



**Plataforma para Emulação de sistemas Pico-hídricos ligados à Rede Elétrica, utilizando Inversores Fotovoltaicos Convencionais**

**Kénio Sebastião Almeida de Brito**

Dissertação apresentada à

**Escola Superior de Tecnologia e Gestão  
Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em

**Energias Renováveis e Eficiência Energética**

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

**Professor Doutor Américo Vicente Teixeira Leite  
Professora Doutora Ângela Paula Barbosa de Silva Ferreira**

**Novembro de 2016**

## Agradecimentos

Esta Dissertação é o culminar de 5 anos fora da minha casa, longe da família e dos amigos. Sou muito grato por ter vivenciado esta experiência, pois a saudade nunca pesou mais do que a vontade de voltar para casa, como um Engenheiro. É com muita alegria que olho para trás, relembrando as coisas incríveis que aqui fiz e as pessoas inesquecíveis que aqui conheci, e por isso tudo tenho de agradecer:

Aos Professores Doutores Vicente Leite e Ângela Ferreira, por toda disponibilidade concedida, pelo conhecimento transmitido e principalmente pela oportunidade de trabalhar com eles, foi um privilégio.

Agradeço também ao Mestre José Batista pela contribuição e acolhimento no Laboratório de Sistemas Eletromecatrónicos.

Agradeço a minha família e aos meus amigos, pelo seu apoio incansável e por sempre terem uma palavra de motivação.

Um agradecimento especial ao meu pai, Paulo e a minha mãe Luísa, pela fé que depositaram em mim e por tudo que fizeram para que este meu sonho se tornasse realidade.

A todos, muito obrigado.

## Resumo

A sustentabilidade energética tem um papel de extrema importância no nosso mundo e na atual geração populacional, sendo uma forma de nos fazer capazes de usar os recursos naturais presentes, sem sacrificar estes mesmos recursos naturais no futuro. Sustentabilidade energética é uma forma de usar a energia para satisfazer as necessidades atuais, mas de modo a não comprometer as demandas de energia, como um todo, nas gerações futuras.

Neste intuito, o trabalho consiste na implementação, em laboratório, de uma plataforma de emulação de sistemas Pico-hídricos com vista a testar a integração de inversores fotovoltaicos convencionais, visando fazer a sua instalação no Centro Aquícola de Castrelos, num regime de auto-consumo com uma potência de, aproximadamente, 1 kW. A plataforma será baseada na integração de um motor de indução, um variador de frequência convencional, um Gerador Síncrono de ímãs permanentes (GSIP) e um inversor fotovoltaico.

A plataforma foi desenvolvida com o objetivo de emular um sistema Pico-hídrico que trabalhe em regime de velocidade variável. Isto é possível através da integração do inversor fotovoltaico, que irá desacoplar o gerador da rede, permitindo assim que o gerador rode a uma velocidade diferente da nominal. Assim a entrega de potência à rede é feita através do inversor, garantindo todas as condições de qualidade e segurança.

Assim foi feito um estudo, sobre a Energia Hídrica, onde dá-se destaque às Pico-hídricas, falando das suas principais opções tecnológicas, com especial atenção às turbinas e geradores usados neste tipo de aproveitamentos. Foi introduzido também o conceito de velocidade variável em aproveitamentos hidroelétricos. Assim, de forma a garantir a integração do gerador com o inversor fotovoltaico foi preciso fazer a caracterização do gerador, com uma série de ensaios, que têm por objetivo encontrar os parâmetros nominais do gerador e fazer a sua chapa de características.

Nesta Dissertação é dada especial atenção aos ensaios realizados no laboratório, com vista a caracterizar o gerador e a viabilizar a utilização deste tipo de sistemas, bem como a estimação do potencial hídrico e a seleção da turbina para a instalação no caso prático. O objetivo é produzir energia elétrica por vias alternativas, reduzindo assim a fatura energética da instalação e conciliando o estudo de um novo sistema de aproveitamento de energia hídricas.

Palavras chave: Energias Renováveis, Energia pico-hídrica, Energia hídrica, Crossflow, geração distribuída, eletrificação rural, sustentabilidade energética.

## Abstract

Energy sustainability has an important role in our world and in the actual energy generation, because it's the only way to make us able to use the natural resources without sacrificing these same natural resources in the future. Energy sustainability is a way to use the energy to meet the current needs, but without compromising the energy demands, as a whole, for the future generations.

To this end, this paper studies the implementation in the laboratory of an emulation platform for pico-hydric systems to test the integration of conventional photovoltaic inverters, in order to make its installation in the Aquaculture Centre of Castrelos in a micro system generation with a power of about 1 kW. The platform is based on the integration of an induction motor, a conventional frequency inverter, a permanent magnet synchronous generator and a photovoltaic inverter.

It has been made a study on the Hydropower, more specifically on the Pico-Hydric systems, studying its main technologies, with special attention to the turbines and generators used in this type of systems. It was also introduced the concept of variable speed in hydroelectric systems. To ensure the integration of the generator with the photovoltaic inverter it was necessary to characterize the generator, with a set of tests, which aims to find the nominal generator parameters.

In this thesis it was given special attention to the tests performed in the laboratory in order to characterize the generator and to enable the use of this type of system and the estimation of water potential and turbine selection for installation in the practical case, with the objective to produce electricity by alternative ways, aiming at reducing the energy bill of the installation, combined with the study of a new hydroelectric power drive system.

Keywords: Renewable Energy, pico-hydro, hydro power, Crossflow, distributed generation, rural electrification, energy sustainability.

# Índice

Agradecimentos .....	i
Resumo.....	ii
Abstract .....	iii
Índice.....	iv
Lista de Figuras.....	vi
Lista de tabelas.....	viii
Lista de Símbolos.....	ix
Lista de Abreviaturas.....	x
Capítulo 1 .....	1
1. Introdução geral.....	1
1.1. Objetivos e motivação.....	1
1.2. Organização do trabalho .....	2
Capítulo 2 .....	3
2. Energia Hídrica .....	3
2.1. Introdução.....	3
2.2. Aproveitamentos hidroelétricos .....	3
2.3. Sistemas de regulação.....	7
2.4. Aplicações das Unidades Hídricas .....	8
2.5. Cenário atual .....	9
2.6. Centrais hídricas reversíveis.....	12
Capítulo 3 .....	13
3. Componentes do sistema de conversão de energia hídrica .....	13
3.1. Introdução.....	13
3.2. Turbinas.....	13
3.2.1. Classificação das turbinas.....	13
3.2.2. Seleção de Turbinas .....	17
3.3. Geradores.....	24
3.3.1. Gerador Síncrono .....	24
3.3.2. Gerador Assíncrono ou de indução.....	25
3.3.3. Gerador Síncrono Vs Gerador Assíncrono.....	27
3.4. Velocidade Fixa vs Velocidade Variável .....	28
Capítulo 4 .....	30
4. Plataforma experimental de emulação de turbinas Pico-hídricas .....	30
4.1. Emulação da turbina hídrica .....	30

4.2.	Caracterização do Gerador Síncrono de ímanes permanentes .....	33
4.2.1.	Ensaio em vazio .....	33
4.2.2.	Ensaio em carga .....	36
Capítulo 5 .....		43
5.	Aplicação prática - Parque Aquícola de Castrelos .....	43
5.1.	Introdução .....	43
5.2.	Avaliação do potencial hídrico .....	45
5.3.	Técnicas de Avaliação do Potencial Pico-hídrico.....	45
5.3.1.	Medição da Altura da Queda .....	45
5.3.2.	Estimativa do caudal .....	47
5.3.3.	Estimativa da Potência Disponível .....	48
5.4.	Seleção da turbina.....	49
5.5.	Testes Laboratoriais .....	51
5.5.1.	Ensaio em Regime Permanente.....	51
5.5.2.	Ensaio dinâmico .....	56
Capítulo 6 .....		62
6.	Conclusão e Propostas de trabalhos futuros .....	62
6.1.	Conclusões gerais .....	62
6.2.	Propostas de trabalhos Futuros .....	63
Referências.....		64

## Lista de Figuras

Figura 1- Ilustração de um pequeno aproveitamento hidroelétrico. Legenda: 1- Albufeira 2- Canal de adução 3- Câmara de adução 4- Condução forçada 5-Edifício da central 6- Restituição 7- Caudal ecológico 8-Escada de peixe (Figueiredo 2010). .....	5
Figura 2- Definição da queda útil e da queda bruta (Piqueiro 2013). .....	7
Figura 3- Esquema de um sistema hídrico com ligação à rede elétrica. ....	8
Figura 4- Evolução da dependência energética de Portugal e da EU (Eurostat, 2014). ....	9
Figura 5- Taxa de incorporação das energias renováveis em países da EU (Apren 2016). .....	10
Figura 6- Evolução da potência instalada hídrica em Portugal (Apren 2016). .....	10
Figura 7- Evolução da produção anual hídrica em Portugal (Apren 2016). ....	11
Figura 8- Evolução da produção hídrica por tipo de aproveitamento em Portugal (Apren 2016). .....	11
Figura 9-Turbina Pelton [ <a href="https://www.zeco.it">https://www.zeco.it</a> ]. .....	14
Figura 10- Turbina Banki-Mitchell ou Crossflow [ <a href="http://www.ossbergerhydro.com">http://www.ossbergerhydro.com</a> ]. .....	15
Figura 11- Turbina Turgo [ <a href="http://www.cchpe.net">http://www.cchpe.net</a> ]. .....	15
Figura 12- Turbina Francis [VAtech]. .....	16
Figura 13-Turbina Kaplan [VAtech/]. .....	16
Figura 14-Bombas reversíveis [ <a href="http://www.directindustry.com">http://www.directindustry.com</a> ]. .....	17
Figura 15- Seleção das turbinas hídrica [13]. .....	17
Figura 16- Curvas típicas de rendimento das turbinas(Harvey 1993). .....	18
Figura 17- Curvas típicas de rendimento das turbinas em função da potência a saída (Castro 2011). .....	19
Figura 18- Seleção de turbinas [13]. .....	21
Figura 19-Representação de uma turbina Banki-Mitchell (Sinagra, Sammartano et al. 2014). .	22
Figura 20- Eficiência da turbina Crossflow [13]. .....	23
Figura 21- Esquema de um Gerador Síncrono ( <a href="http://automoveiseletricos.blogspot.pt">http://automoveiseletricos.blogspot.pt</a> ) .....	25
Figura 22- Esquema de um Gerador de Indução ( <a href="http://automoveiseletricos.blogspot.pt/">http://automoveiseletricos.blogspot.pt/</a> ). ...	26
Figura 23- Vantagens das máquinas de velocidade variável comparando com as de velocidade fixa [21]. .....	28
Figura 24- Diagrama da emulação. ....	30
Figura 25- Característica de binário e potência em função da velocidade de uma turbina hídrica [25]. .....	31
Figura 26- Smart drive da eco innovation 100-14s-1p. ....	32
Figura 27- Circuito de proteção. ....	33
Figura 28-Circuito implementado para os ensaios em vazio. ....	34
Figura 29- Ensaio em vazio gerador em estrela. ....	35
Figura 30- Ensaio em vazio com gerador ligado em triângulo. ....	36
Figura 31- Circuito implementado para os ensaios em carga. ....	37
Figura 32- Ensaio em Carga (R fixa) com gerador em estrela. ....	38
Figura 33- Circuito implementado para os ensaios em plena carga. ....	38
Figura 34- Ensaio em Carga (R variável) com o gerador ligado em estrela. ....	39
Figura 35- Ensaio em Carga (R fixa) com gerador em triângulo. ....	40
Figura 36- Ensaio à plena Carga (R variável) com o gerador ligado em triângulo. ....	41
Figura 37- Tanques de tratamento de trutas, Castrelos. ....	43
Figura 38- Localização do Posto Aquícola de Castrelos (Fonte: Google Maps). ....	44
Figura 39- Projeto da topologia para sistemas Pico-hídricas conectadas à rede [24]. ....	44
Figura 40- Nível ótico. ....	45

