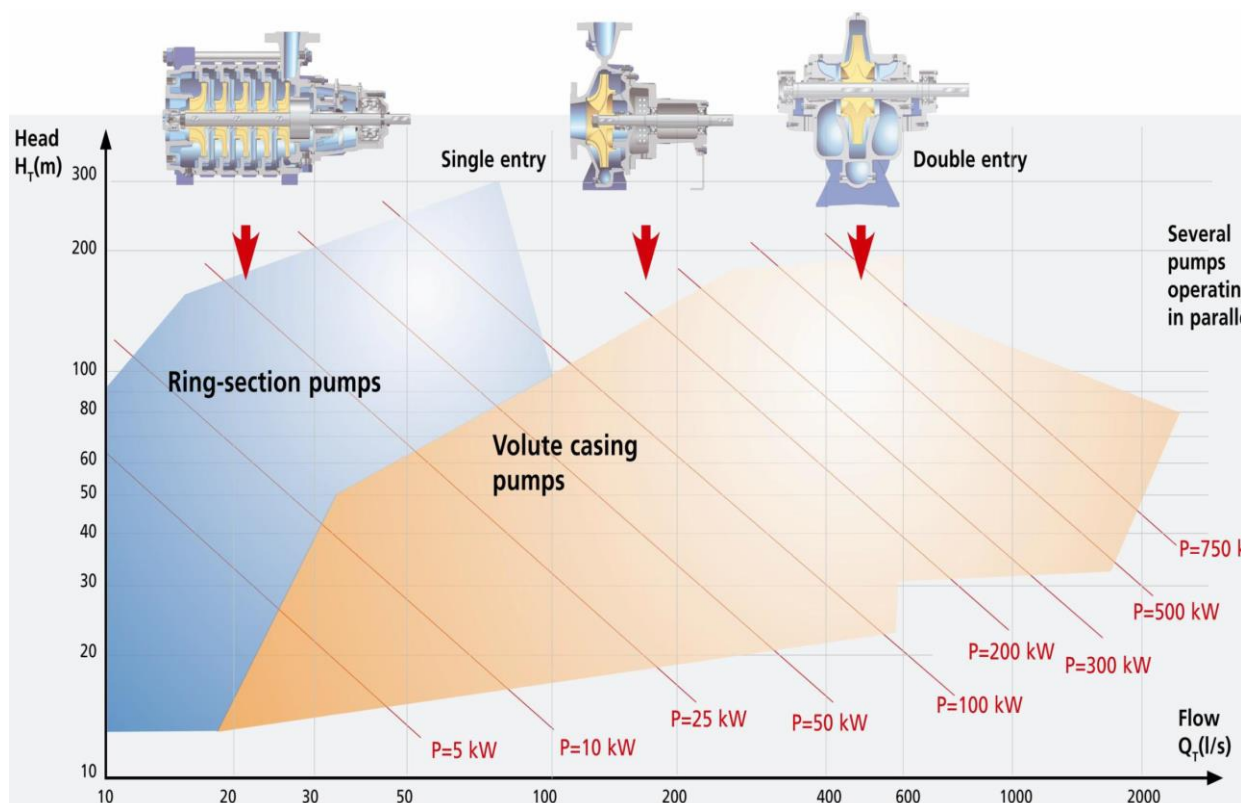
Os casos atrás referidos mostram que a análise de CFD é uma ferramenta de desenho eficiente para prever o desempenho da operação de funcionamento invertido de bombas centrífugas.

Maior experiência em análise computacional também irá ajudar a obter maior convergência dos resultados de CFD com dados experimentais. Futuros trabalhos na área de análise computacional podem melhorar ainda mais a previsão de bombas em utilizadas como PaT.

Atendendo ao amplo espectro de fabrico de bombas podemos encontrar em todas as situações uma solução aceitável para aplicação de **PaT**, em óptimas condições técnico-económicas.

Para ajudar à escolha do tipo de bomba para aplicação **PaT** os fabricantes apresentam um Ábaco (*Gráfico-7.1*) bastante claro e elucidativo que permite, com facilidade, com base no valor da

‘queda útil’ (altura manométrica útil), Caudal e Potência de projecto, escolher a melhor solução PaT relativa ao tipo de bomba.



*Gráfico-7.1 – Ábaco de escolha de PaT (KSB)*

Contudo na escolha deve ser ponderado o grau de segurança e de eficiência resultante do intervalo de funcionamento pretendido.

Para garantir tal, a bomba escolhida deve poder suportar níveis de stress elevados, e todas as peças rotativas devem permitir reversibilidade de funcionamento.

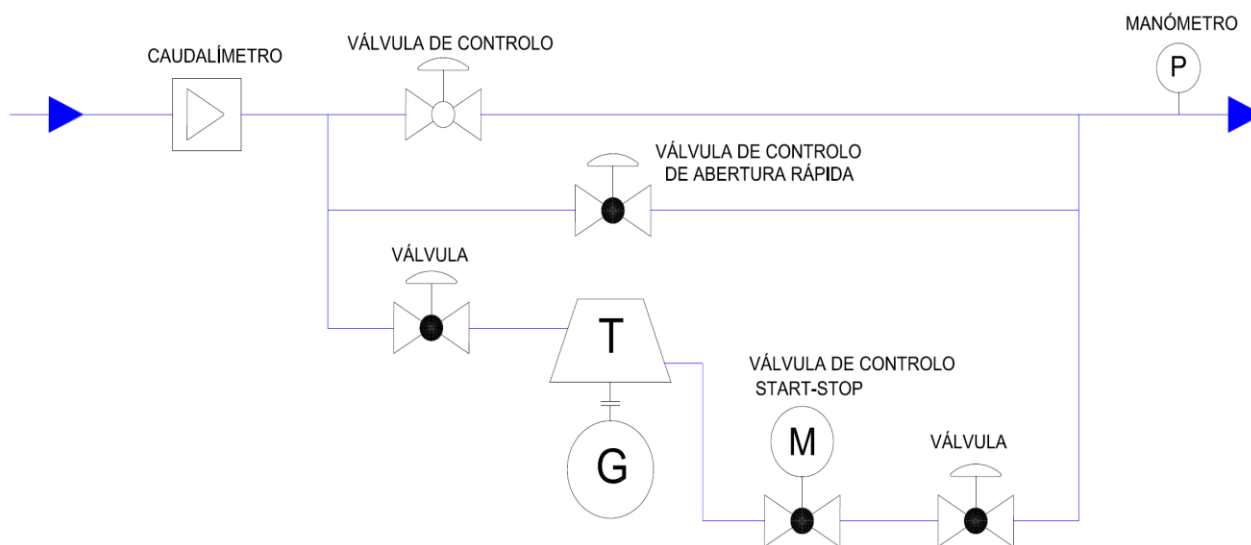
Em caso de ‘rejeição de carga’ (por exemplo, falta de tensão na rede durante a operação), a "turbina" poderá embalar. Por conseguinte, é importante implementar medidas de segurança apropriadas para garantir que tais sistemas não fiquem expostos a cargas excessivas.

Outros factores, como o ‘golpe hidráulico’ (Golpe de Aríete) ou a cavitação na captação, também devem ser devidamente esclarecidos antecipadamente.

Nos cálculos, e por questões de segurança, deve ser prevista uma oscilação de pressão do sistema quando as condições de fluxo são alteradas, por exemplo, através de uma válvula de fecho ou, quando o impulsor/rotor acelera devido a uma falha de energia.

O fenómeno de formação de bolhas de vapor, quando a pressão do sistema desce abaixo da pressão de vapor do fluido, é chamado de cavitação. Apesar do fenómeno de cavitação raramente ocorrer em sistemas PaT, é no entanto importante analisar as condições de pressão do sistema, a fim de excluir completamente esta hipótese. Outros aspectos, como a composição química e temperatura do meio, também são importantes para a selecção de um PaT.

### DIAGRAMA HIDRÁULICO DO SISTEMA PaT



*Diagrama-7.1*

## 8 SISTEMA DE CONTROLE – VELOCIDADE CONSTANTE

O Sistema PaT pode funcionar com velocidade variável ou constante. A opção por velocidade variável é explorar, se possível, todo o potencial energético disponível sem limitações.

Contudo este sistema implica que a Energia Eléctrica não seja produzida à frequência da Rede (50Hz) o que implica que não possa ser injectada directamente naquela, necessitando de ser devidamente ‘filtrada’ e convertida aos valores da Rede.

Uma possibilidade é a instalação de um conversor de frequência de feedback negativo. A combinação conversor-gerador permite a operação com diversas faixas de velocidade. Contudo os conversores de frequência não podem ser aplicados no ‘modo de ilha’ (instalação autónoma).

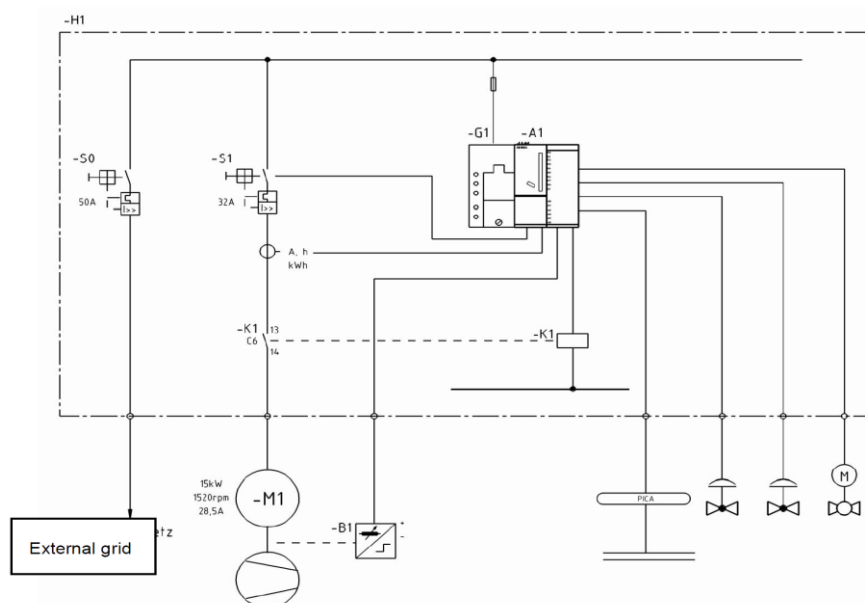
Existem outras soluções tecnológicas para a opção de ‘velocidade variável’ como, p.ex., a aplicação de uma engrenagem de velocidade variável - uma opção dispendiosa e que exige uma

análise avançada de custo eficiência. Com o objectivo de aplicar um sistema PaT mais económico e com a possibilidade de trabalhar para quaisquer que sejam as combinações, e flutuações, de caudais e alturas da queda, há três formas de ajustar o PaT ao seu ponto de funcionamento. Contudo deverá ser previamente esclarecido qual o objectivo da produção: -Injecção na Rede ou Consumo próprio (modo-ilha).

A opção por ‘velocidade-constante’ implica que o Projecto PaT só pode ser projectado para um determinado Caudal e uma determinada Queda útil. O afastamento destes valores diminuirá o rendimento de transformação energia hidráulica – energia eléctrica. Mesmo optando pela instalação de válvulas de estrangulamento e ou implementação de ‘by-pass’ , isto, naturalmente, faz com que parte do potencial de energia seja perdido.

Por outro lado, tais sistemas são tecnicamente simples, facilmente controláveis e, acima de tudo, pouco dispendiosos. A velocidade é mantida por meio da rede de energia existente e em sincronismo com esta, pelo que esta opção não é adequado para o ‘modo-ilha’.

Também é possível a utilização de um gerador síncrono no lugar de um motor assíncrono, dependendo do resultado de uma análise de eficiência de custos. Para operação ilha, o uso de um gerador síncrono é frequentemente o mais utilizado.



**Diagrama-8.1**

**Diagrama Eléctrico e de Controlo do Sistema PaT**

## **9 CONCEPÇÃO E TESTE DO MODELO**

### **9.1 OBJECTIVO**

Num Sistema de Abastecimento de Água Global (captação, armazenamento, distribuição), existe abundante energia excedentária, em alguns casos necessária ao Processo, mas na maioria dos casos supérflua às necessidades.