Figura 41- Acessórios do nível.....	46
Figura 42 -Mapa topográfico do posto Agrícola. ....	46
Figura 43- Representação esquemática da transformação de energia num aproveitamento hídrico. ....	48
Figura 44- Seleção de turbinas. ....	49
Figura 45- Turbina Crossflow modelo GL760-LM-15 (Electway Acessado em Outubro de 2016). .....	50
Figura 46- Circuito para os ensaios com inversor. ....	51
Figura 47- Idc vs Vdc ensaio com inversor SB1500. ....	53
Figura 48- Idc vs Vdc ensaio com inversor SB1500. ....	54
Figura 49- Idc vs Vdc ensaio com inversor SB2100TL.....	55
Figura 50- Idc vs Vdc ensaio com inversor SB2100TL.....	56
Figura 51- Ensaio dinâmico com Pref 6%. ....	57
Figura 52- Ensaio dinâmico com Pref 6% simulando falha na rede. ....	58
Figura 53- Ensaio dinâmico com Pref 6%. ....	58
Figura 54- Ensaio dinâmico com Pref 6% simulando falha na rede. ....	59
Figura 55-Ensaio dinâmico com Pref 6%. ....	59
Figura 56- Ensaio dinâmico com Pref 6% simulando falha na rede. ....	60
Figura 57- Ensaio dinâmico com Pref 6% simulando falha na rede. ....	60
Figura 58- Zoom da Figura 57.....	61

## Lista de tabelas

Tabela 1- Classificação Energia Hídrica (Sopian and Razak 2009).....	4
Tabela 2-Classificação das pequenas centrais hidroelétricas quanto à queda (Paish 2002). .....	4
Tabela 3- Turbinas aplicáveis em aproveitamentos hidroelétricos (Paish 2002). .....	14
Tabela 4- Velocidades específicas para vários tipos de turbina (de Mello Júnior 2000). .....	20
Tabela 5-Chapa de características do gerador. ....	32
Tabela 6- Resultados no ensaio em vazio. ....	34
Tabela 7- Resultados no ensaio em vazio com gerador ligado em triângulo.....	35
Tabela 8- Resultados nos ensaios em carga com gerador em estrela. ....	37
Tabela 9- Resultados obtidos nos ensaios em plena carga com gerador ligado em estrela. ....	39
Tabela 10- Resultados nos ensaios em carga com gerador em triângulo.....	40
Tabela 11- Resultados obtidos nos ensaios em plena carga com gerador ligado em triângulo. ....	41
Tabela 12- Alturas de queda bruta.....	47
Tabela 13- Velocidades medidas pelo molinete numa dada secção. ....	47
Tabela 14- Características dos inversores usados (SMA). ....	51
Tabela 15- Ensaio com inversor SB1500 e gerador em estrela.....	52
Tabela 16- Ensaio cm inversor SB1500 com gerador em triângulo. ....	53
Tabela 17- Ensaio com inversor SB2100 com gerador em estrela.....	54
Tabela 18- Ensaio com inversor SB2100 com gerador em triângulo. ....	55

## Lista de Símbolos

Símbolos	Descrição
$E_j$	Energia a jusante [J]
$E_m$	Energia a montante [J]
$g$	Força gravitacional [ $m/s^2$ ]
$H$	Altura de queda [m]
$H_b$	Altura de queda bruta [m]
$H_u$	Altura de queda útil [m]
$H_{opt}$	Altura de queda ótima [m]
$I$	Corrente elétrica [A]
$I_{DC}$	Corrente elétrica no barramento DC [A]
$I_{DCmax}$	Corrente elétrica máxima no barramento DC [A]
$I_g$	Corrente elétrica no gerador [A]
$m$	Massa de um corpo [kg]
$N$	Velocidade de rotação [rpm]
$N_s$	Velocidade específica
$n_s$	Velocidade de sincronismo [rpm]
$N_i$	Velocidade de rotação do rotor [rpm]
$P$	Potência [W]
$P_{AC}$	Potência AC [W]
$P_{DC}$	Potência DC [W]
$P_{DCmax}$	Potência DC máxima [W]
$P_e$	Potência elétrica [W]
$PF$	Fator de potência
$P_g$	Potência do gerador [W]
$P_{max}$	Potência máxima [W]
$P_{out}$	Potência de saída [W]
$P_u$	Potência útil [W]
$Q$	Caudal [ $m^3/s$ ]
$Q_{max}$	Caudal máximo [ $m^3/s$ ]
$Q_{med}$	Caudal médio [ $m^3/s$ ]
$R_Y$	Resistência em estrela [ $\Omega$ ]
$R_D$	Resistência em triângulo [ $\Omega$ ]
$S$	Deslizamento
$T$	Binário [N.m]
$T_{Hid}$	Energia cinética de rotação da turbina hidráulica [J]
$T_0$	Binário no ponto 0 [N.m]
$V$	Tensão elétrica [V]
$V_{DC}$	Tensão elétrica DC [V]
$V_{DCmax}$	Tensão elétrica DC máxima [V]
$V_{LL}$	Tensão composta [V]
$V_{mpptmax}$	Tensão mppt máxima [V]
$V_{mpptmin}$	Tensão mppt mínima [V]
$V_{pv-star}$	Tensão de iniciação do painel fotovoltaico [V]
$W$	Energia potencial gravítica [J]
$Z_j$	Cota a jusante [m]
$Z_m$	Cota a montante [m]
$\Delta H$	Variação da queda [m]
$\eta$	Rendimento [%]
$\rho$	Densidade da água [ $kg/m^3$ ]
$\omega$	Velocidade angular [rad/s]

## Lista de Abreviaturas

Símbolos	Descrição
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
C+	Condensador
EU	União Europeia
FER	Fontes de energias renováveis
GSIP	Gerador Síncrono de ímanes permanentes
MPPT	Algoritmo de seguimento do ponto de potência máxima
REN	Reserva Ecológica Nacional
PRE	Produção em regime Especial
PRO	Produção em regime ordinário

# Capítulo 1

## 1. Introdução geral

A presente Dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado em Energias Renováveis e Eficiência Energética, no Instituto Politécnico de Bragança (IPB). Nesta Dissertação vão ser apresentados alguns conceitos relacionados com a energia hídrica, mais especificamente as Pico-hídricas num contexto de energia renovável, de modo a produzir energia elétrica para consumo próprio ou venda em locais isolados.

É igualmente exposto o enquadramento do presente trabalho, as suas motivações e os objetivos, assim como a organização do atual documento.

### 1.1. Objetivos e motivação

Neste trabalho, o objetivo principal é criar uma plataforma para emulação de geradores ligados à rede elétrica, utilizando inversores fotovoltaicos convencionais de modo a usar este conhecimento na criação de um aproveitamento Pico-hídrico, sendo que este tipo de aproveitamento se perfila como uma opção muito interessante e viável na geração de energia limpa e estável em regiões de difícil acesso e/ou ajudar na eletrificação rural.

De modo a criar a plataforma de emulação, é feito um estudo dos geradores usados no âmbito da geração de energia hídrica, sendo feito também a caracterização de um Gerador Síncrono de ímanes permanentes, com o objetivo de conhecer os seus pontos de funcionamento para fazer a interligação deste com um inversor fotovoltaico convencional de baixas potências.

Deste modo neste trabalho é feito um estudo sobre a energia hídrica, mais especificamente, as Pico-hídricas, dando a conhecer esta forma de geração de energia renovável, que tem vindo a ganhar espaço principalmente em regiões rurais. Este tipo de aproveitamento apresenta muitas vantagens, e, segundo certas condições de escolha do gerador e turbina, o orçamento do pequeno aproveitamento pode vir a ser muito compensador. Pois este pode apresentar uma geração de energia elétrica durante todos os dias do ano. É também objetivo deste trabalho fazer a escolha de uma turbina hídrica, para a implementação posterior em um caso pratico.

O sistema de emulação foi testado em condições estáticas e dinâmicas, de modo a fazer um estudo do seu comportamento e a entrega de potência à rede elétrica.

## 1.2. Organização do trabalho

O presente documento encontra-se dividido em 6 capítulos, com correspondentes subcapítulos.

No Capítulo 1, é feita a introdução do documento, apresentando os objetivos e motivação do mesmo e também a organização do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta o enquadramento da energia hídrica, fazendo referência aos seus aproveitamentos, as principais opções tecnológicas, o sistema de regulação a ligação à rede elétrica, bem como o cenário atual hídrico em Portugal e na EU.

No Capítulo 3 é feito o enquadramento das turbinas hídricas, classificando-os e ainda é apresentado os critérios de seleção de turbinas nos aproveitamentos hídricos. É também apresentado o estudo feito sobre os geradores usados na conversão de energia mecânica em elétrica nos aproveitamentos hídricos, fazendo a sua comparação de modo a saber qual gerador se adapta melhor para determinado aproveitamento hídrico.

O Capítulo 4 diz respeito a emulação do sistema de conversão de energia hídrica, onde é feita uma plataforma para emulação de turbinas hídricas. Ainda é mostrado como fez-se a caracterização experimental do sistema de conversão de energia, onde é feita a caracterização do gerador, através de ensaios em vazio e em carga.

No Capítulo 5 é feito um projeto inicial para a instalação do sistema de geração de energia no Parque Aquícola de Castrelos, onde apresenta-se o projeto, as técnicas/métodos de avaliação do potencial Microhídrico utilizadas, assim como uma análise detalhada dos diferentes equipamentos que constituem a instalação piloto, de forma a validar a sua seleção.

No Capítulo 6 é apresentado as principais conclusões sobre o trabalho e alguns trabalhos futuros que poderiam dar continuidade a este projeto.

## Capítulo 2

### 2. Energia Hídrica

#### 2.1. Introdução

A energia hídrica desde o surgimento das civilizações sempre teve um grande papel na história do homem, as civilizações antigas aproveitavam o relevo dos solos para utilizar a água na agricultura, em terrenos de regadio. Os romanos começaram a utilizar a água numa espécie de sistemas hidráulicos para a moagem dos cereais. Ao longo dos anos esses sistemas vieram a ter uma grande evolução, apresentando-se atualmente com um enorme potencial para a produção de energia elétrica, com um carácter de energia renovável e associados a uma tecnologia extremamente flexível, tendo um grande peso na geração de energia elétrica atual. Os reservatórios hídricos garantem o armazenamento de energia na forma de energia potencial da água, que associados a um rápido tempo de resposta permitem a sua utilização na otimização da produção face a flutuações bruscas nas demandas.

Em particular, o desenvolvimento das Mini-Hídricas é muito promissor, apresentando-se não como uma versão reduzida de uma grande central hidroelétrica mas como uma forma de produção dispersa de eletricidade através da conversão da energia cinética disponível em águas correntes, rios, canais e córregos com uma certa queda. Ao contrário dos aproveitamentos hídricos baseados em grandes reservatórios de água, estes aproveitamentos denominados de fio-de-água, embora sejam menos flexíveis na otimização do balanço energético entre a produção e o consumo, apresentam um impacto ambiental reduzido, atendendo à fraca interferência com os cursos de água.

Segundo o relatório da União Europeia (EU) em 2015, a indústria hídrica gera um volume de negócios anual de cerca de 120 a 180 milhões de euros e tem mantido uma posição de liderança no campo da produção de energia hidroelétrica desde que a tecnologia começou a ser desenvolvida há sensivelmente 150 anos. Pode-se estimar que, direta e indiretamente, este setor é responsável por cerca de 20 mil postos de trabalho na Europa [1].

Do exposto, o interesse nos pequenos aproveitamentos hidroelétricos é crescente, sendo que a investigação de novas tecnologias desempenham um papel fundamental para encontrar soluções para os países em desenvolvimento, permitindo a eletrificação de zonas rurais ou isoladas. Neste âmbito, a EU vem apoiando a investigação das Mini-Hídricas desde 1998, onde projetos que visam o avanço do conhecimento, desenvolvimento de novos e melhores materiais, mais eficiente e equipamentos ambientalmente amigáveis estão a ser financiados [1].

#### 2.2. Aproveitamentos hidroelétricos

Os aproveitamentos hidroelétricos são estruturas implantadas em cursos de água, que aproveitam o potencial energético representado pelos caudais e desníveis locais, para acionar órgãos conversores desse potencial em energia mecânica, por sua vez acoplados a órgãos geradores de energia elétrica. As centrais podem ser de fio de água ou de albufeira, sendo o primeiro mais interessante no enquadramento do projeto em causa [2].

No primeiro caso de uma central a fio de água, a energia cinética associada ao caudal do rio é responsável pela produção de eletricidade. No segundo caso a energia potencial devido às diferenças de cotas à montante e à jusante da barragem é responsável pela produção de eletricidade, esta também possui geralmente diversos grupos geradores, podendo desta forma fornecer diversos valores de potência. Possui ainda a possibilidade de proceder à descarga sem turbinagem de forma a regular o caudal do rio [2].

Em muitas áreas rurais ou isoladas, sem rede elétrica de transporte e/ou distribuição, existindo bom potencial hídrico, pode-se aproveitar esta energia para o uso local, recorrendo a micro-redes. As centrais micro-hídricas combinam as vantagens da energia hidroelétrica com as da geração de energia descentralizada, destacando-se pela ausência das desvantagens que as grandes centrais apresentam. Os pequenos aproveitamentos hídricos não apresentam praticamente nenhuma das desvantagens comuns aos grandes aproveitamentos hídricos, como grandes gastos na distribuição de energia, grandes alterações ambientais impostas ao local, ou necessidade de manutenção cara. Aliando a isso, a energia hidroelétrica em pequena escala pode ser usada de forma descentralizada sendo gerida localmente e utilizada para agro-processamento, iluminação local, bombas de água e/ou nas pequenas empresas [3].

Os aproveitamentos hidroelétricos podem ser classificados quanto à potência instalada e em função da altura da queda de água, esta classificação é apresentada de acordo com as Tabela 1 e Tabela 2 respetivamente [4, 5].

*Tabela 1- Classificação Energia Hídrica [5].*

Potência	Classificação
>10 MW	Grande
<10 MW	Pequena
<1 MW	Mini
<100 kW	Micro
<5 kW	Pico

*Tabela 2-Classificação das pequenas centrais hidroelétricas quanto à queda [6].*

Designação	Altura [m]
Queda baixa	0-10
Queda média	10-50
Queda alta	> 50

Os aproveitamentos de fio de água não têm grande capacidade de armazenamento de água, e ao contrário das centrais de albufeira estas fazem uso do represamento natural da corrente, impondo assim pouca alteração do regime hidrográfico natural, resultando numa baixa geração de energia aliada a uma baixa disponibilidade de potências elétricas mas com potencial para uma distribuição temporal regular [2].

Estes pequenos aproveitamentos localizam-se habitualmente em cursos de água com declive pouco acentuado, onde no entanto o caudal disponível pode ser elevado. Devido à reduzida capacidade de retenção destes aproveitamentos, é imperativo que as aflúências sejam

imediatamente turbinadas ou descarregadas quando em excesso, para que o regime hidrológico do rio não seja alterado de forma significativa [2]. Ainda assim, estas centrais podem ter uma capacidade mínima de armazenamento para regularização diária ou semanal. Produzem normalmente em regime contínuo, durante as 24 horas, com os grupos de geradores total ou parcialmente ligados. Estas centrais são por isso classicamente utilizadas na base dos diagramas de cargas na produção em regime ordinário (PRO). A produção hídrica em regime especial (PRE), tipicamente aproveitamentos de fio de água, são ainda atualmente utilizadas nas bases dos diagramas de cargas.

A Figura 1 apresenta os elementos genéricos integrantes de um pequeno aproveitamento hidroelétrico [7].

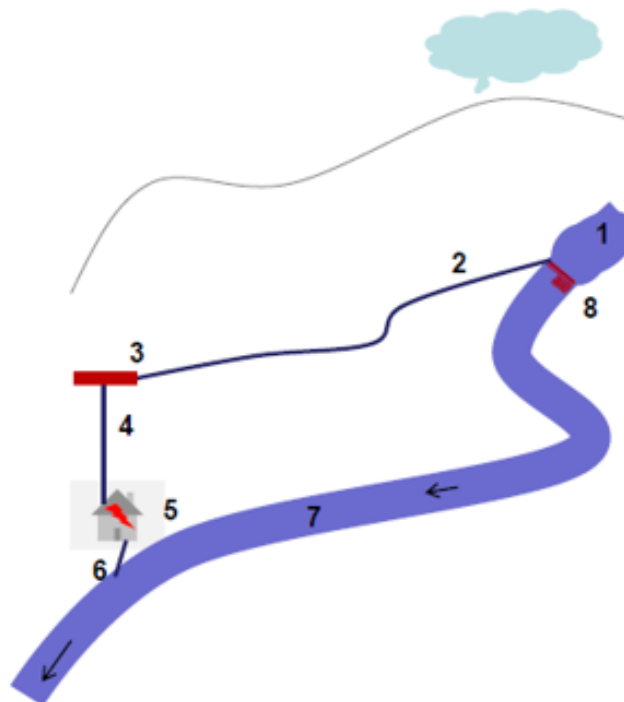


Figura 1- Ilustração de um pequeno aproveitamento hidroelétrico. Legenda: 1- Albufeira 2- Canal de adução 3- Câmara de adução 4- Conduta forçada 5-Edifício da central 6- Restituição 7- Caudal ecológico 8-Escada de peixe [7].

O edifício da central, referenciado na Figura 1 com o número 5, é o lugar onde se encontra os principais elementos do aproveitamento, como a turbina e o gerador, sendo estes referenciados mais a frente.

A energia potencial teórica de um volume de água a uma determinada altura corresponde ao trabalho que a força peso realiza, sendo obtida quando se considera o deslocamento de um corpo na vertical, tendo como origem o nível de referência:

$$W = m g H \quad (1)$$

onde,  $W$  é a energia potencial [J],  $m$  é a massa do corpo [kg],  $g$  é a aceleração gravítica [ $m/s^2$ ] e  $H$  é a altura a que o corpo se encontra suspenso [m].

Derivando a expressão (1) em ordem ao tempo obtém-se a potência de aproveitamento hidroelétrico, ou seja:

$$P_h = \frac{dw}{dt} = \rho \frac{dv}{dt} g H_b = \rho Q g H_b \quad (2)$$

sendo,  $\rho$  a densidade da água [ $\text{kg/m}^3$ ],  $Q$  o caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $H_b$  a altura de queda bruta [m] e  $P_h$  a potência hídrica [W].

As variáveis  $\rho$  e  $g$  são constantes por isso a potência a instalar varia apenas com a queda e com o caudal.

O caudal que passa por uma secção de um rio é uma variável aleatória, com repartição não uniforme ao longo do ano. Assim, os estudos hidrológicos só poderão fornecer probabilidades de ocorrência dos caudais afluentes a uma determinada secção do curso de água (geralmente, valores médios diários) ao longo do ano. Dependendo dos casos, pode ser necessário uma análise hidrológica com o objetivo de obter a chamada curva média de duração dos caudais médios diários [2].

Sendo assim, uma das decisões mais importantes a tomar para uma correta avaliação económica do empreendimento a instalar consiste na escolha do caudal de projeto da turbina, também designado por caudal nominal.

Quando a experiência não é suficiente para fundamentar solidamente a escolha de um determinado caudal nominal, de entre a gama indicada, é prática habitual tomar o caudal nominal igual ao caudal medio. Esta opção é muitas vezes tomada pelos projetistas na fase de anteprojecto [8].

Sendo assim, é mostrada na equação 3 uma forma simples de calcular o caudal nominal ( $Q$ ) a partir do caudal médio ( $Q_{med}$ ). O caudal é assim obtido nas unidades do sistema internacional ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$$Q = Q_{med} = \frac{1}{t} \int_0^t Q(t) \quad (3)$$

A análise hidrológica não é necessária quando se trabalha com um caudal desviado.

A queda bruta do aproveitamento,  $H_b$ , será proporcional à diferença entre os valores da energia nos extremos de montante-  $E_m$ , e de jusante-  $E_j$ , do circuito hidráulico no qual se insere a turbina. Na Figura 2 é apresentado um esquema de como se obtém o valor da queda bruta. É também indicado o valor da queda útil,  $H_u$ , que será proporcional ao real valor da energia absorvida pela turbina [9].