Num Sistema Hidráulico, a energia associada ao transporte de água nas canalizações manifesta-se sobre a forma potencial (Energia Potencial ou de Posição) função do desnível hidráulico (queda) e sobre a forma cinética (Energia Cinética) função da velocidade adquirida no percurso.

O transporte do fluido de um ponto para outro implica a existência de diferentes pressões nesses pontos. Isto pode ser conseguido através da existência de cotas diferentes (por gravidade) ou por aumento de pressão por processos mecânicos (bombagem).

Estes dois processos podem existir isolados (declive único) ou sequencialmente (perfis acidentados).

Na elevação de água a Energia necessária não pode ser incluída no conceito de excedentária no âmbito de Energia Potencial (energia necessária à elevação). Contudo, a Energia Cinética associada ao caudal num troço gravítico (descendente) de uma conduta, sobretudo se terminal (reservatório), grande parte da energia envolvida é excedentária, no sentido de que será dissipada na recepção sem aproveitamento específico.

Devemos salvaguardar os casos específicos em que a energia cinética final é fundamental para a operacionalidade e rendimento do respectivo Sistema (velocidade; força viva; etc.).

No Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água do Algarve, existem muitas situações que se identificam com o exposto anteriormente, sobretudo na ‘Alta Distribuição’ como é o caso das ETAs (Estação de Tratamento de Águas de Distribuição).

O nosso objectivo é implementar um Conceito Inovador de CMH como vamos descrever.

A Microprodução através do aproveitamento da energia hídrica é recente, e o que conhecemos através da Bibliografia existente cinge-se exclusivamente à aplicação de turbinas acopladas a geradores em condutas ou equipamentos hidráulicos, cuja diversidade abrange

aproveitamento da energia cinética (ou potencial) em pequenas captações fluviais (e outras), ou em redes de abastecimento e/ou de rega, sobretudo de carácter doméstico ou da pequena indústria e até em torneiras devidamente adaptadas.

Pelo exposto, motivou-nos testar, com o objectivo de implementar, um conceito inovador de aproveitamento da energia hídrica excedentária nas condutas de um Sistema de Captação e Distribuição de Águas Sanitárias, através da implementação de Centrais Mini e Micro Hídricas incorporadas nas condutas adutoras a montante de uma Estação de Tratamento de Águas (ETA do Beliche) utilizando o *Sistema PaT*.

## 9.2 CONCEPÇÃO

A Microprodução de Energia Eléctrica através do aproveitamento da energia hídrica é recente, e o que conhecemos através da Bibliografia existente cinge-se exclusivamente à aplicação de turbinas acopladas a geradores (Sistema T+G) em obras hidráulicas em pequenas captações fluviais (e outras), cuja diversidade abrange o aproveitamento da energia cinética em Centrais de Fio-de-Água ou da potencial em Centrais de Albufeira. Também são conhecidas aplicações em redes de abastecimento e/ou de rega, sobretudo de carácter doméstico ou da pequena indústria e, até, em torneiras devidamente adaptadas.

Este trabalho consiste no Projecto e Construção de um CMH incorporada na conduta adutora a montante da Estação de Tratamento de Águas do Beliche (ETA do BELICHE) utilizando o Sistema PaT associado ao Gerador Assíncrono.

Para além da inovação do Sistema PaT em Condutas, a velocidade de funcionamento será a velocidade síncrona (50Hz) o que evitará a necessidade de um Sistema de Conversão (e acumulação).

Pelo exposto, as características técnicas (mecânicas; electromecânicas; eléctricas e electrónicas) do Modelo a implementar possuem três vertentes:

- I. Implementação do Sistema PaT numa Conduta Adutora;
- II. Utilização de Geradores Assíncronos;
- III. Utilização de Sincronizadores para ‘fixar’ a velocidade de sincronismo da Rede (50Hz).

As vantagens do Sistema PaT já foram sobejamente descritos anteriormente, onde destacamos:

- Simplicidade mecânica;
- Robustez;
- Economia (preço e manutenção);
- Alto Rendimento Hidráulico.

Do mesmo modo, a utilização da Máquina Assíncrona como Gerador de Energia Eléctrica, utilizando um ‘binário inverso’, também já foi objecto de uma descrição analítica pormenorizada. Também aqui destacamos:

- Simplicidade tecnológica;
- Robustez electromecânica;
- Economia (preço e manutenção);

A Energia Eléctrica produzida pelo Gerador será injectada directamente na Rede de Distribuição, pelo que a respectiva frequência de geração será 50Hz.

Isto conseguir-se através da implementação de Sincronizadores (especificados no texto) que através de Sensores (Sistema Encoder) acoplados aos veios dos respectivos grupos regulam em tempo real a velocidade dos grupos.

A aplicação de Sincronizadores para fixação da velocidade de sincronismo á Rede evita a necessidade de conversão ‘*tensão não síncrona- tensão continua- tensão síncrona (alternada 50Hz)*’ e a necessária componente de acumulação-estabilização (bateria de acumuladores).

Os Cálculos efectuados (e já descritos) e os Testes realizados preliminarmente indicaram as características óptimas dos equipamentos a utilizar (Bomba-Turbina e Motor-Gerador).

Contudo deverá haver um compromisso (como já referimos anteriormente) entre o Regime de Funcionamento da ETA e o funcionamento da CMH. De facto a ETA está integrada no Sistema de Produção-Distribuição e tem que satisfazer as necessidades do mesmo. Simultaneamente, a CMH deverá trabalhar em ‘pontos de funcionamento’ de rendimento máximo ou próximo deste. É esta situação de compromisso que tem de ser observada, apesar da CMH ter sido dimensionada para poder funcionar em segurança na gama dos caudais da ETA.

Pelos Testes desenvolvidos verificamos que o ‘rendimento máximo’ do PaT situa-se no intervalo de caudais entre os 40 l/s e os 50 l/s.

Atendendo a que a capacidade máxima de Produção da ETA situa-se entre os 100 l/s e os 120 l/s, optou-se pela instalação de dois grupos com uma capacidade de 50 l/s cada, sendo o ponto de rendimento máximo de 45 l/s (vide testes).

Como já foi referido, a ETA pode trabalhar com quaisquer Caudais (0 a 110 l/s), contudo a CMH só estará a produzir com alto rendimento com caudais próximo de 45 l/s ou de (45+45) l/s= 90 l/s.

Para tirar o máximo rendimento do Sistema está em fase de experimentação a fixação de dois escalões de Caudais próximos daqueles valores. Devemos esclarecer que isto é possível porque a ETA do Beliche integra-se no Sistema de Abastecimento da ETA de Tavira, permitindo diversificar os 'set-point' de regulação.

### **9.3 TESTE DA MICRO-TURBINA**

#### **9.3.1 OBSERVAÇÕES**

Como já foi referido o 'know-how' prático existente sobre o Sistema PaT é essencialmente empírico. Isto não contradiz o que já foi referido sobre a multiplicação de estudos existentes sobre a procura de Modelos que com base nos dados de uma Bomba se conclua sobre o seu uso como Turbina. De facto muito se tem avançado sobre 'generalizações teóricas' e as conclusões são de facto promissoras. Contudo, como os fabricantes ainda não fornecem dados sobre a PaT, cada caso é uma caso.

Consequentemente, e atendendo a que a obra envolvida requeria algumas certezas de âmbito técnico-económico, após o dimensionamento analítico preliminar procedemos a uma simulação nas instalações da ETA de Tavira, onde foram criadas boas condições práticas e segurança para a experiência. O objectivo é analisar os resultados resultantes dos estudos realizados sobre a Bomba escolhida, a funcionar como Micro-Turbina, instalada e testada na ETA de Tavira, de modo a simular o Potencial Hidroeléctrico existente na ETA do Beliche e verificar respectiva viabilidade de uma instalação futura nesse mesmo local.

#### **9.3.2 DADOS E PARÂMETROS**

- Cota média do espelho de água da Barragem → 44,6 m
- Cota da ETA (projecto) → 25,3 m
- Cota da Instalação da Turbina → 21,3 m
- Perda de carga da válvula monovar → ± 0,2 m.c.a.

CENTRAL MICRO-HÍDRICA INCORPORADA EM CONDUTA ADUTORA

- Perda de Carga da Tubagem:

DN 800 (475m)	± 1,5 m.c.a.
DN500 (456m)	

- Cota útil a turbinar →  $44,6 - (25,3 + 0,2 + 1,5) = 17,6 \text{ m}$
- Caudal a Turbinar →  $50 \text{ l/s} = 0,050 \text{ m}^3/\text{s} = 180 \text{ m}^3/\text{h}$

Potência cedida pelo escoamento à Turbina:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_u \dots\dots\dots(9.1)$$

Onde:

P – Potência Hidráulica (W)

$\rho$  – Massa específica ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

g – Aceleração gravítica ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

Q – Caudal Turbinado ( $\text{m}^3/\text{s}$ )


$H_u$  – Queda útil, que é a diferença de cargas nas secções de entrada e de saída da turbina (m)

...donde:

$$P = 8632 \text{ W} = 8,63 \text{ kW}$$

**9.3.3 MINTURBINA A TESTAR (BOMBA)**

A Miniturbina escolhida é da marca KSB modelo ETANORM 100-200 para um caudal nominal de 3500 l/mn (58 l/s), cujas características de interesse estão explicitas a seguir:

Baureihe-Größe Type-Size Modèle	Tipo Serie Tipo	Nennzahl Nom. speed Vitesse nom.	Velocità di rotazione nom. Nominaal toerental Revolutions nom.	Lauftrad-ø Impeller Dia. Diamètre de roue	ø Girante ø Waaijer ø Rodete	 <b>KSB</b>
Etanorm 100-200		3500 1/min				
Projekt Project Projet	Progetto Projekt Projecto	Angebots-Nr. Project No. No. de l'offre	Offerta-No. Offertenr. Offerta-No.	Pos.-Nr. Item No. No. de pos.	Pos.-Nr. Positiernr. Pos.-Nr.	