A queda útil depende dos níveis da água que se verificam a montante e na restituição e ainda do valor das perdas de energia que se verificam ao longo do circuito hidráulico,  $\Delta H$ , calculado a partir:

$$H_u = H_b - \Delta H \quad (4)$$

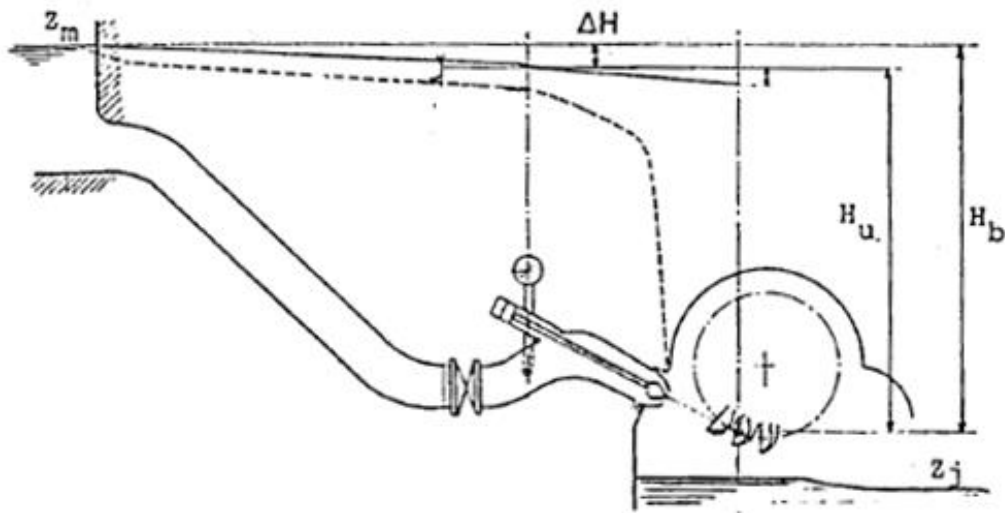


Figura 2- Definição da queda útil e da queda bruta [9].

Os níveis da superfície livre, quer o de montante-  $Z_m$  quer o de jusante -  $Z_j$ , são função dos caudais afluídos e dos caudais turbinados.

O valor da queda útil estimada constituirá um parâmetro que conduzirá à definição do tipo de turbina a utilizar, sendo também bastante comum na fase de anteprojeto assumir a queda útil como 80% da queda bruta. Assim, a observação de um qualquer diagrama de utilização de turbinas, conduzirá a que se estabeleça a adaptabilidade dos diferentes tipos de turbinas a diferentes gamas de quedas [9].

### 2.3. Sistemas de regulação

Os sistemas de regulação pretendem manter a tensão e a rotação em níveis constantes, esta última garantindo assim a frequência das grandezas elétricas de saída da unidade geradora dentro dos limites de variação permissíveis pelas cargas e/ou rede elétrica. Um pêndulo centrífugo do tipo mecânico (isto é, um servomecanismo trabalhando sob óleo pressurizado) comanda de forma automática a velocidade dos reguladores convencionais iguais as usadas nas pequenas centrais hidroelétricas, o mais simples dos quais são os volantes de inércia [10].

Quando se está a fazer a aquisição de um regulador, aspetos como o seu custo, a distância da potência para a carga, e o tipo de carga tem de ser levados em conta. Ao considerar o custo, é aconselhável escolher um regulador só quando a capacidade da turbina ultrapassa os 20 kW. Em turbinas menores, a regulação pode ser alcançada por ajuste de carga, controle manual do fluxo de água, ou através de um controle simplificado para as pequenas unidades geradoras integradas [10].

## 2.4. Aplicações das Unidades Hídricas

As unidades de produção de energia elétrica podem dividir-se em três aplicações diferenciadas: sistemas isolados, sistemas ligados à rede elétrica e sistemas híbridos. Contudo, para cada aplicação é imprescindível ter em consideração a ausência/presença da rede de distribuição de energia pública.

Os sistemas ligados à rede elétrica permitem a venda da energia elétrica produzida à rede elétrica. Um exemplo de um sistema ligado a rede é apresentado a seguir na Figura 3, onde é possível ver os diversos sentidos que a energia pode seguir.

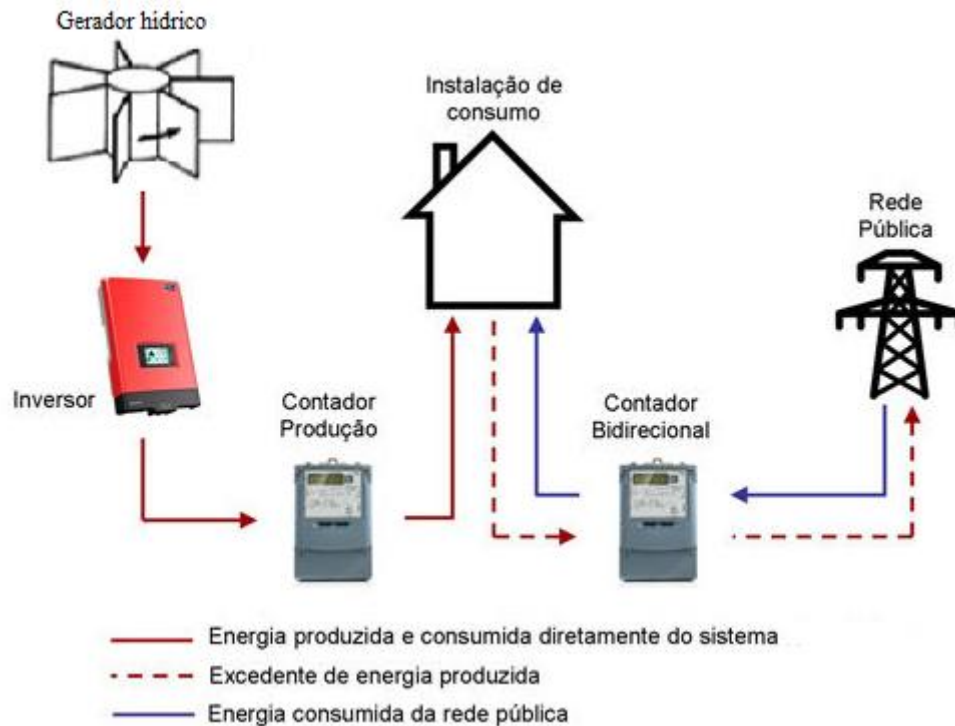


Figura 3- Esquema de um sistema hídrico com ligação à rede elétrica.

Este é a unidade hídrica que apresenta maior flexibilidade na medida em que, se a potência hídrica instalada é insuficiente para fornecer toda a energia elétrica que a instalação de consumo precisa, sempre se pode recorrer à rede elétrica para satisfazer os consumos, auxiliando também na diminuição da fatura energética, e caso a potência hídrica instalada seja maior do que a necessária sempre se pode vender a excedente à rede elétrica.

## 2.5. Cenário atual

Nos dias de hoje, a energia é fundamental para um bom desenvolvimento social e económico. Para que as gerações futuras possam assentar num desenvolvimento sustentável, a geração presente tem de cuidar, preservar e não esgotar as fontes de energia. Assim, é essencial promover a utilização eficiente das tecnologias atuais bem como o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. Neste cenário, as fontes de energia renovável (energia eólica, energia solar, energia hidroelétrica, energia dos oceanos, energia geotérmica, biomassa e biocombustíveis) se apresentam como uma solução bastante promissora, com uma tecnologia madura para a resolução de tais problemas, pois são intrinsecamente duráveis. A conservação de energia, fóssil ou não, é complementar à transição para um novo padrão de desenvolvimento, e prolongará a vida útil das reservas existentes [11].

A EU depende de terceiros neste aspeto, apesar de tomar medidas para impulsionar a aposta nas energias renováveis e tornar cada vez mais eficiente os sistemas técnicos utilizados, o que não acontece com as novas potências emergentes. Verifica-se que de 1999 a 2006, a dependência energética da EU aumentou de 45.1% para 53.8%, de acordo com a Figura 4. No período 2007 a 2012 há pequenas oscilações entre o aumento e redução da sua dependência energética.

Em relação a Portugal o cenário é um pouco mais complicado que no resto da EU, pois a dependência de Portugal entre 1998 a 2010 foi sempre superior a 80%, tendo atingido, em 2005, valores na ordem dos 88.5%. Em 2010 um nível histórico de 75,4% foi atingido, mas em 2011 e 2012 o valor voltou a subir, chegando aos 79,6%.

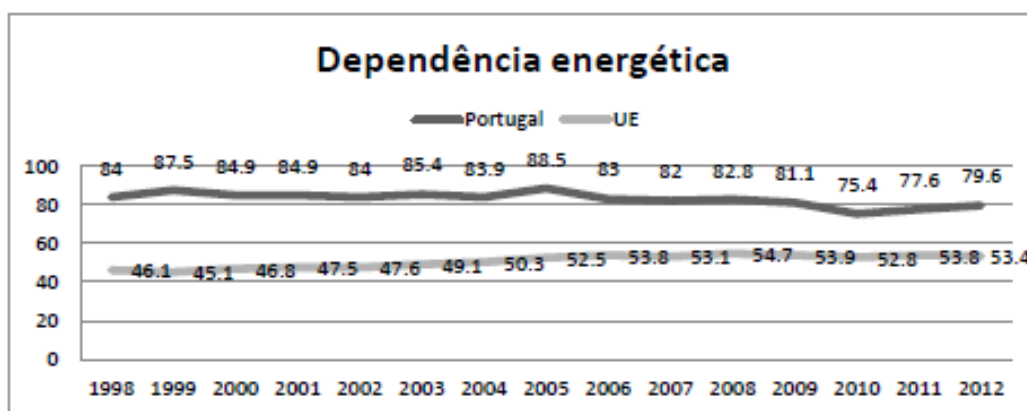


Figura 4- Evolução da dependência energética de Portugal e da EU (Europstat, 2014).

A partir do ano de 2005 a maior aposta do País em energias renováveis contribuiu para baixar progressivamente a dependência energética. A Figura 5 apresenta um gráfico que mostra a taxa de incorporação das energias renováveis de alguns países da EU.

Portugal foi, em 2015, o terceiro país da União Europeia com maior incorporação de energias renováveis na produção de energia elétrica. Esta posição deve-se ao contributo das fontes hídricas e eólicas (88% da produção total renovável) [12].

As fontes de energia renovável constituem alternativas aos combustíveis fósseis, contribuindo assim para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, diversificam o

aprovisionamento energético e reduzem a dependência em relação a mercados de combustíveis fósseis pouco fiáveis e voláteis, em particular os do petróleo e do gás. A EU é líder no que diz respeito às tecnologias energéticas renováveis, detendo 40% das patentes de energias renováveis no mundo e, em 2012, quase metade (44%) da capacidade de produção de eletricidade renovável a nível global (à exceção da energia hidroelétrica) pertencia à EU. A indústria das energias renováveis na EU emprega atualmente cerca de 1,2 milhões de pessoas. A legislação da EU relativamente à promoção das energias renováveis evoluiu significativamente nos últimos anos. O futuro quadro político para o período pós-2020 está a ser debatido [12].

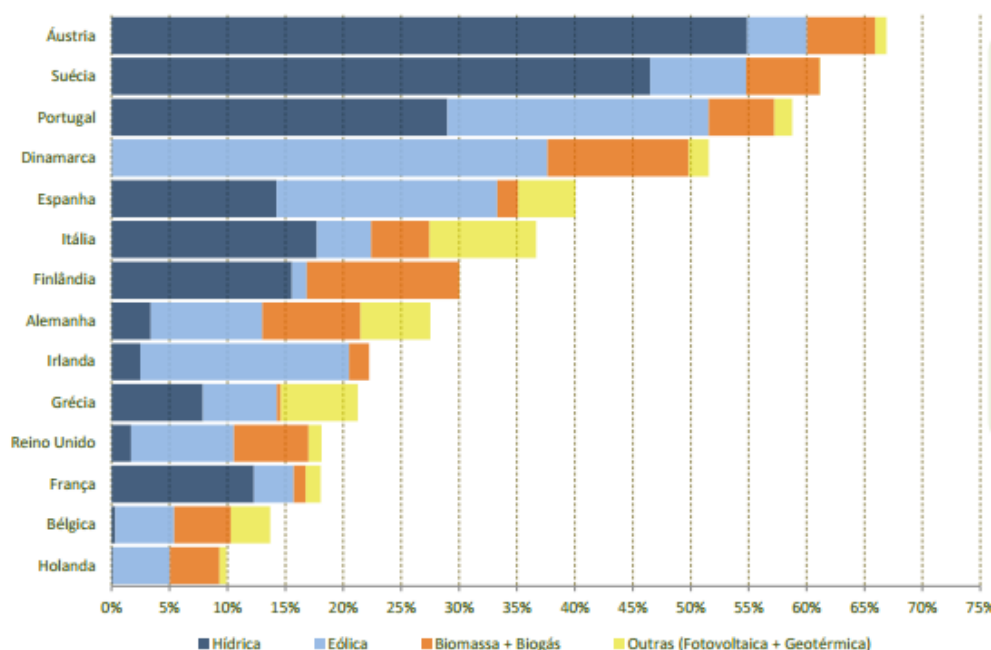


Figura 5- Taxa de incorporação das energias renováveis em países da EU [12].

Segundo dados da APREN [12], no final de junho de 2016, a potência instalada em unidades de produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis (Figura 6) atingiu 12 441 MW com uma produção de 32 647 GWh (Figura 7). No ano-móvel correspondente ao período compreendido entre julho de 2015 e junho de 2016, o peso da energia elétrica renovável atingiu 61,4% relativamente à produção bruta. De acordo com a metodologia da diretiva 2009/28/CE, que estabelece os objetivos a atingir em 2020, essa percentagem situou-se em 51,4% [12].

	Potência Instalada (MW)									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016 jun
<b>Total Renovável</b>	7 811	8 459	9 106	9 687	10 626	11 055	11 311	11 678	12 281	12 441
<b>Hídrica</b>	4 855	4 857	4 884	4 898	5 332	5 539	5 535	5 571	6 028	6 028
<b>Grande Hídrica (&gt;30MW)</b>	4 234	4 234	4 234	4 234	4 666	4 877	4 877	4 916	5 363	5 363
<b>PCH (&gt;10 e ≤ 30 MW)</b>	288	288	290	290	290	288	288	284	292	292
<b>PCH (≤ 10 MW)</b>	333	336	361	374	377	374	370	371	373	373

Figura 6- Evolução da potência instalada hídrica em Portugal [12].

	Produção Anual (GWh)									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016 jun <sup>1</sup>
<b>Total Renovável<sup>2</sup></b>	<b>16 593</b>	<b>15 140</b>	<b>19 016</b>	<b>28 754</b>	<b>24 692</b>	<b>20 411</b>	<b>30 610</b>	<b>32 404</b>	<b>25 357</b>	<b>32 647</b>
<b>Hídrica</b>	<b>10 449</b>	<b>7 298</b>	<b>9 009</b>	<b>16 547</b>	<b>12 114</b>	<b>6 660</b>	<b>14 868</b>	<b>16 412</b>	<b>9 762</b>	<b>16 167</b>
<b>Grande Hídrica (&gt;30MW)</b>	<b>9 405</b>	<b>6 281</b>	<b>7 648</b>	<b>14 454</b>	<b>10 615</b>	<b>5 683</b>	<b>12 931</b>	<b>14 168</b>	<b>8 633</b>	<b>14 097</b>
<b>em bombagem</b>	<b>422</b>	<b>499</b>	<b>724</b>	<b>399</b>	<b>578</b>	<b>1 038</b>	<b>1 138</b>	<b>843</b>	<b>1 147</b>	<b>1 204</b>
<b>PCH (&gt;10 e &lt;=30 MW)</b>	<b>500</b>	<b>459</b>	<b>619</b>	<b>1 005</b>	<b>637</b>	<b>411</b>	<b>887</b>	<b>1 014</b>	<b>482</b>	<b>944</b>
<b>PCH (&lt;= 10 MW)</b>	<b>544</b>	<b>558</b>	<b>742</b>	<b>1 088</b>	<b>862</b>	<b>566</b>	<b>1 050</b>	<b>1 229</b>	<b>647</b>	<b>1 126</b>

Figura 7- Evolução da produção anual hídrica em Portugal [12].

Na Figura 8 é possível ver a evolução dos dois tipos de aproveitamentos hídricos. No ano de 2016 as centrais de fio de água (onde também se incluem as pequenas albufeiras), em termos de produção de energia, contabilizaram um total de 9 466 GWh, superando assim as centrais de Albufeira.

	Produção Hídrica por Tipo de Aproveitamento (GWh)									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016 jun <sup>1</sup>
<b>Albufeira</b>	<b>3 846</b>	<b>2 853</b>	<b>3 713</b>	<b>7 146</b>	<b>4 711</b>	<b>3 092</b>	<b>6 931</b>	<b>7 073</b>	<b>3 572</b>	<b>6 701</b>
Lima	641	480	763	1 415	695	424	1 198	1 234	485	1 153
Cávado	1 458	1 182	1 151	2 230	1 231	1 053	1 918	1 893	1 171	2 094
Douro	431	309	448	757	509	286	626	727	384	1 054
Mondego	349	308	470	647	413	470	701	761	315	633
Tejo	688	306	528	1 316	1 093	315	1 257	1 441	412	1 021
Guadiana	280	267	354	782	770	544	1 232	1 017	805	745
<b>Fio de Água<sup>2</sup></b>	<b>6 604</b>	<b>4 446</b>	<b>5 296</b>	<b>9 401</b>	<b>7 403</b>	<b>3 568</b>	<b>7 937</b>	<b>9 339</b>	<b>6 190</b>	<b>9 466</b>
Lima	6	11	14	13	9	9	6	8	5	8
Cávado	25	25	25	31	25	20	35	42	30	41
Douro	5 727	3 733	4 443	7 962	6 159	2 892	6 667	7 905	5 395	8 012
Mondego	89	109	145	219	121	111	192	249	88	208
Tejo	478	278	256	694	704	246	587	618	319	517
Guadiana	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
Outras	278	289	413	481	385	289	449	516	354	679

<sup>1</sup> Ano-móvel: julho de 2015 a junho de 2016.

<sup>2</sup> Inclui pequenas albufeiras.

Figura 8- Evolução da produção hídrica por tipo de aproveitamento em Portugal [12].

As centrais hídricas são o modo mais eficiente de gerar eletricidade e contribuem para a estabilidade do sistema elétrico. Atualmente, num ano médio, cerca de 30% da eletricidade consumida em Portugal tem origem hídrica [12].

Verifica-se que, desde 1994, a taxa de execução de novos aproveitamentos tem sido extremamente baixa. Como principais causas para esta situação têm sido apontadas as dificuldades de obtenção de novos licenciamentos, centradas principalmente nos procedimentos administrativos inerentes ao processo de utilização da água e à aplicação do regime jurídico de Reserva Ecológica Nacional (REN), obrigando ao reconhecimento de interesse público municipal [2].

No final de 2002, observa-se que não só o licenciamento de novas centrais mini Hídricas está praticamente parado, como existem dificuldades de legalização dos aproveitamentos titulados por antigas concessões [2].

Não foi possível obter dados relativamente à produção hídrica de baixa ou muito baixa potência, como é o caso das unidades Pico-hídricas que são o alvo deste trabalho. Embora sendo muito utilizadas em diversas regiões do globo pouco desenvolvidas ou em vias de desenvolvimento, na Europa, há também um enorme potencial ainda por explorar, i.e., na renovação de locais existentes com centrais de baixa ou muito baixa queda. Assim essas pequenas centrais quando renovadas podem dar um contributo bastante significativo para as futuras necessidades energéticas [1].

## 2.6. Centrais hídricas reversíveis

Uma central hídrica convencional tem como princípio de funcionamento transformar a energia mecânica da água, sob o efeito da gravidade, em energia elétrica, sendo esta conseguida através de desnível topográfico originado por um açude ou barragem. Uma central hídrica reversível permite, além disso, transformar energia elétrica em energia potencial gravítica através da bombagem de água de um reservatório inferior para um reservatório superior, possibilitando, assim, a sua utilização no futuro [13].

As centrais hidroelétricas, equipadas com bombagem, permitem usar eficientemente o excesso de produção eólica, armazenando energia nas horas de vazio para posterior turbinamento nas horas de ponta.

A vantagem da complementaridade entre as centrais hídricas reversíveis e as centrais eólicas tem levado os países, um pouco por todo o mundo, a procurarem soluções para aumentarem a capacidade de potência instalada de bombagem [14].

De forma a minimizar o impacte ambiental que a construção de novas centrais acarreta, uma das medidas atualmente adotadas passa pela renovação e modernização das centrais hídricas reversíveis já existente, conseguindo-se melhorar não só a capacidade de potência instalada, como também o rendimento do ciclo de bombagem. Além disso, muitas centrais hídricas convencionais existentes estão a ser requalificadas de modo a possuírem a capacidade de bombagem, tornando-se, desse modo, centrais hídricas reversíveis combinadas [14].

## Capítulo 3

### 3. Componentes do sistema de conversão de energia hídrica

#### 3.1. Introdução

De entre os equipamentos que constituem um aproveitamento hidroelétrico, a turbina e o gerador são os principais equipamentos eletromecânicos.

Para os geradores, as opções tecnológicas usadas confinam-se as clássicas máquinas síncronas ou assíncronas.

A turbina hidráulica é o principal equipamento mecânico presente em pequenos aproveitamentos hidroelétricos, correspondendo a uma parcela muito significativa do custo de uma central hidroelétrica, podendo chegar até aos 50%, pelo que a sua seleção criteriosa se reveste de particular interesse.

#### 3.2. Turbinas

A turbina é uma turbomáquina hidráulica, transformando a energia da água em energia mecânica, conduzindo a um movimento de rotação do veio. O veio da turbina, é o elemento que irá transmitir o seu movimento de rotação à unidade transformadora de energia mecânica em elétrica, ou seja, o gerador, esta solidário com a roda da turbina sendo o elemento sobre o qual o fluido atua. Consoante o tipo de operação, as turbinas hídricas podem subdividir-se em dois grupos: as turbinas de reação e as turbinas de ação ou de impulso.

##### 3.2.1. Classificação das turbinas

Nas turbinas de ação, um fluxo de água acelerado embate nas pás da turbina a alta velocidade, fazendo estas mudarem de direção. A ação resultante desse choque faz girar a turbina deixando o fluxo de água com energia cinética diminuída. Para um funcionamento eficiente, as pás destas turbinas devem girar no ar, pois se ficarem parcialmente submersas a rotação é afetada [2].

As turbinas de reação são caracterizadas por funcionarem imersas em água e, normalmente são colocadas dentro de uma caixa protetora, sob pressão. Este tipo de turbinas utiliza a pressão da água ao invés da energia cinética, utilizada pelas turbinas de ação. O seu movimento é originado pelo perfil adequado das pás do rotor, que utiliza a diferença de pressão provocada pela água entre o interior e o exterior da turbina [2].