**Etanorm SYT 100-160, 100-200**

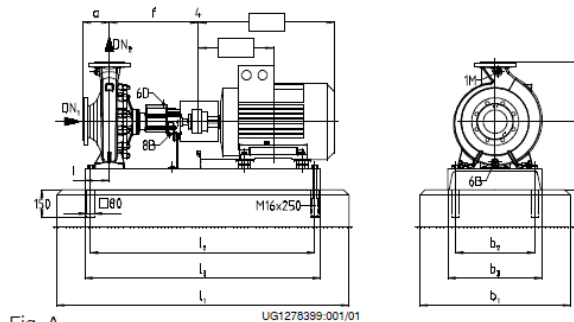




Fig. A

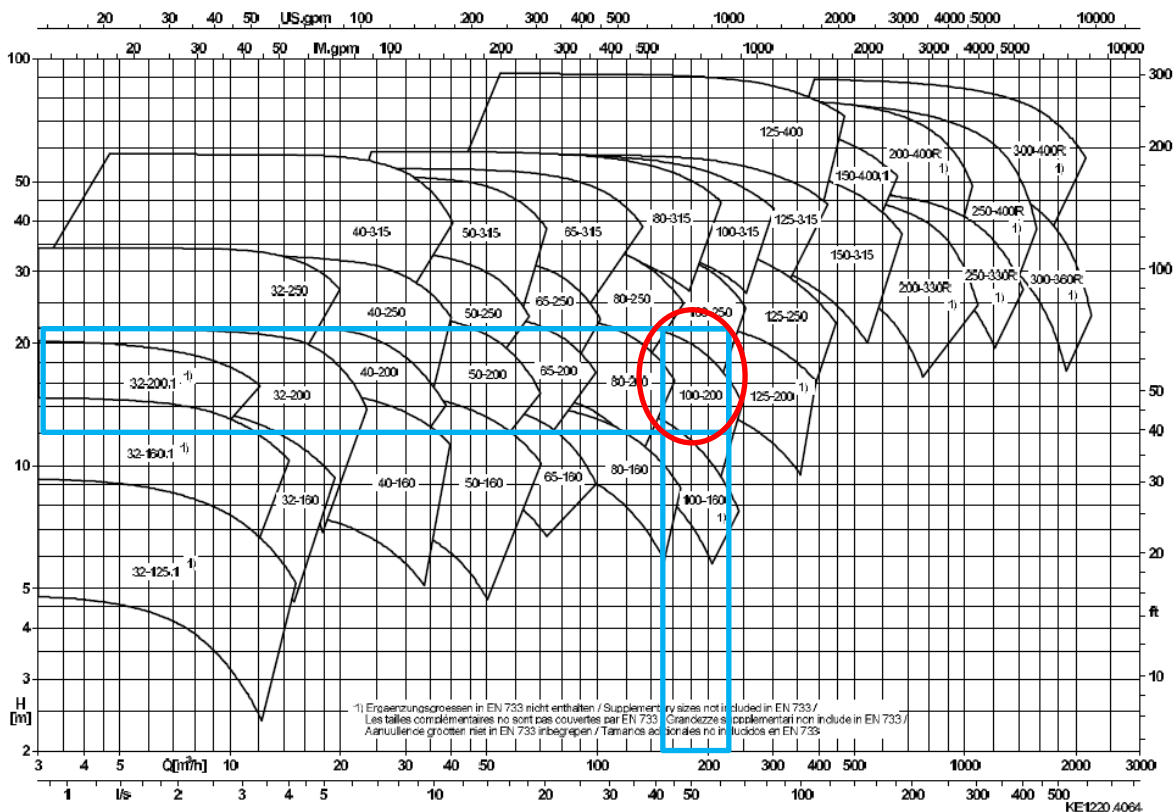
UG1278389-001/01

**CENTRAL MICRO-HÍDRICA INCORPORADA EM CONDUTA ADUTORA**

Etanorm SYT	Motor 1 / min kW				Fig.																					
	1450	1750	2900	3500		Sizes														l <sub>1</sub>	l <sub>2</sub>	l <sub>3</sub>	l <sub>1</sub>	l <sub>2</sub>	l <sub>3</sub>	x
	DN <sub>1</sub>	DN <sub>2</sub>	a	b <sub>1</sub>		b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	f	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	i															
100-160	3.0	-	-	-	100L	A	125	100	125	550	320	400	470	310	280	130	1150	940	1000	1400	1190	1250	140			
	4.0	-	-	-	112M	A	125	100	125	550	320	400	470	310	280	130	1150	940	1000	1400	1190	1250	140			
	-	5.5	-	-	132S	A	125	100	125	550	320	400	470	310	280	130	1150	940	1000	1400	1190	1250	140			
	-	7.5	-	-	132M	A	125	100	125	550	320	400	470	310	280	130	1150	940	1000	1400	1190	1250	140			
	-	-	22.0	-	180M	A	125	100	125	550	320	400	470	310	280	130	1400	1190	1250	1570	1360	1420	140			
	-	-	30.0	-	200L	A	125	100	125	550	320	400	470	310	280	130	1400	1190	1250	1570	1360	1420	140			
	-	-	37.0	37.0	200L	A	125	100	125	550	320	400	470	310	280	130	1400	1190	1250	1570	1360	1420	140			
	-	-	-	45.0	225M	B	125	100	125	750	550	590	470	365	280	130	1550	940	1400	1550	940	1400	140			
	-	-	-	55.0	250M	B	125	100	125	810	600	650	470	390	280	130	1750	1060	1600	1750	1060	1600	140			
	-	-	-	75.0	280S	B	125	100	125	880	670	720	470	420	280	130	1750	1060	1600	1750	1060	1600	140			
100-200	4.0	-	-	-	112M	A	125	100	125	550	320	400	470	310	280	130	1150	940	1000	1400	1190	1250	140			
	5.5	-	-	-	132S	A	125	100	125	550	320	400	470	310	280	130	1150	940	1000	1400	1190	1250	140			
	7.5	7.5	-	-	132M	A	125	100	125	550	320	400	470	310	280	130	1150	940	1000	1400	1190	1250	140			
	-	11.0	-	-	160M	A	125	100	125	550	320	400	470	310	280	130	1400	1190	1250	1570	1360	1420	140			
	-	15.0	-	-	160L	A	125	100	125	550	320	400	470	310	280	130	1400	1190	1250	1570	1360	1420	140			
	-	-	30	-	200L	A	125	100	125	550	320	400	470	310	280	130	1400	1190	1250	1570	1360	1420	140			
	-	-	37	-	200L	A	125	100	125	550	320	400	470	310	280	130	1400	1190	1250	1570	1360	1420	140			
	-	-	45	-	225M	B	125	100	125	750	550	590	470	365	280	130	1550	940	1400	1550	940	1400	140			
	-	-	55	-	250M	B	125	100	125	810	600	650	470	390	280	130	1750	1060	1600	1750	1060	1600	140			
	-	-	75	75	280S	B	125	100	125	880	670	720	470	420	280	130	1750	1060	1600	1750	1060	1600	140			
-	-	-	90	280M	B	125	100	125	880	670	720	470	420	280	130	1750	1060	1600	1750	1060	1600	140				
-	-	-	110	315S	B	125	100	125	940	730	780	470	455	280	130	1800	1100	1650	1800	1100	1650	140				

DN = EN 1092-2/DN.../PN 16/21/JS1025/B

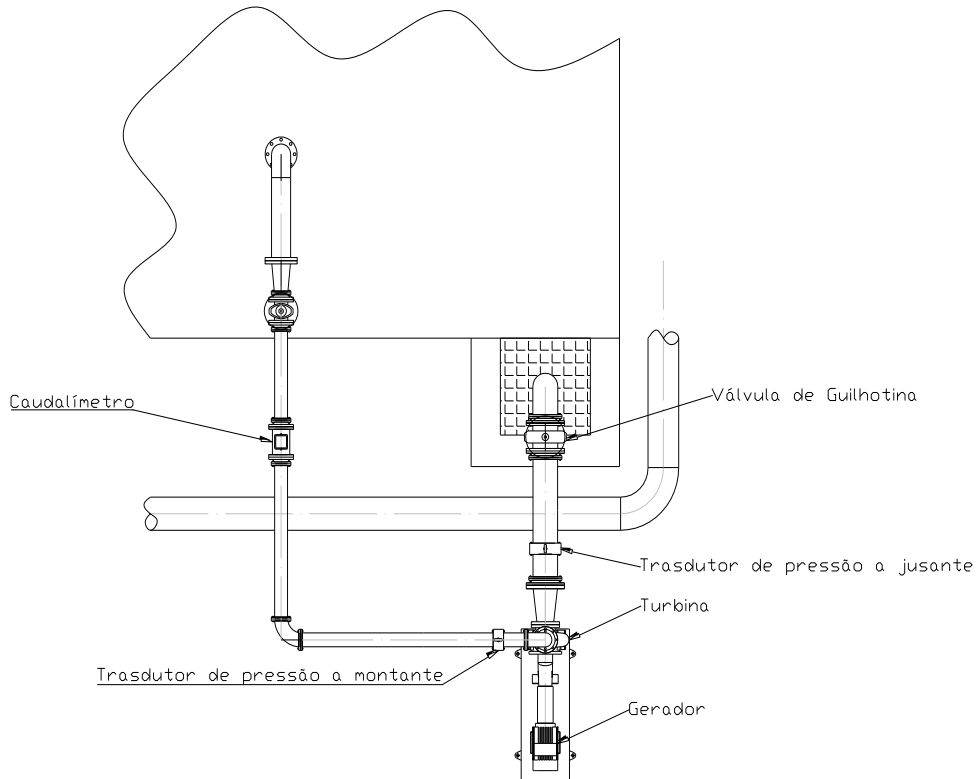
**Fig.-9.1 – Miniturbina (PaT) e Características (KSB)**



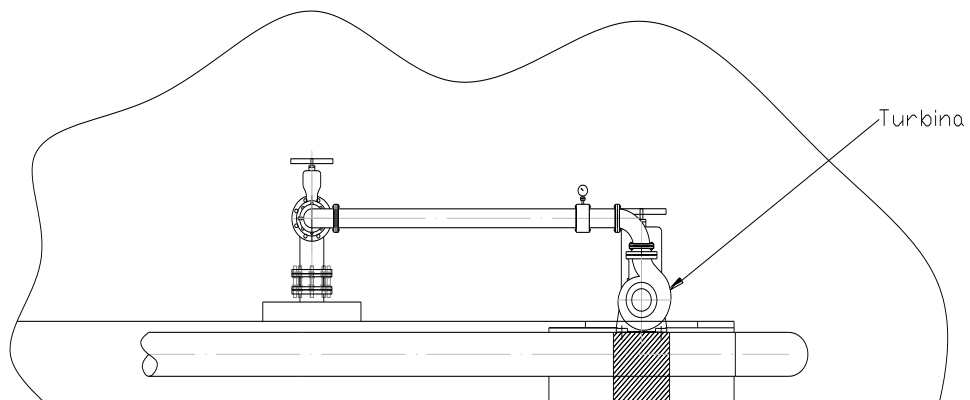
**Gráfico-9.1 – Ábaco de Quedas versus Caudais – Escolha da Turbina**

### 9.3.4 Instalação na ETA de Tavira para simulação da ETA do Beliche

Os ensaios pretenderam criar as condições físicas e hidráulicas de modo a simular a instalação na ETA do Beliche, tentando-se, assim, uma aproximação o mais real possível às condições existentes nessa situação, relativamente ao seu potencial hidroeléctrico, com simulação do caudal e altura a montante e a jusante da turbina.



**Fig. -9.2 – Vista de Cima da Instalação para o ensaio da Micro-Turbina**



**Fig.-9.3 – Vista de Frente da instalação para o ensaio da Micro-Turbina**

CENTRAL MICRO-HÍDRICA INCORPORADA EM CONDUTA ADUTORA

<b>Valores estipulados para a simulação</b>	
<b>Caudal</b>	<b>50 l/s</b>
Pressão a Montante da Turbina	2,06 Bar (20,6m)
Pressão a Jusante da Turbina	0,3 Bar (3m)
Pressão Real Turbinável	1,76 Bar (17,6m)

*Tabela 9.1 – Valores pretendidos para simular a instalação na ETA do Beliche*



*FIG.9.4*



*FIG.9.5*



*FIG.9.6*



*FIG.9.7*

*Fotos Grupo 1 - ESTALEIRO DE TESTES DA PaT (ETA Tavira)*

### 9.3.5 Testes e Ensaio Realizados

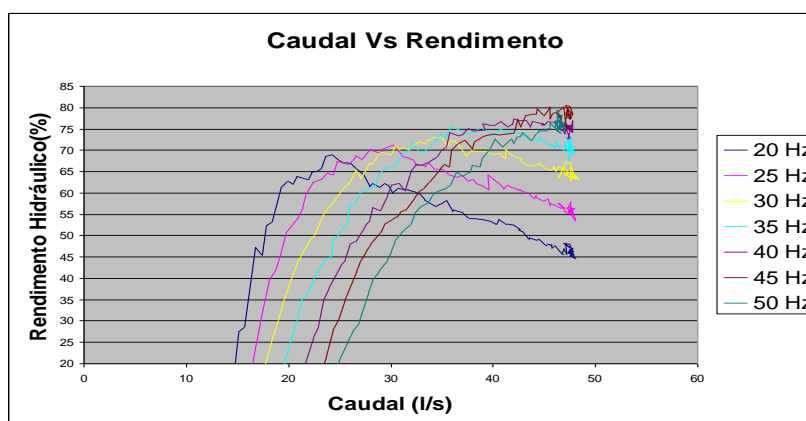
Para simular a Barragem (do Beliche) foi utilizada uma electrobomba submersível (1.1 kW) controlada por um variador de frequência.

A electrobomba aspirava num tanque e através do variador de frequência ajustou-se a pressão (lida no transdutor a montante) de modo a simularmos a Altura de queda e o caudal pretendidos.