As principais turbinas de ação são as Pelton, Turgo e Banki-Mitchell ou Crossflow. As turbinas Kaplan e Francis são as principais turbinas de reação, como apresentado na Tabela 3. É conveniente referir que existe uma vasta gama de turbinas, no entanto, as características de funcionamento são similares às referidas.

Tabela 3- Turbinas aplicáveis em aproveitamentos hidroelétricos [6].

Modos de ação		
Turbinas	Ação	Pelton
		Banki-Mitchell
		Turgo
	Reação	Francis
		Kaplan

Pode-se observar a representação das turbinas acima classificadas nas imagens a seguir.

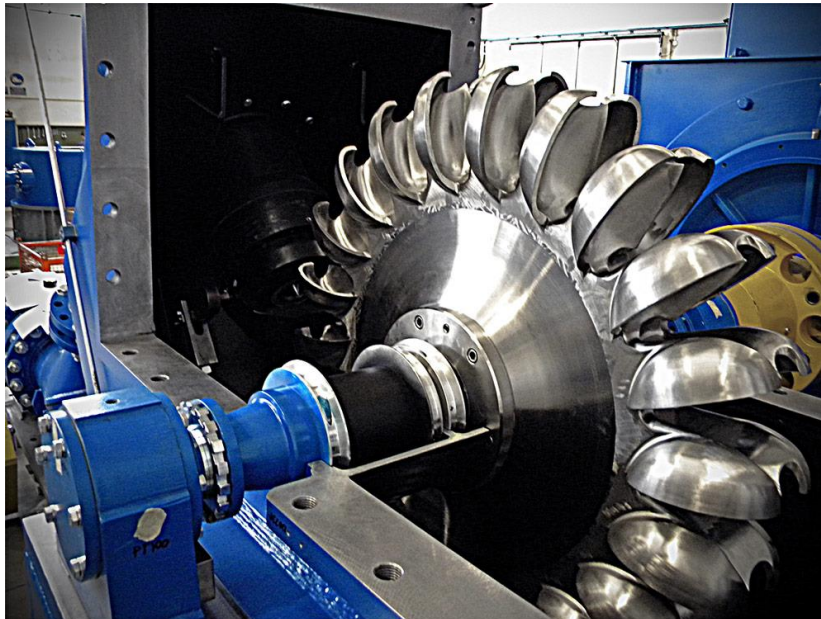


Figura 9-Turbina Pelton [<https://www.zeco.it>].

A turbina Pelton como mencionado acima é uma turbina de ação, sendo constituída por uma roda e um ou mais injetores, cuja função é transformar a energia de pressão do escoamento em energia cinética, orientando esse mesmo escoamento para a roda. É mais adequada para grandes quedas úteis.

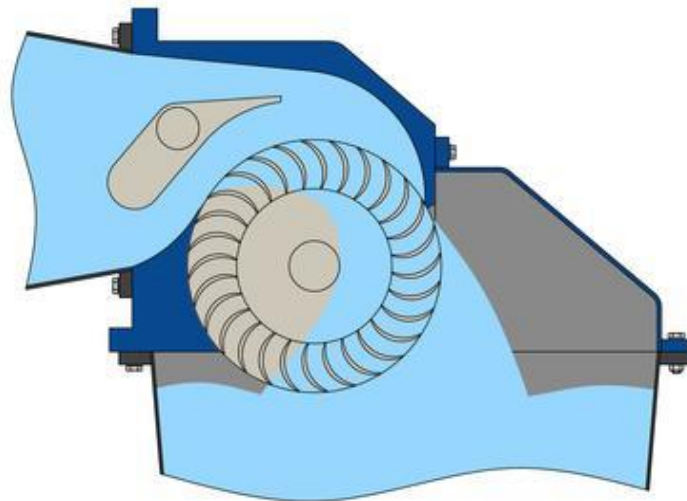


Figura 10- Turbina Banki-Mitchell ou Crossflow [<http://www.ossbergerhydro.com>].

A turbina Crossflow é principalmente utilizada quando as potências são baixas. O seu rendimento é inferior as outras turbinas mas a sua capacidade de manter elevado numa extensa gama de caudais torna-a adequada à operação num espectro largo de caudais [2]. Está turbina vai ser referenciada mais a frente pois é a principal turbina utilizada em pequenos aproveitamentos hídricos.



Figura 11- Turbina Turgo [<http://www.cchpe.net>].

A turbina Turgo apresenta semelhanças em relação à turbina *Pelton*, mas pela sua construção, estas turbinas apresentam menor diâmetro para a mesma potência em relação às turbinas *Pelton*.



Figura 12- Turbina Francis [VAtech].

A turbina Francis apresenta-se como uma caixa em espiral, conduzindo a água por toda a periferia. As pás do distribuidor direcionam a água com um ângulo adequado para a entrada das pás do rotor, provocando o acionamento pelo fenómeno da reação. Estas turbinas caracterizam-se pela operação em condições intermédias de caudal e de altura de queda da água. Também são conhecidas pelo alto rendimento, entre 80 a 90 %, tanto mais alto quanto maior for a potência[2].

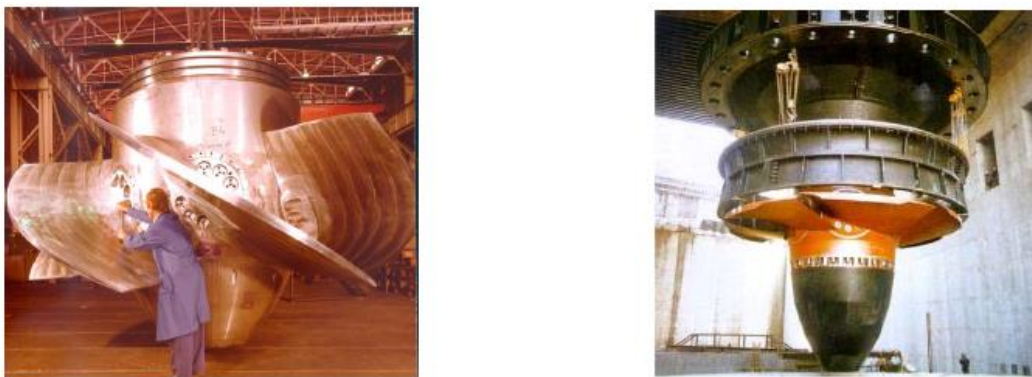


Figura 13-Turbina Kaplan [VAtech/].

A turbina Kaplan faz parte das turbinas de reação, possuindo um sistema de dupla regulação, o que permite a adaptação a uma gama alargada de valores de queda e caudal, conservando o valor do seu rendimento. Estas turbinas são indicadas para funcionamento sob queda baixa e caudais elevados [2].

Em pequenos aproveitamentos hidroelétricos, tem sido proposta a utilização de bombas reversíveis, funcionando em sentido inverso, como turbinas. Apesar de uma redução de rendimento e da impossibilidade de adaptação ao caudal, esta solução apresenta vantagens interessantes, tais como baixo preço, disponibilidade no mercado, fácil montagem e manutenção reduzida [2].



Figura 14-Bombas reversíveis [<http://www.directindustry.com>].

No entanto, eles têm algumas desvantagens: Para a mesma altura, há uma ligeira perda de eficiência, quando este é usado para bombeamento de água e eles são sensíveis às características de cavitação e faixa de operação [10].

### 3.2.2. Seleção de Turbinas

A seleção de uma turbina para um determinado aproveitamento hídrico faz-se de acordo com três parâmetros, potência, altura de queda e o caudal disponível, como exemplificado na Figura 15 [1].

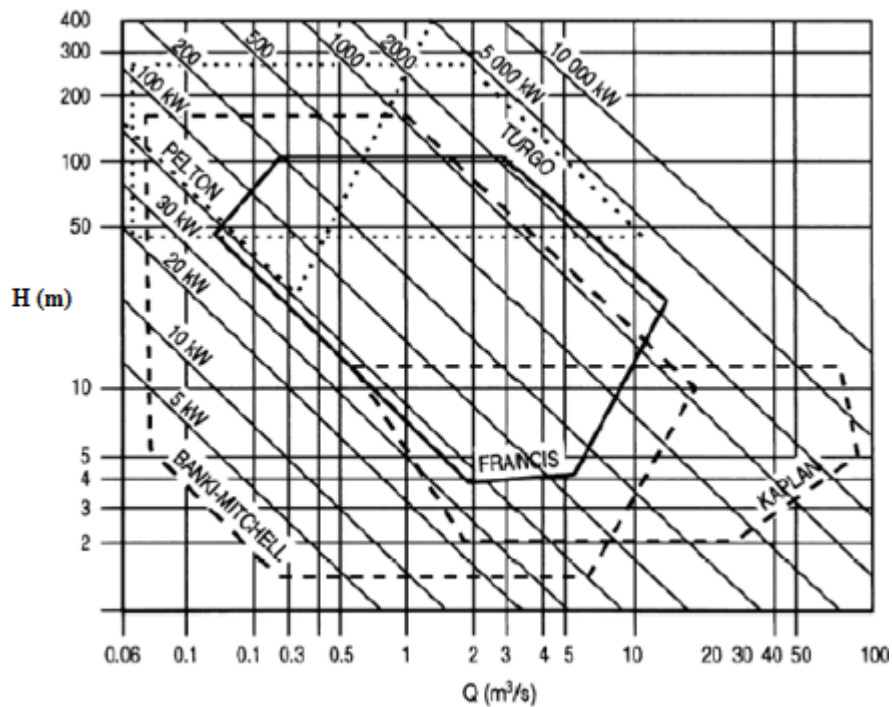


Figura 15- Seleção das turbinas hídrica [13].

Da análise da Figura 15 verifica-se que as turbinas de ação são mais adequadas a uma aplicação caracterizada por quedas relativamente elevadas e caudais baixos, mas também podemos encontrar turbinas Pelton funcionando com quedas intermédias (20 a 100 m) e com potências variando entre 50 e 500 kW.

As turbinas do tipo *Francis* são mais adequadas para operação em condições intermédias de queda e de caudal enquanto do tipo Kaplan são mais indicadas para funcionamento sob queda baixa e caudais elevados.

A Figura 16 mostra as curvas de rendimento típicas para algumas turbinas mencionadas.

Fácil é de concluir que distintos tipos de turbinas apresentam evoluções de rendimento substancialmente distintas. A turbina Kaplan apresenta o máximo valor de rendimento, mas a turbina Pelton destaca-se por apresentar uma curva de rendimentos muito “plana”, com um decaimento significativo do rendimento para valores de caudal relativo inferiores a aproximadamente 20%. A turbina Kaplan, de igual forma, apresenta uma elevada gama de utilização, em que o rendimento apenas se torna inferior a 80% para valores do caudal relativo inferior a 20%. Por seu turno, as turbinas Francis apresentam bons rendimentos máximos com gamas de utilização de dimensão apreciável e variáveis com o valor da rotação específica. A turbina Crossflow projetada apresenta um rendimento na ordem dos 80% numa vasta gama de caudais. [9].