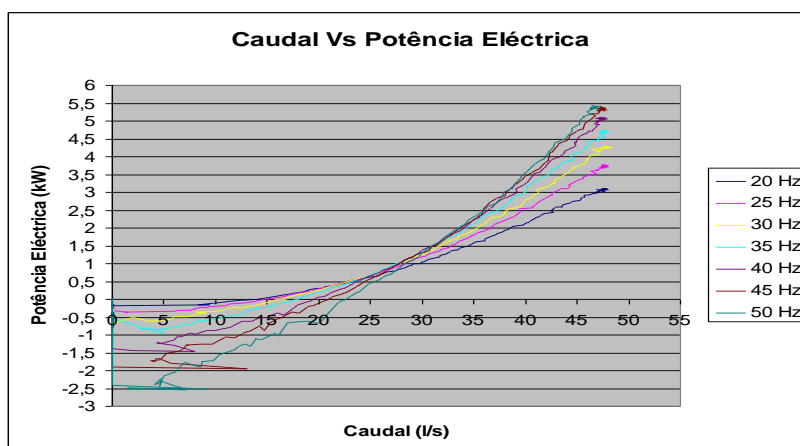
Após vários ensaios verificamos que com essa mesma electrobomba submersível não era possível atingir os pontos pretendidos (*Tabela 9.2*). Logo, os ensaios realizados ficaram limitados aos pontos máximos dados pela Bomba submersível.

Efectuámos vários ensaios de modo a verificarmos qual seria a frequência de rotação ideal da bomba-turbina para este tipo de instalação (ETA do Beliche).

Estes ensaios foram realizados sem pressão a jusante da turbina.



*Gráfico 9.2 – Resultados da análise para frequência de rotação ideal (Caudal VS Rendimento)*



*Gráfico 9.3 – Resultados da análise para frequência de rotação ideal (Caudal vs Potência Eléctrica)*

Após vários ensaios verificou-se que a frequência ideal seria de 50Hz (1500 r.p.m.), como seria de esperar.

Obtendo para a rotação de 1500r.p.m. os seguintes valores máximos correspondentes:

Caudal (l/s)	Pressão a Montante (Bar)	Pressão a Jusante (Bar)	Altura da Queda (m)	Potência Eléctrica (kW)	Rendimento Hidráulico (%)
46,45	1,6	0	16	5,436	74,89

***Tabela 9.2 – Valores do ensaio com a rotação de 1500 r.p.m., sem pressão a jusante da Turbina***

Obtida a rotação ideal para a nossa Turbina, passámos a realizar os ensaios, simulando a instalação na ETA do Beliche, aproximando-nos o mais possível dos pontos pretendidos (***Tabela 9.1***).



***FIG.9.8***



***FIG.9.9***

***Fotos Grupo 2 - ESTALEIRO DE TESTES DA PaT (ETA TAVIRA)  
Quadro de Comando e localização protegida (chuva)***

### 9.3.6 ANÁLISE DE RESULTADOS

#### 9.3.6.1 Simulação da instalação na ETA do Beliche

Neste ensaio de simulação pretendemos obter uma pressão, a jusante da Turbina, aproximadamente de 0,3 bar, de modo a simular uma altura de 3m referentes ao desnível da cota da Turbina e a entrada na ETA do Beliche.

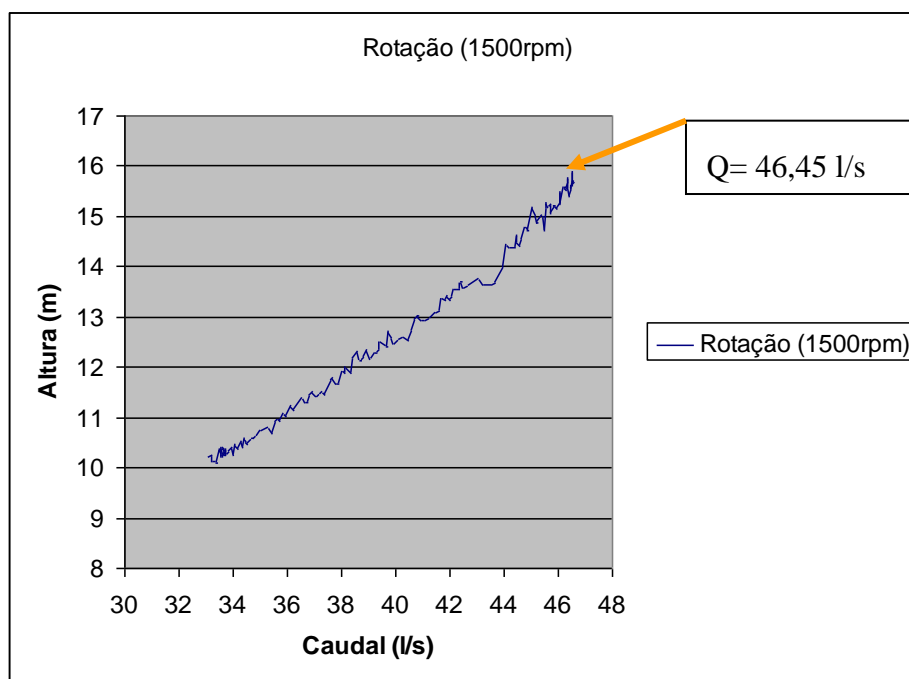
Pontos máximos realizados pela Bomba submersível que simulou a Barragem:

Caudal (l/s)	Pressão a Montante (bar)	Pressão a Jusante (bar)	Altura da Queda (m)	Potência Eléctrica (kW)	Rendimento Hidráulico (%)
46,493	1,868	0,2986	15,69	5,428	76,37

*Tabela 9.3 – Valores máximos atingidos nos ensaios de simulação*

#### 9.3.6.2 Caudal vs Altura

Neste gráfico observa-se a curva da instalação, onde só nos foi possível testar e analisar a turbina até aos valores máximos correspondentes de  $Q=46,45$  l/s e  $H=16$  m.

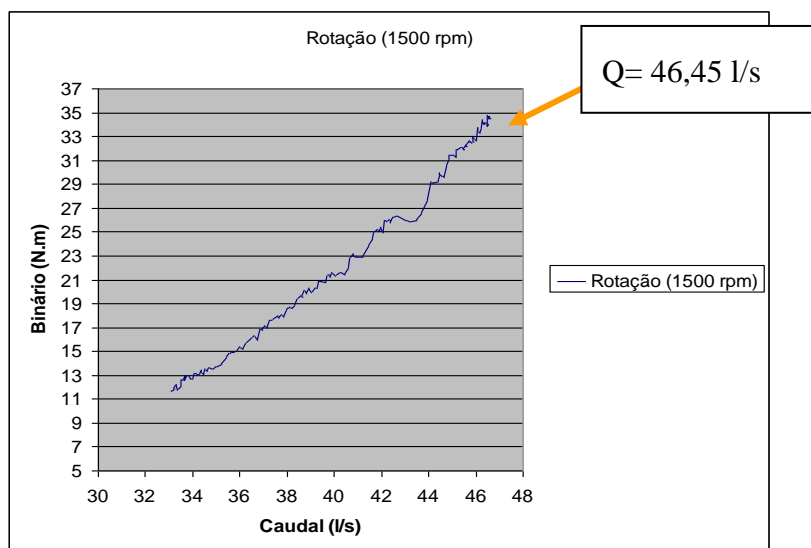


*Gráfico 9.4 – Simulação da ETA do Beliche: Curva <math>Q</math> vs <math>H</math>*

Com estes dados verifica-se que estamos a realizar os nossos ensaios com 92,9% do Caudal Total e com 89,14% da Altura Total disponível na ETA do Beliche.

### 9.3.6.3 Caudal em função do Binário

O gráfico seguinte representa a curva de evolução do binário no veio da Turbina, à medida que se aumenta o caudal e a altura.

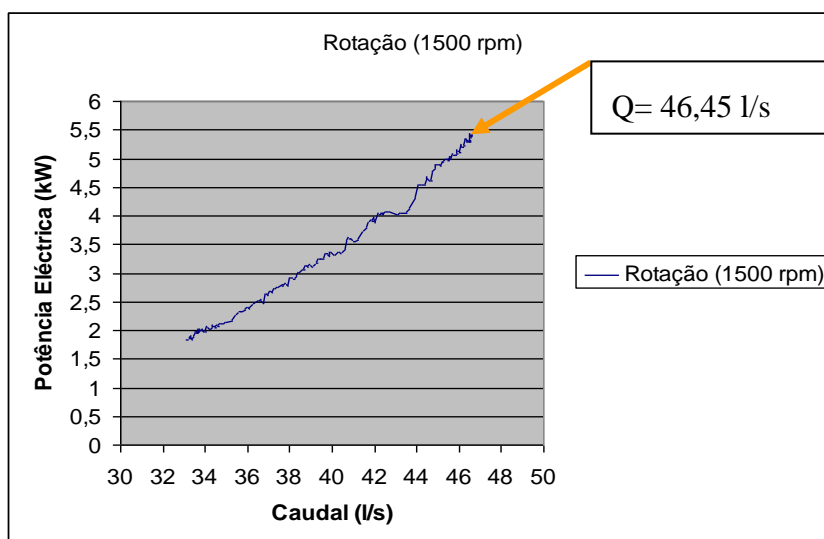


**Gráfico 9.5 – Simulação da ETA do Beliche: Curva <> Binário**

O Binário máximo obtido no veio da Turbina para esta rotação de 1500r.p.m., foi de 34,8 N/m.

### 9.3.6.4 Caudal vs Potência Eléctrica

Neste gráfico observa-se o valor da curva de Potência Eléctrica produzida em função do aumento de caudal, sem esta nunca atingir um patamar limite até ao ponto máximo que nos foi possível analisar. Podendo deduzir-se que, para os valores Hidráulicos pretendidos (*Tabela 9.1*), iria atingir-se um valor de Potência eléctrica superior ao testado na simulação.

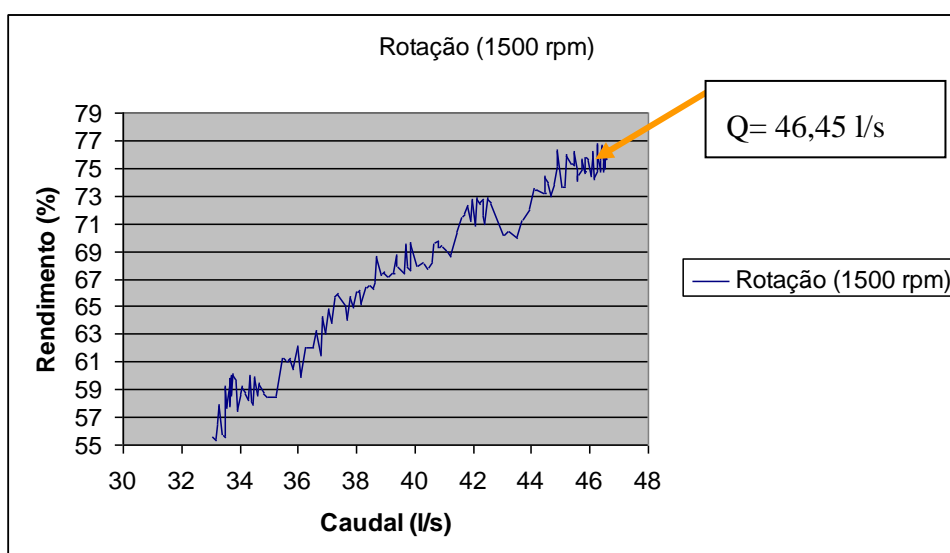


**Gráfico 9.6 – Simulação da ETA do Beliche: Curva <> Potência Eléctrica**

### 9.3.6.5 Caudal vs Rendimento Hidráulico

Através do gráfico seguinte podemos analisar o rendimento hidráulico obtido até ao ponto analisado, apresentando este um rendimento muito satisfatório ( $\eta = 76,37\%$ ).