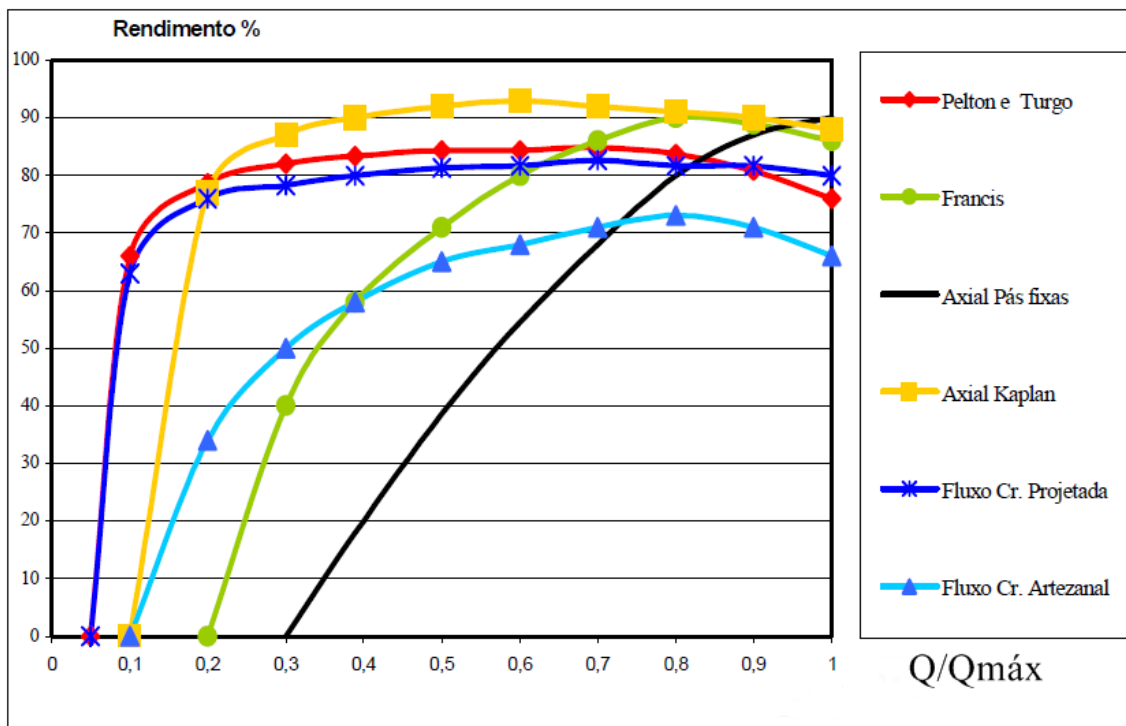


Figura 16- Curvas típicas de rendimento das turbinas[15]

A Figura 17 mostra as curvas de rendimento típicas para as turbinas Francis, Kaplan e Pelton comparando a eficiência relativa com a potência à saída.

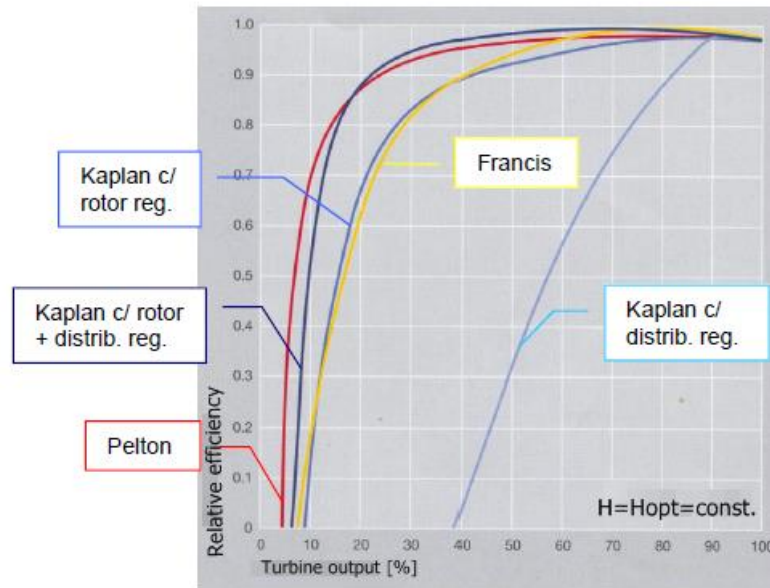


Figura 17- Curvas típicas de rendimento das turbinas em função da potência a saída [2].

Outro fator a ter em conta na seleção da turbina é a variação da queda, que é particularmente significativa nos aproveitamentos de baixa e média queda. As turbinas Francis e Kaplan são, sob este ponto de vista melhores, suportando variações de queda entre 65% e 125% da queda nominal [2].

Outro fator importante na seleção de uma turbina, diretamente relacionado com a seleção dos equipamentos do sistema de conversão a jusante (caixa de velocidades e/ou gerador, dependendo se o acionamento é direto ou indireto) é a velocidade específica.

No projeto inicial de uma turbina, o tamanho e forma são desconhecidos. Atendendo a que o objetivo é converter a energia associada a um movimento de rotação. Assim a velocidade específica é um parâmetro de base da mecânica dos fluidos que permite a avaliação da velocidade de rotação para processar (ou produzir, no caso de uma bomba) um determinado caudal associado a uma queda específica. A definição da velocidade específica, se expressa através de um conjunto consistente de unidades e é um parâmetro adimensional. A indústria tem vindo a utilizar um conjunto inconsistente de unidades o que resulta em diferentes definições para este parâmetro [16]. É comum a formulação deste parâmetro em função da potência (em unidades cv ou W) em detrimento do caudal [15].

De uma forma simplista, a velocidade específica em função da potência é a velocidade de rotação de uma máquina fictícia, semelhante geometricamente à turbina em estudo, que desenvolve uma unidade de potência para uma queda de um metro [17].

Na análise de aplicação de turbinas, alguns autores optam por utilizar a denominada “velocidade específica em função potência”, isto porque há um maior interesse na potência debitada do que no caudal que a atravessa [18].

A equação (4) apresenta a designada velocidade específica em função da potência, sendo neste caso um valor adimensional [15].

$$N_s = 1.2N \frac{P^{1/2}}{H_b^{1.25}} \quad (5)$$

Onde,  $N_s$  é a velocidade específica,  $N$  é a velocidade de rotação [rpm],  $P$  é a potência [kW] e  $H_b$  a altura de queda bruta [m].

O  $N_s$  também pode ser expresso em função do caudal, também neste caso é adimensional.

$$N_s = N \frac{Q^{1/2}}{Hu^{3/4}} \quad (6)$$

A equação (5) é facilmente entendida se a turbina considerada fosse considerada a trabalhar para produzir 1kW de potência com a altura de 1 m. Neste caso as pás da turbina vão rodar à velocidade específica ( $N=N_s$ ).

A equação (5) permite a seleção de turbinas que rodam exatamente a velocidade pretendida. Conhecendo a altura e a potência de saída (calculado a partir da potência de entrada assumindo uma eficiência de 0.7), a velocidade específica  $N_s$ , pode ser calculado, e uma turbina com essas características pode ser comprado no seu fabricante [15].

A Tabela 4 apresenta uma distribuição típica dos valores de velocidade específica para variados tipos de turbinas, com valores de velocidade específica para velocidade rotação (N) em rpm, potência (P) em kW e altura (H) em metros.

Tabela 4- Velocidades específicas para vários tipos de turbina [17].

Tipo de turbina		$N_s$
<b>Pelton</b>	Lenta (1 injetor)	3-9
	Normal (2 injetor)	8-17
	Rápida (3 ou mais injetores)	17-25
<b>Turgo</b>	-	8-20
<b>Crossflow</b>	-	26-172
<b>Francis</b>	Lenta	50-129
	Normal	129-215
	Rápida	215-388
<b>Kaplan e Axiais</b>	Lenta	258-388
	Normal	388-560
	Rápida	560-688

Embora uma distribuição deste género nunca gere consensualidade na literatura, os valores apresentados por diversos autores não divergem muito dos apresentados na Tabela 4.

Adam Harvey apresenta no seu livro *Micro-Hydro design manual* [15] uma forma célere de se obter o tipo de turbina a utilizar e o diâmetro do rotor através de um ábaco onde os parâmetros são, a velocidade específica, altura de queda bruta e o caudal, como se pode verificar na Figura 18.

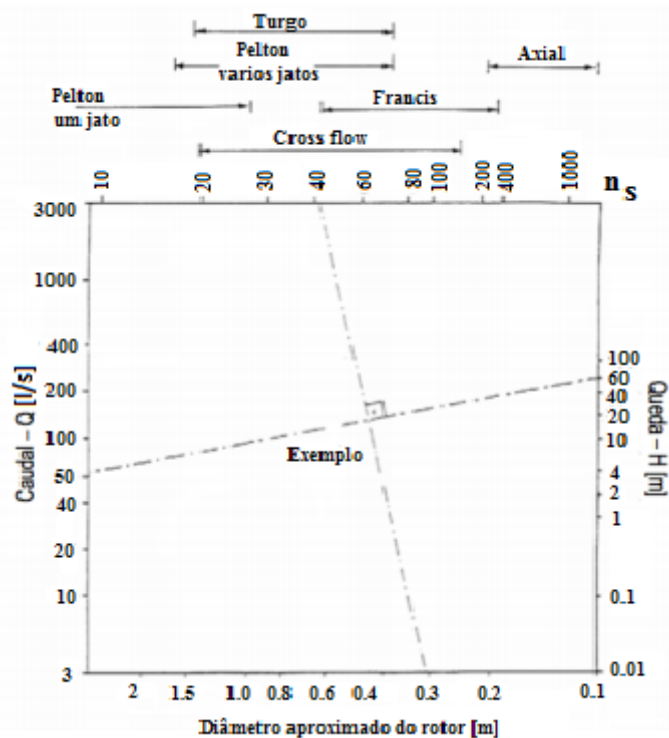


Figura 18- Seleção de turbinas [13].

Assim ligando o caudal a altura de queda com uma reta e fazendo uma reta perpendicular a primeira, fixando a rotação específica é possível saber o diâmetro aproximado do rotor, e assim torna-se mais fácil fazer a escolha da turbina para o aproveitamento, como é apresentado no exemplo da Figura 18 onde o diâmetro obtido foi de 0.3 m.

As turbinas mais usadas na gama das baixas potências são as turbinas **Banki-Mitchell**, também designada por **Crossflow** ou **Ossberger**. Uma turbina Crossflow é fabricada atualmente com uma capacidade de até 800 kW. Os fluxos variam de 25 a 700 l/s (de acordo com as dimensões da máquina), com alturas de queda na faixa de 1 a 200 m, e diâmetros de 200 a 600 mm [10].

O rendimento destas turbinas é inferior aos das turbinas de projeto convencional, mas mantém-se elevado ao longo de uma extensa gama de caudais. Esta característica torna-a adequada à operação num longo espectro de caudais [2], trazendo algumas vantagens quando se trabalha no regime Pico-hídrico pois o caudal de um rio ou uma levada é muito variável dependendo da pluviosidade atual.