Os ressaltos verificados no gráfico devem-se ao tempo de gravação dos dados ter sido reduzido, não dando tempo suficiente ao escoamento para estabilizar dando origem a variações nas leituras dos sistemas de medida.



*Gráfico 9.7 – Simulação da ETA do Beliche: Curva <> Rendimento Hidráulico*

### 9.3.7 Conclusão

Com a simulação realizada e atrás descrita verificamos que os resultados obtidos encontram-se no intervalo de valores esperados e desejados.

A Bomba-Turbina Hidroelétrica ensaiada produz a Potência Elétrica por nós esperada, apresentando um bom rendimento hidráulico.

Foi-nos possível verificar, através das curvas de rendimento e de potência, que uma grande variação no caudal provocará uma conseqüente alteração na Potência Elétrica.

Podemos também observar que não chegamos a atingir o ponto máximo de funcionamento para esta Turbina, devido a ter-nos faltado altura e caudal para simularmos a barragem a montante

da turbina. Ao analisarmos os gráficos obtidos, verificamos que nunca chegamos a um ponto de queda no gráfico respectivo ao rendimento hidráulico, podendo este vir a ter valores superiores aos verificados.

Concluímos que esta Micro-Turbina poderá produzir um pouco mais de Potência Eléctrica do que a que obtivemos através desta simulação, verificando-se que perfaz os objectivos idealizados nesta situação.

#### **9.4 GERADOR ASSÍNCRONO A VELOCIDADE CONSTANTE**

No item-7 desenvolvemos a teoria do princípio de funcionamento da máquina assíncrona com base na dedução dos respectivos Esquema Equivalente e Diagrama do Circulo.

Para além da intenção de uma abordagem teoricamente avançada sobre o tipo de Gerador escolhido (máquina assíncrona), tivemos o propósito de deduzir o Diagrama do Circulo como ferramenta de grande utilidade na análise do comportamento da máquina assíncrona em todos os cenários (motor; gerador; variador de frequência).

O *Diagrama-9.8* dá-nos um exemplo da aplicação deste diagrama para um caso semelhante ao que está em questão mas com a (grande) diferença que o Gerador funciona com um escorregamento negativo de 5% e portanto não gera em sincronismo com a rede.

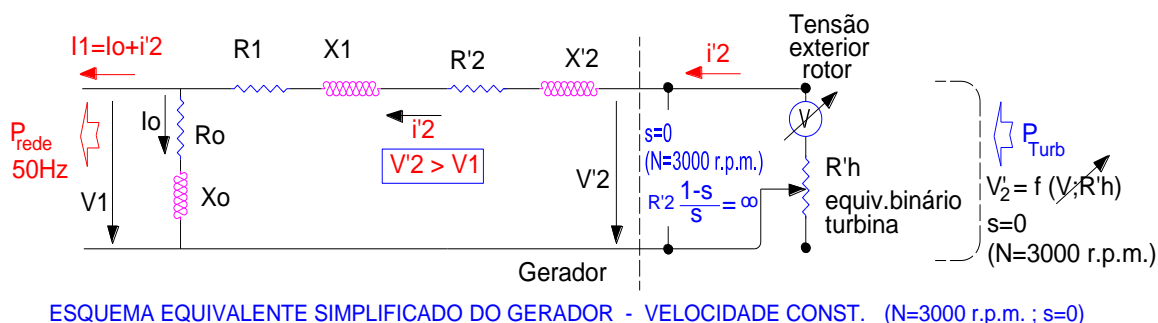
No diagrama exemplifica-se o que atrás dissemos pois indica as informações que podemos obter por leitura directa (vide quadro incorporado).

Contudo, a CMH deste trabalho tem a particularidade do Gerador Assíncrono funcionar a velocidade constante e em sincronismo com a Rede ( $N=1500$  r.p.m. / 50Hz). Isto é, com escorregamento nulo ( $s=0$ ).

Como se pode observar no diagrama, esta situação corresponderia a que o ‘ponto P’ coincidissem com o ‘ponto-A’ ( $s=0$ ) e, nesse caso,  $I'_2=0$ , isto é, não havia produção (quer eléctrica quer mecânica, salvo as perdas).



A ‘corrente de regulação de fluxo’  $\langle i'_2 \rangle$  tem origem na Fonte de Tensão (pressuposta) e o binário motriz da Turbina está representada por uma resistência equivalente  $R'h$ . O valor da tensão  $V'_2$  será superior ao valor  $V_1$  pelo que o fluxo de energia será do rotor para o estator (Gerador)



**Fig.-9.11**

Constata-se que o Esquema Equivalente da **Fig.9.11** não corresponde ao que serviu de base ao Diagrama do Circulo da Máquina Assíncrona devido a duas alterações:

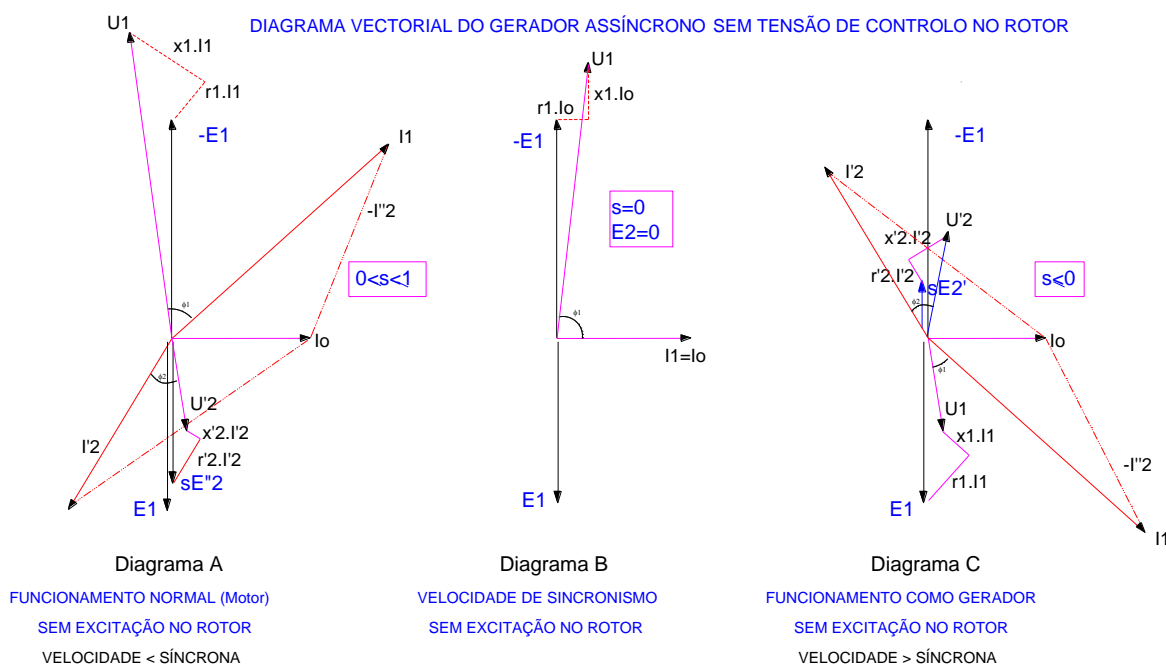
- Máquina a velocidade constante e síncrona ( $s=0$ );
  - O Diagrama do Circulo fundamenta-se na variável ‘s’.
- Tensão de Regulação aplicada ao rotor (regulação da corrente do rotor).

Nestas circunstâncias o Diagrama Vectorial aproxima-se do correspondente aos Geradores Síncronos.

Nos Diagramas Vectoriais A, B e C , indicados no **Diagrama-9.9**, e por uma questão de possibilitar uma compreensão comparativa, indicamos os três estados de funcionamento (relativamente ao escorregamento) sem excitação no rotor:

- Diagrama Vectorial A:
  - Funcionamento da Máquina Assíncrona como Motor Assíncrono, que é a utilização mais frequente e que corresponde a um escorregamento entre 0 e 1.
- Diagrama Vectorial B:
  - Funcionamento da Máquina Assíncrona trabalhando à velocidade de sincronismo (escorregamento igual a 0). Neste caso a Máquina apenas consome a energia necessária para compensar as perdas.
- Diagrama Vectorial C:
  - Funcionamento da Máquina Assíncrona como Gerador Assíncrono, a que corresponde a um escorregamento negativo. A máquina transforma a energia

mecânica recebida no seu veio em energia eléctrica no estator (observe-se a inversão das correntes e tensões).



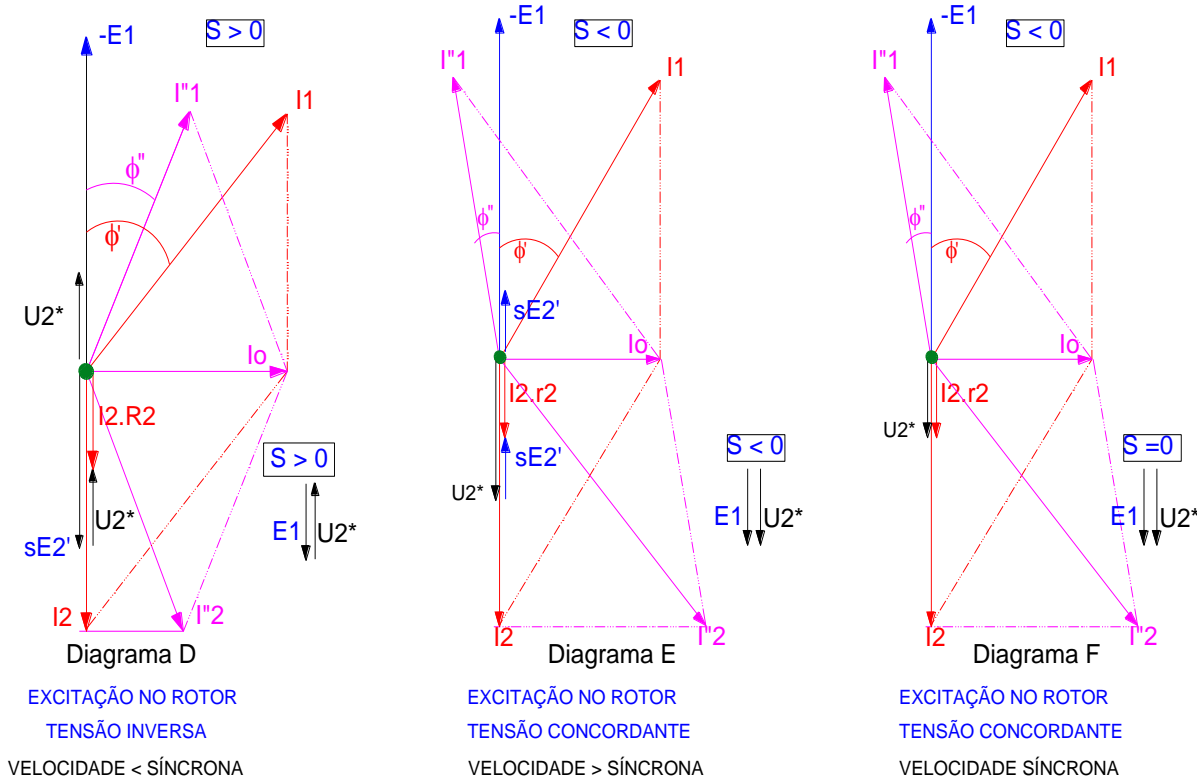
### *Diagrama-9.9*

Nos Diagramas vectoriais D, E e F , indicados no *Diagrama-9.10*, e pelas mesmas razões, indicamos os três estados de funcionamento (relativamente ao escorregamento) no caso de haver excitação no rotor:

- Diagrama Vectorial D:
  - Funcionamento da Máquina Assíncrona com tensão inversa aplicada no rotor. Gera-se um binário resistente que tende a aumentar o escorregamento (travão).
- Diagrama Vectorial E:
  - Funcionamento da Máquina Assíncrona com tensão concordante aplicada no rotor. O binário resistente diminui e tende a aumentar a velocidade (menor escorregamento).
- Diagrama Vectorial F:
  - Funcionamento da Máquina Assíncrona com uma velocidade constante e síncrona. Isto consegue-se através do controlo das duas situações anteriores (D e E). Neste caso está sempre associado um Sistema de Controlo

Retroactivo, com base em sensores de sincronismo, que permite o controlo electrónico do funcionamento síncrono (escorregamento nulo).

DIAGRAMA VECTORIAL DO GERADOR ASSÍNCRONO COM TENSÃO DE CONTROLO NO ROTOR ( $U_2^*$ )



**Diagrama-9.10**

## 10 MODELO FINAL

### 10.1 OBSERVAÇÕES

Esta obra insere-se na política adoptada pela Administração de Águas do Algarve, S.A. no âmbito da exploração de Energias Renováveis (utilização e venda) e teve início em Fev-2008 tendo sido ligada à Rede em Dez-2010, coincidindo com o decorrer do nosso curso de Mestrado (2009-2011).

A nossa intervenção foi permanente ao longo deste período integrado no Gabinete de Gestão (GE) da Direcção de Infraestruturas (DIN) de Águas do Algarve, S.A.

Na apresentação do Modelo Final descreveremos separadamente as Instalações de acordo com as suas características específicas.



Fig.-10.1



Fig.-10.2

Fotos Grupo 3 - ETA DO BELICHE (Topo)

## 10.2 INSTALAÇÃO HIDRÁULICA

Na figura seguinte (vide também anexo) esquematizamos sucintamente a Instalação Hidráulica global da CMH.

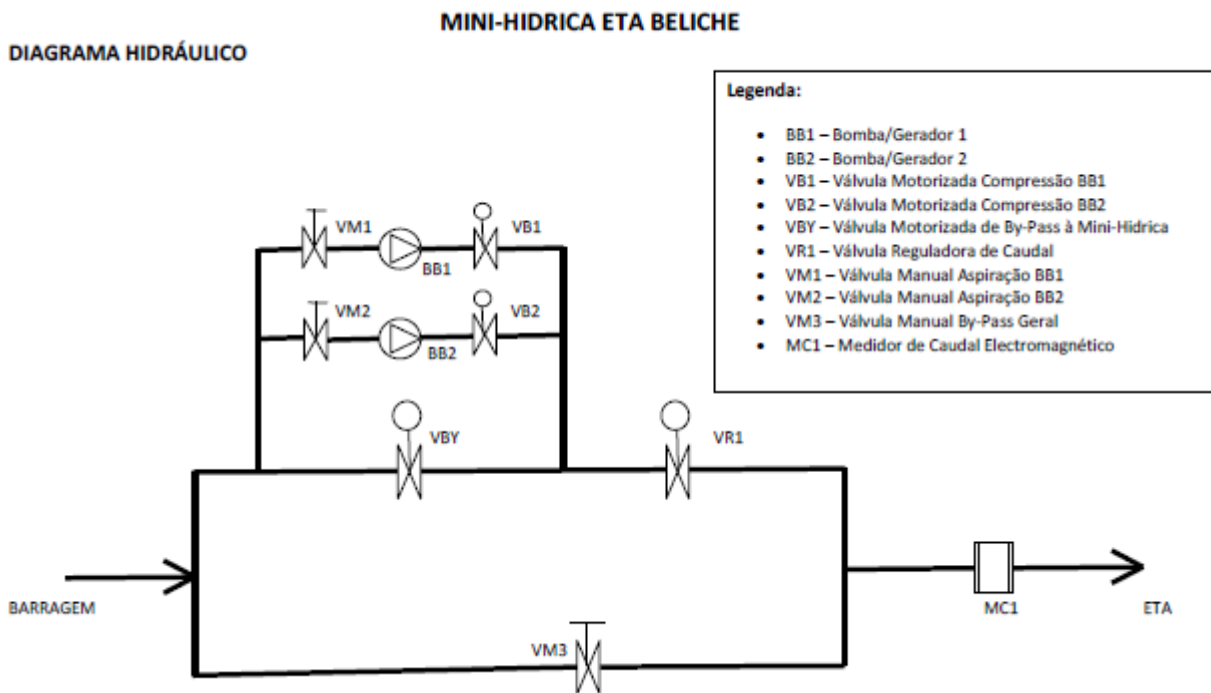


Diagrama-10.1

### 10.3 INSTALAÇÃO ELECTROMECÂNICA

Estas Instalações são constituídas por:

- Quadro Eléctrico de Classe II com painel frontal e porta, que protege e alimenta os seguintes equipamentos:
  - Autómato Siemens S7-200
  - Válvula Reguladora Belgicast PN10 DN200;
  - Válvula Motorizada Motor VB1 PN10 DN100;
  - Válvula Motorizada Motor VB2 PN10 DN100;
  - Válvula Motorizada By-Pass.
  - Tomadas e Iluminação



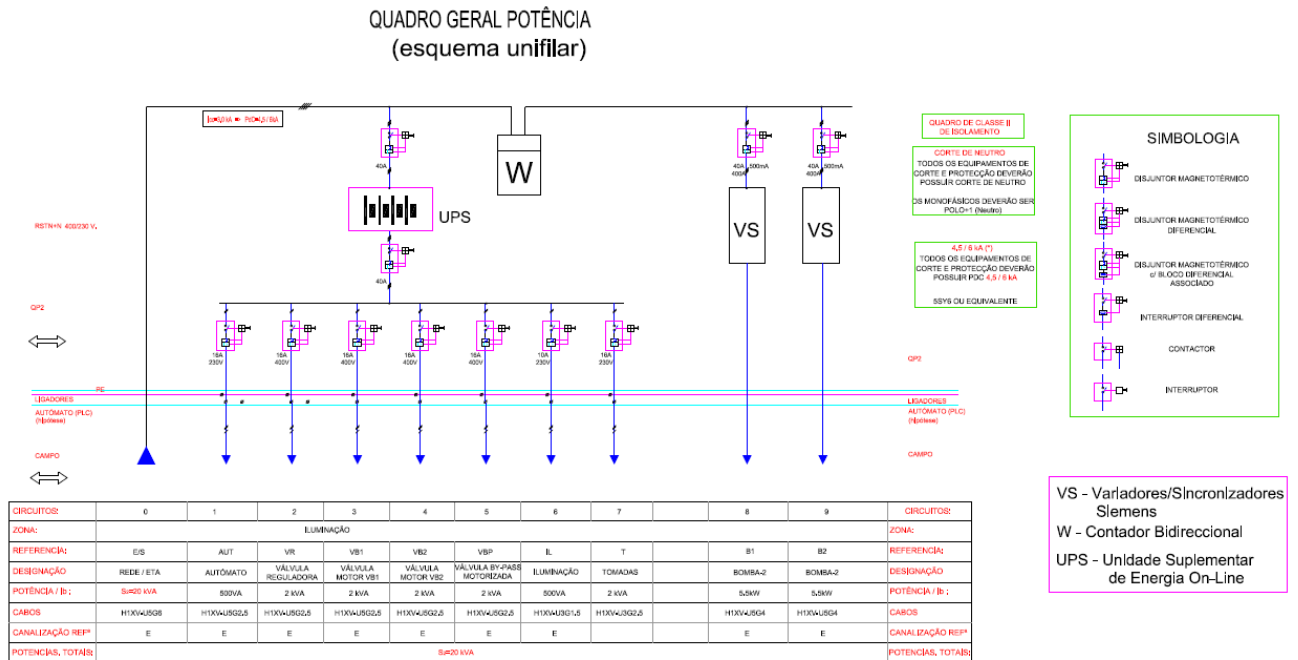
*Fig.-10.3*



*Fig.-10.4*

*Fotos Grupo 4 - ETA DO BELICHE (Quadro de Controlo da CMH e Fibra Óptica)*

**CENTRAL MICRO-HÍDRICA INCORPORADA EM CONDUTA ADUTORA**



**Diagrama-10.2**

- Unidade de Alimentação Socorrida (**UPS**)
- Variadores-Sincronizadores (2+1) Siemens 6SL3225-0BE27-5AA1
- Controlador do Sincronizador (2+1) Siemens 6SL3244-0BA20-IPA0
- Válvula Monovar com actuador ‘Sipos’ modelo 5 Flash, 400V-50Hz. refª. 10CFEA11166/JR (esta válvula é comandada pelo Autómato da ETA)
- Máquinas Assíncronas (2+1) Siemens 1LA91304KA60-Z:

**Datos eléctricos /Electrical Data**

**Tension nominale**  
Rated motor voltage  
**Fréquence**  
Frequency  
**Potencia nominal (Pn)**  
Rated motor power  
**Par (torque) nominal**  
Rated motor speed  
**Couple nominal**  
Rated motor torque  
**Intensité nominale**  
Rated motor current  
Intensité de démarrage / nominale  
Starting-/ Rated motor current  
**Couple décrochage / nominal**  
Breakdown/ Rated motor torque  
**Couple de démarrage / nominal**  
Starting-/ Rated motor torque  
**Clase de eficiencia**  
Efficiency class  
**Efencia 100% pn / EPACT nom.eff**  
Efficiency 100 % Pn / (IEEE 112b)  
**Factor de potencia a 100 % Pn**  
Power factor at 100 % Pn

( 6 ) 400 VD/690 VY, 50 Hz; 460 VD, 60 Hz		
50 Hz		60 Hz
5,5 kW		7,5 HP
1455 min <sup>-1</sup>		1760 min <sup>-1</sup>
36 Nm		30 Nm
10,6 A	6,14 A	9,5 A
7		8,7
3,6		4,1
3,2		3,2
EFF1		-/-
89,5 %		89,5 %
0,84		0,81

## 10.4 AUTOMAÇÃO E CONTROLE

Todo o funcionamento da CMH é controlado pelo Autómató Programável S7-200.

No item seguinte descrevemos o seu funcionamento automático. Neste item apenas especificamos os equipamentos de controlo:

- Autómató Programável:
  - Marca Siemens;
  - Modelo S7-200;
- Variadores-Sincronizadores (2+1):
  - Marca: SIEMENS;
  - Modelo: 6SL3225-0BE27-5AA1;
  - Input: 3AC / 380-480V / 25,0A / 50-60Hz;
  - Output: 3AC / 0 – Input / IN = 25,0A;
  - Motor: IEC 7,5 KW / 1 KW;
- Controlador do Sincronizador (2+1):
  - Marca: Siemens;
  - Modelo: 6SL3244-0BA20-IPA0;
- Encoder:
  - Marca: SIEMENS ;
  - Modelo: 1XP8001-1/2048      Uso: Sensor de posição ;
  - Teoria: Sensor óptico Saída: TTL ;
  - Frequência máxima: 160 kHz;
  - Velocidade máxima: 9000/ min; 9000 r.p.m.;
  - Ixp8001-2/ 1024;
- Actuador para Monovar marca ‘Sipos’ modelo 5 Flash, 400V-50Hz. refª.  
10CFEA11166/JR;

CENTRAL MICRO-HÍDRICA INCORPORADA EM CONDUTA ADUTORA



**Fig.-10.5**



**Fig.-10.6**



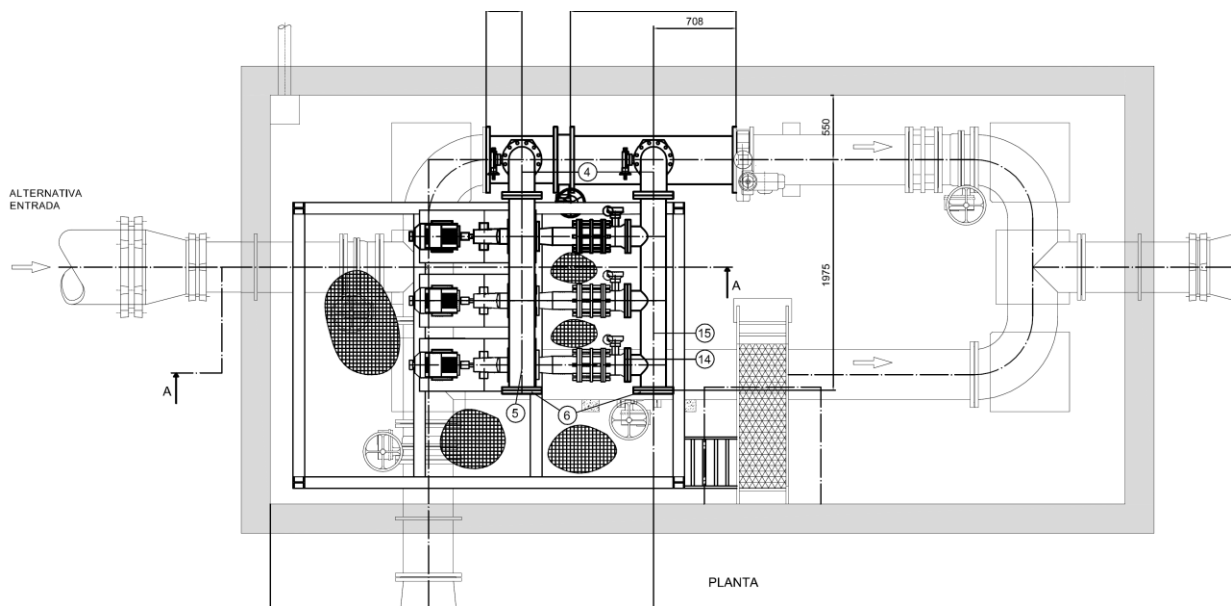
**Fig.-10.7**



**Fig.-10.8**

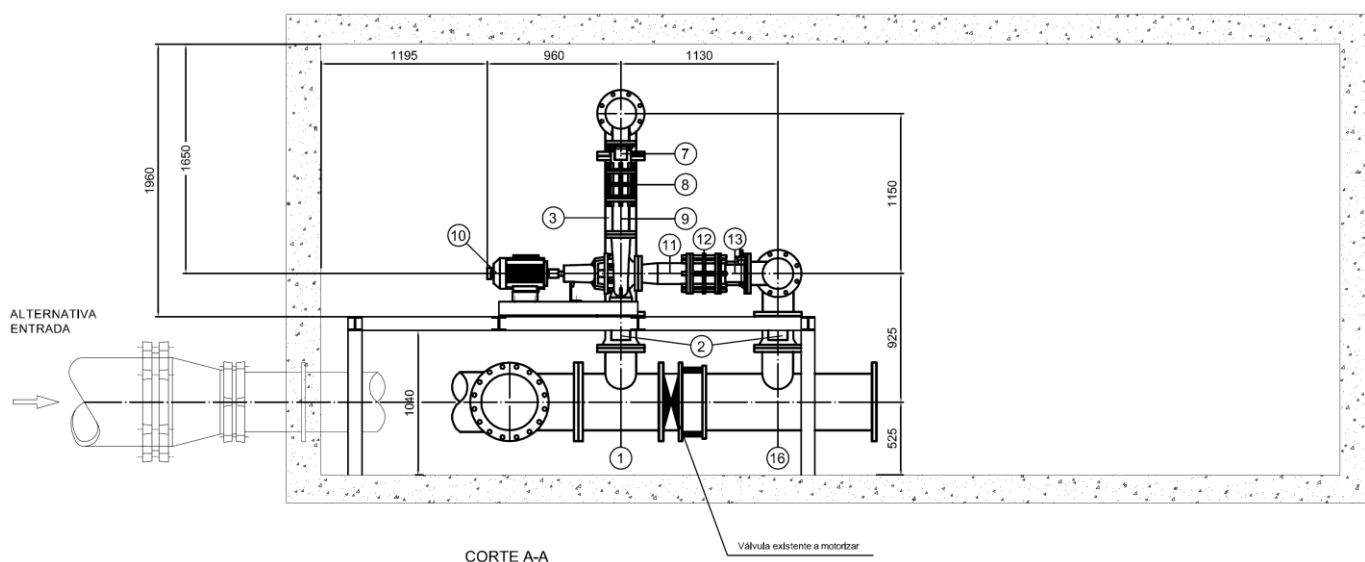
**Fotos Grupo 5 - ETA DO BELICHE (Quadro de Controló; Autómató ;  
Geradores com encoder ; Sincronizadores)**

**10.5 INSTALAÇÃO GLOBAL**



**Fig.-10.9 – Planta da CMH (Instalações Hidráulicas e Electromecânicas)**

CENTRAL MICRO-HÍDRICA INCORPORADA EM CONDUTA ADUTORA



**Fig.-10.10 – Corte da CMH (Instalações Hidráulicas e Electromecânicas)**

ARTIGO	MAT.	PN	DN	Dn	CÓDIGO	DESCRIÇÃO	COMPRIM. (mm)	QUANT.
1	St37	10	400	200	Electrolagos, CRL	Tê Flangeado, L = 610mm, H = 390mm	610	1
2	F.F.D.	10	200	-	Belgicast	Válvula de Borboleta Flangeada c/ Comando Manual	230	2
3	St37	10	200	-	Electrolagos, CRL	Tubo Flangeado	1150	1
4	St37	10	200	-	Electrolagos, CRL	Curva 90° Flangeada	Tg = 300	2
5	St37	10	200	100	Electrolagos, CRL	Colector de Queda, L = 1670mm, H = 220mm	1670	1
6	St37	10	200	-	Electrolagos, CRL	Flange Cega	-	2
7	F.F.D.	10	100	-	Belgicast	Válvula de Borboleta Flangeada c/ Comando Motorizado	190	2
8	St44.2	10	100	-	AVK 59/265 JP	Junta de Desmontagem Auto-Travada	200	2
9	St37	10	100	-	Electrolagos, CRL	Tubo Flangeado	260	2
10	F.F.D.	10	100	-	Electrolagos, CRL	Turbina	-	2
11	St37	10	150	100	Electrolagos, CRL	Tubo c/ Cone de Redução Flangeado	375	2
12	St44.2	10	150	-	AVK 59/265 JP	Junta de Desmontagem Auto-Travada	200	2
13	F.F.D.	10	100	-	Belgicast	Válvula de Borboleta Flangeada c/ Comando Manual	210	2
14	St37	10	150	-	Electrolagos, CRL	Flange Cega	-	1
15	St37	10	200	150	Electrolagos, CRL	Colector Flangeado c/ Picagens DN150; H = 220mm; L = 1670mm	1670	1
16	St37	10	-	-	Electrolagos, CRL	Tê Flangeado L = 1420mm, H = 390mm	1420	1

**Tabela-10.1 – Equipamentos Hidráulicos e Electromecânicos**

CENTRAL MICRO-HÍDRICA INCORPORADA EM CONDUTA ADUTORA



*Fig.-10.11*



*Fig.-10.12*



*Fig.-10.13*



*Fig.-10.14*

*Fotos Grupo 6 - ETA DO BELICHE - CMH : Equipamento electromecânico*

## **11 FILOSOFIA DE FUNCIONAMENTO DA CMH DO BELICHE**

Descrição Resumida de Funcionamento:

- I. A Válvula Reguladora de Caudal é controlada pelo Autómato da ETA unicamente em função de uma consigna de Caudal.
- II. O caudal é medido pelo Medidor de Caudal Electromagnético que fornece o valor de caudal ao Autómato da ETA e ao Autómato da Mini-hídrica.
- III. Quando a Mini-hídrica está parada, o autómato (da mini-hídrica) dá ordem de fecho às Válvulas de Compressão das Bombas e ordem de abertura à válvula de By-Pass à Mini-hídrica.
- IV. Quando a Mini-hídrica arranca, abre primeiramente as Válvulas de Compressão das Bombas (1 ou 2 dependendo do caudal disponível) e arranca(m) a(s) Bomba(s) em “função Bomba”.
- V. Quando as Válvulas de compressão das Bombas estiverem abertas, é dada ordem de fecho à Válvula de By-Pass. Quando esta válvula estiver fechada, o caudal que passa pelas Bombas vai inverter a condição das Bombas, passando estas a funcionar como gerador (“função gerador”).
- VI. Em todas estas manobras, efectuadas pelo autómato da Mini-hídrica, o autómato da ETA irá regular a Válvula Reguladora de Caudal de forma a manter o caudal pedido na consigna na Telegestão da ETA:
- VII. Quando a Mini-hídrica está em linha (em funcionamento), a perda de carga introduzida na linha é maior obrigando a que a Válvula Reguladora regule no sentido da abertura para manter o caudal.
- VIII. Quando a Mini-hídrica está fora da linha (parada), com a válvula de By-Pass aberta, a perda de carga introduzida na linha é menor obrigando a que a Válvula Reguladora regule no sentido do fecho para manter o caudal.
- IX. A Válvula Reguladora de Caudal está equipada com um actuador eléctrico, funcionado por impulsos de abertura ou fecho, dados pelo autómato da ETA, de forma a levar o caudal para o valor da consigna.
- X. A Monitorização da regulação de Caudal é efectuada através do Sistema de Telegestão da ETA do Beliche.
- XI. A Monitorização de alarmes e eventos da Mini-hídrica é efectuada através do envio de mensagens SMS para os técnicos responsáveis.

## 12 CONCLUSÕES E RESULTADOS

### 12.1 RESULTADOS

O funcionamento da CMH, é automático, e a respectiva automatização está integrada na automatização da ETA (caudal de adução para tratamento). Deste modo podemos obter o registo de caudais quer através do autómato da ETA quer do autómato da CMH.

Contudo os registos relacionados com o funcionamento electromecânico da CMH (consumos; correntes; pressões; avarias; etc.) são obtidos apenas no autómato desta central.



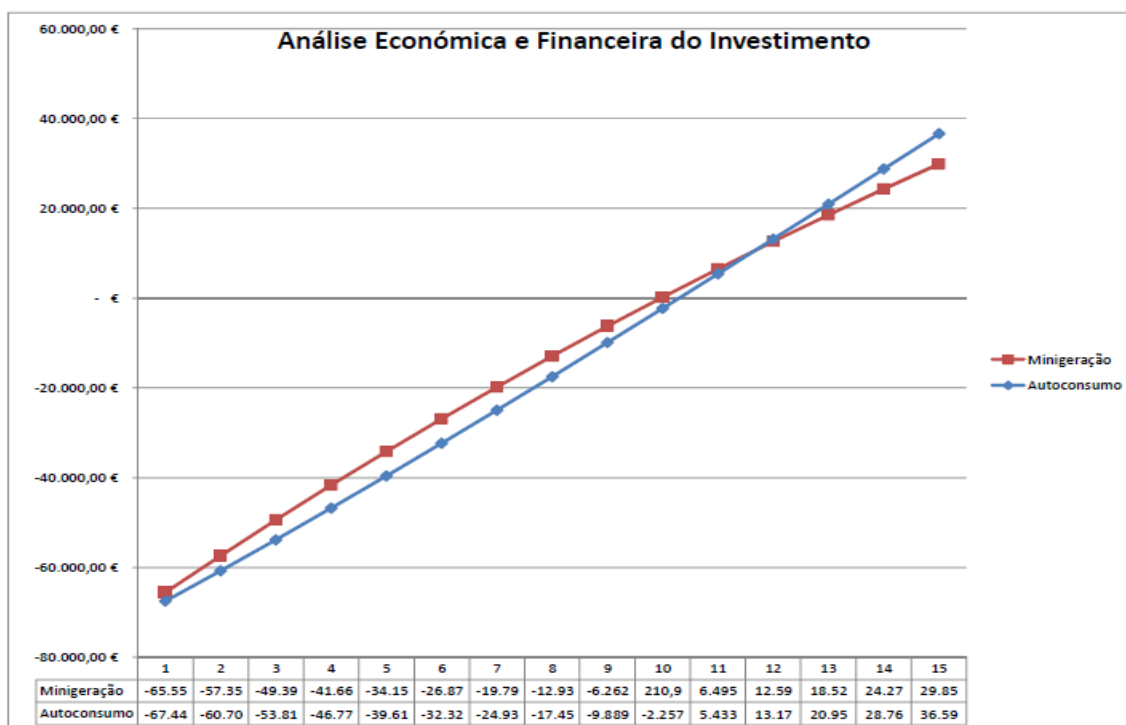
*Fig.-12.1 - ETA DO BELICHE - CMH : Display de Comando e Controlo (Autómato)*

#### 12.1.1 RETORNO DO INVESTIMENTO

Após alguns meses de testes e ‘afinações de softwares’ a CMH entrou em funcionamento produtivo no início de 2011.

Com base nos registos obtidos (desde o início de 2011 até final de Agosto de 2012) foi executada a TABELA DE CÁLCULO que anexamos.

Com o suporte nas colunas de Cash-Flow e no valor global da obra da CMH (75.000€) podemos elaborar o Gráfico seguinte:



**Gráfico-12.1 -Análise Económica e Financeira do Investimento**

Podemos concluir que:

- Os valores relativos ao ‘autoconsumo’ e á ‘venda’ têm uma evolução muito semelhante e muito próxima;
- Até os primeiros 12 anos de produção a ‘venda’ é mais favorável;
- Após os primeiros 12 anos de produção o ‘consumo’ é economicamente mais favorável;
- Atendendo à evolução de alguns parâmetros de análise económica estas conclusões não podem ser consideradas definitivas, devendo o Gestor de Energia estar atento á Legislação e ao Mercado.

### 12.1.2 TABELAS E DIAGRAMA DE COTAS (ALBUFEIRA)

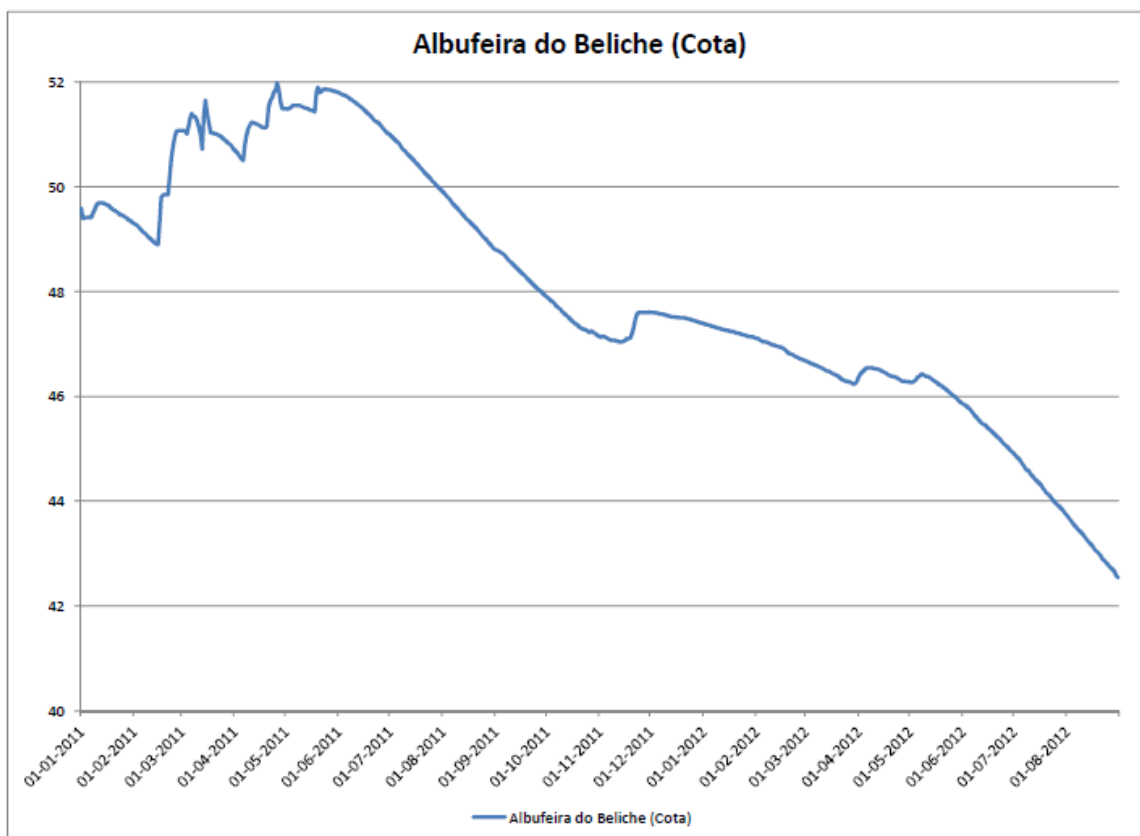
Como dissemos anteriormente, com base nos registos obtidos (desde o início de 2011 até final de Agosto de 2012) foi executada a TABELA DE CÁLCULO que anexamos.

Aí podemos ler:

- **Data do registo** (dd-mm-aa);
- **Cota do espelho** ( $H_t$ ) da albufeira da barragem (m);



As cotas utilizadas na Tabela estão representadas no Diagrama de Cotas seguinte.



*Gráfico-12.2 – Cotas da Albufeira da Barragem do Beliche*

## 12.2 CONCLUSÕES

A concretização do Projecto de uma MCH integrada numa conduta adutora imediatamente a montante de uma ETA com o objectivo do aproveitamento da energia hídrica excedentária aí existente foi um êxito, como podemos comprovar na pormenorizada descrição anterior.

Foi um êxito no aspecto do investimento económico visto que, nos 12 anos de retorno, estão implícitos os custos das instalações de teste e algumas alterações e melhorias que foram introduzidas durante a implementação da CMH. Numa nova central muitos dos custos agora incorporados não existirão e portanto estimamos que o retorno poderá ocorrer substancialmente abaixo dos 10 anos, o que será economicamente interessante.

Foi um êxito no aspecto Científico (tecnológico) porque:

## CENTRAL MICRO-HÍDRICA INCORPORADA EM CONDUTA ADUTORA

- apesar dos receios iniciais, verificamos que as necessidades de produção da ETA não são perturbadas pelo funcionamento da CMH;
- na concepção desta CMH estão integrados, em simultâneo, diversas tecnologias inovadoras com (ainda) reduzida bibliografia prática e científica disponível:
  - Sistema ‘pump as turbine’ (PaT);
  - Gerador Assíncrono em sincronismo;
  - Sistema Regulação ‘variador/sincronizador/encoder’.

Após esta constatação, e a comprovar o êxito dos resultados, poderá ser repensada a instalação de uma MCH (200kW) na ETA de Alcantarilha no Sistema de Barlavento. Estamos certos que outras CMH serão implementadas nos Sistemas de Abastecimento a nível nacional.

**José M.Livramento – Abril 2013**

### **13 LEGISLAÇÃO E BIBLIOGRAFIA**

#### **REFERÊNCIAS LEGISLATIVAS:**

[1] Conselho de Ministros, Resolução do Conselho de Ministros nº 154/2001, 27 September 2001.

[2] Conselho de Ministros, Resolução do Conselho de Ministros nº 63/2003, 28 April, 2003.

[3] Direcção Geral de Energia e Geologia, "Renováveis : Estatísticas Rápidas", Março de 2010.

[4] "Decreto-Lei n.o 189/88, de 27 de Maio": DIÁRIO DA REPÚBLICA, 1988.

[5] "Decreto-Lei n.o. 312/2001, de 10 de Dezembro": DIÁRIO DA REPÚBLICA, 2001.

[6] "Decreto-Lei n.o. 225/2007, de 31 de Maio": DIÁRIO DA REPÚBLICA, 2007.

[7] Agência de Energia & Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (ADENE & INETI) "Relatório Síntese", Lisboa, Novembro de 2001.

[8] Ministério da Economia e Inovação - "Decreto-Lei n.º 319/2009, de 3 de Novembro 2009": DIÁRIO DA REPÚBLICA.

[9] Resolução que aprova a Estratégia Nacional para a Energia 2020. Available: [http://www.portugal.gov.pt/pt/GC18/Governo/Ministerios/MEI/ProgramaseDossiers/Pages/20100415\\_MEID\\_Prog\\_ENE2020.aspx](http://www.portugal.gov.pt/pt/GC18/Governo/Ministerios/MEI/ProgramaseDossiers/Pages/20100415_MEID_Prog_ENE2020.aspx) Último acesso em Junho de 2010.

[10] Ministério da Economia e da Inovação e do Desenvolvimento, "Estratégia Nacional de Energia ENE 2020, Uma Inspiração para Portugal e uma Ideia para o Mundo, 2010.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

- [1] Castro, Rui M. G., “Introdução à energia Mini-Hídrica”, Março de 2008.
- [2] Hélder José de Sousa Teixeira, "Caracterização da Produção de Centrais Mini-Hídricas", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [3] Elsa Sofia da Silva Ferraz, " Optimização de Estruturas e Modelos de Previsão de Produção Mini-Hídrica", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [4] C. D. Monteiro, "Mini-hídrica", Apontamentos PDIS, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007."
- [5] Moura, Domingos, “Aproveitamentos hidroeléctricos de pequena potência” (preliminary drafting), manuscript text, IST, 1987.
- [6] P. Vilas Boas, Graça Medina, Manuela Portela, “A metodologia de projecto de uma pequena central hidroeléctrica”, Seminário Avançado Tecnologias das Fontes de Energia Eléctrica Descentralizadas, IST, Maio 1986.
- [7] Betâmio, A. de Almeida, “Planeamento de pequenas centrais hidroeléctricas”, Seminário Avançado Tecnologias das Fontes de Energia Eléctrica Descentralizadas, IST, Maio 1986.
- [8] Energia Hidráulica e Mini-Hídricas, Causas Ambientais. Available: <http://www.zoomlab.net/web1/trabalhos/grupo16/EnRenov5.html> Último acesso em Junho de 2010.
- [9] "Automação e Supervisão de uma Central Mini-hídrica.", IST/MEEC, 2003.
- [10] CMFG. Energia e Ambiente. Available: <http://www.cmfg.pt/> Último acesso em Janeiro de 2010.
- [11] Júlio F. Ferreira da Silva José M. P. Vieira, Naim Hiae, "Dimensionamento Optimizado de Sistemas Adutores Elevatórios de Água", Departamento de Engenharia Civil-Universidade do Minho, 2003.
- [12] "Mini-hídrcas, Aproveitamentos Hidroelectricos", Available: <http://eduvisilva.com.sapo.pt/minihidrica.htm>.
- [13] Application-oriented Planning Documents for Pumps as Turbines – KSB

- [14] Pump Handbook – Grundfos
- [15] A Guide to-as-Turbine Pico Hydropower Systems-Bomba - Greacen Chris e Megan Kerins
- [16] Máquinas de Corriente Alternada Asincrónicas – Ing. A. Von Konigslow – Editorial Labor, S.A.;
- [17] The Asynchronous Generator in Small Power Plants – Thomas Fladerer
- [18] Máquinas de Corriente Alternada – Enciclopedia de Electricidad – D.Juan Maria Ortega Plana - Ediciones CEAC,S.A.
- [19] Diagrama Circular del Motor Asincrónico Trifásico – Ing. Norberto A.Lemozy - Universidade Tecnológica Nacional – FRBA – Departamento de Electrotecnia
- [20] Motores Assincronicos – Ing.José Luis Guinudinik – UTN-TUCUMAN
- [21] Diagrama de Circulo de la Máquina de Induccion – Prof.José Manuel Aller – Univ.Simon Bolivar
- [22] Máquinas de Induccion Trifasicas – Jorge Romo L. – Ariel Valdenegro E.
- [23] Máquinas Eléctricas – A.W.Carriso – AEIST
- [24 ] Teoría, Cálculo y Construcción de las Máquinas de corriente alterna asincrónicas Editorial Labor, S. A.
- [25] Motores de Inducción – Ing.Julio Álvarez
- [26] Tesis Doctoral – Atanasi Jornet –Universitat Politècnica Catalunya
- [27] Proposta para Implantação de Microcentrais Hidroelétricas Automatizadas com o emprego de Geradores Assíncronos – Sergio Roberto dos Santos

**DOCUMENTOS**

**TABELAS**

**DIAGRAMAS**

**PEÇAS DESENHADAS**

**FOTOGRAFIAS**