Estas turbinas apenas apresentam veios horizontais (diferente das turbinas Pelton e Turgo, onde os veios podem ser horizontais ou verticais) como apresentado na Figura 19. Apresentam uma velocidade de rotação baixa, sendo frequente a necessidade de utilização de multiplicadores de velocidade entre elas e os geradores. Em máquinas mais sofisticadas alcançam-se eficiências na ordem dos 85 % e nas máquinas mais simples na ordem dos 60 a 75%. A sua eficiência pode ser mantida elevada em situações de caudal parcial, até cerca de 50% do caudal. Para tal é necessária ou a inclusão de um dispositivo repartidor de caudal, que determina que partes da turbina são usadas ou através da orientação de um direcionador de caudal, que poderá fazer uma gestão do caudal que será turbinado [8].

Esta máquina torna-se bastante apelativa para aproveitamentos de pequena escala devido a dois motivos:

- Apresenta um design ajustado para uma vasta gama de quedas e potências;
- São de fácil construção, podendo ser implementadas recorrendo a técnicas simples de construção.

Sendo assim tornam-se uma solução interessante para países em desenvolvimento. O seu design simples torna-a barata e de fácil reparação, especialmente no caso de o rotor ser danificado devido ao elevado stress mecânico a que é sujeito [2, 8].

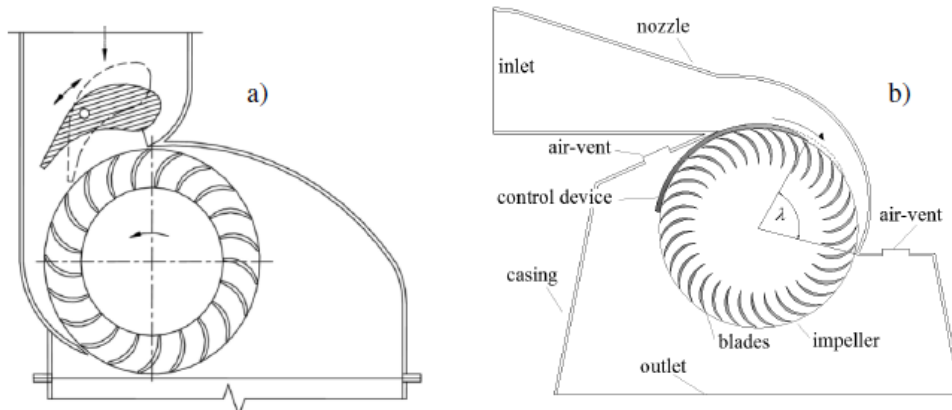


Figura 19-Representação de uma turbina Banki-Mitchell [19].

Para quedas baixas e médias, tem que se levar em conta que a turbina possui uma baixa eficiência quando comparadas com outras turbinas, e uma elevada perda de queda útil, devido ao espaço entre o rotor e a água à jusante. Representam uma alternativa interessante para quando se possui água suficiente, necessidades de potência bem definidas e fraca capacidade de investimento, como no caso de programas de eletrificação rural [8].

A eficiência da turbina é definida pela razão entre a potência de saída da turbina e a energia mecânica da massa que passa por unidade de tempo através da entrada superior da central hidroelétrica, medido respeitando o nível da turbina [19]. Neste caso a entrada superior é a secção de um rio. A eficiência  $\eta$ , é estimada da seguinte forma:

$$\eta = \frac{P_{out}}{\rho g Q H_u} \quad (7)$$

onde,  $P_{out}$  é a potência de saída e  $Q$  é o caudal de descarga e  $H_u$  é a altura de queda útil.

O binário,  $T$ , é dado por:

$$T = \frac{\eta \rho g H Q 60}{2 \pi n} \quad (8)$$

sendo  $n$  a velocidade de rotação [rpm].

Como já foi referido anteriormente, a eficiência da turbina Crossflow se mantém elevado numa vasta gama de caudais, isto só é possível através de um dispositivo de partição que permite 1/3 ou 2/3 das pás se mantenham fechadas como mostrado na Figura 20 [15].

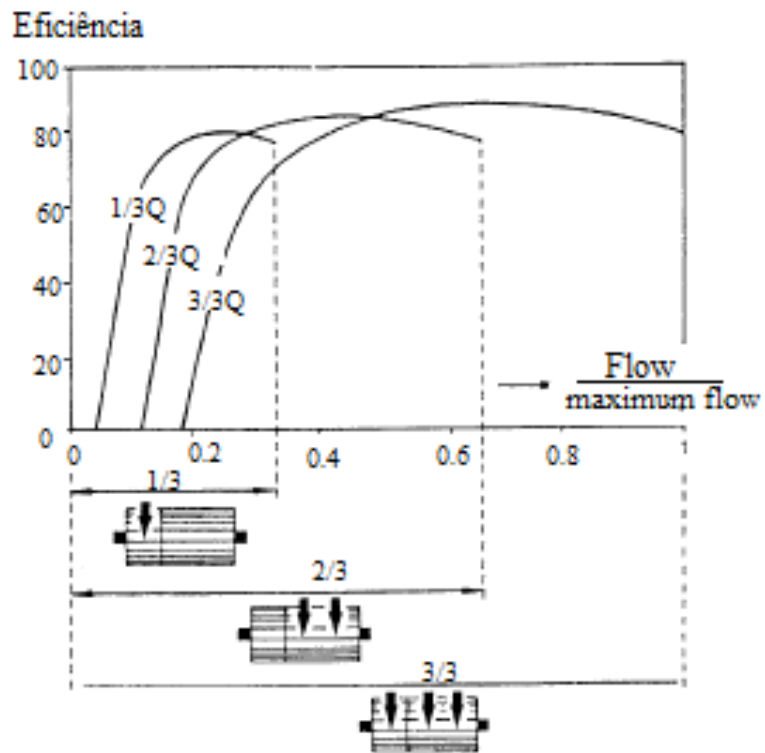


Figura 20- Eficiência da turbina Crossflow [13].

### 3.3. Geradores

O gerador é o elemento que se encontra acoplado à turbina e que realiza a conversão de energia mecânica em energia elétrica. A escolha deste conversor mecano-elétrico depende das especificações impostas à turbina, em termos de rendimento, velocidades nominal e de embalamento, constante de inércia, tipo de regulação, etc. Esta escolha também depende do seu custo e a sua utilização final, ou seja, o tipo de saída elétrica pretendida (por exemplo, CA ou CC) [8, 20].

Atualmente, analisando as opções no mercado, esta escolha está entre o Gerador Síncrono e o Gerador assíncrono (ou de indução).

O **Gerador Síncrono** é utilizado em centrais com potências mais elevadas, onde são exigidas soluções técnicas mais elaboradas e os aspetos económicos são menos críticos. Estes geradores tem, tipicamente, o campo magnético do rotor produzido por ímanes permanentes, em alternativa à excitação externa por uma fonte de CC, sendo normalmente o gerador eleito quando as condições de exploração obrigam a que o gerador seja tecnologicamente mais versátil e autónomo. São máquinas eficientes, simples e fiáveis. Os Geradores Síncronos apresentam a vantagem de poderem ser operados de forma autónoma, sendo normalmente escolhidos para utilizar em aplicações isoladas, isto é, não ligadas à rede [8, 20].

Os **Geradores Assíncronos** constituem, em geral, a solução técnica e economicamente preferível, devido às suas conhecidas características de robustez, fiabilidade e economia. Estes geradores, por sua vez, criam por indução do estator, um campo magnético no rotor, apresentam um custo inferior aos Geradores Síncronos e, devido às suas características de robustez e fiabilidade tornam-se os mais adequados para aplicações ligadas à rede, constituindo assim, em geral, a solução técnica e economicamente preferível [8, 20].

#### 3.3.1. Gerador Síncrono

A máquina síncrona faz parte da classe de máquinas de CA, sendo vulgarmente designada por alternador. O alternador é de todos os geradores elétricos o mais importante, uma vez que é o utilizado na produção tradicional de energia elétrica. Estes apresentam uma frequência  $f$ , rigidamente definida pela velocidade de rotação  $N$  e pelo número de pares de polos  $p$ , através

da relação  $N = \frac{f}{p}$  [rpm] [9].

Assim, nas máquinas síncronas a velocidade de rotação do veio é igual à velocidade de sincronismo. Sendo que as máquinas síncronas operam a velocidade constante em absoluto sincronismo com a frequência da tensão de alimentação. Estas encontram-se divididas em quatro categorias, as máquinas de excitação eletromagnética, máquinas de relutância, máquinas de histerese e as máquinas de ímanes permanentes.

Um simples Gerador Síncrono a fornecer potência ativa a uma impedância de carga, atua como uma fonte de tensão com frequência determinada pela velocidade da máquina primária. A corrente e o fator de potência são então determinados pela excitação, e pela impedância do gerador e da carga.

Na Figura 21 é apresentado um esquema de um Gerador Síncrono, apresentando um corte onde se pode ver o interior do núcleo estatórico, os enrolamentos, amortecedores e indutores, ambos no rotor.

Nesta máquina síncrona, o estator é composto por um núcleo magnético de material ferromagnético em forma cilíndrica, onde se encontra o enrolamento polifásico induzido da máquina (habitualmente trifásico).

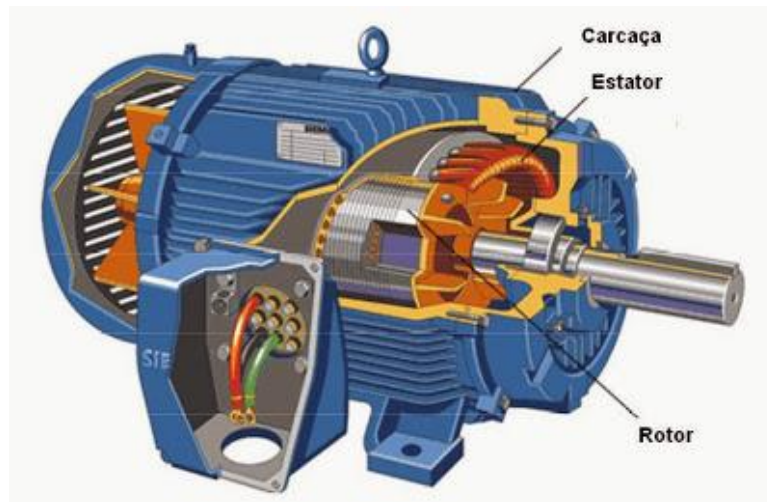


Figura 21- Esquema de um Gerador Síncrono (<http://automoveiseletricos.blogspot.pt>).

O circuito estatórico, que é formado pelo enrolamento polifásico, é distribuído em ranhuras situadas na superfície do circuito magnético estatórico. O circuito magnético destas máquinas é formado por um empacotamento de chapas magnéticas. Para a alimentação das bobinas de excitação dos polos indutores que se situam no rotor, o Gerador Síncrono necessita de uma fonte de corrente contínua, podendo depois alimentar uma carga isolada ou, como é mais frequente, este pode estar integrado numa rede a qual estão ligados outros geradores, todos rodando em sincronismo [8, 9].

As máquinas síncronas de ímanes permanentes atuais são bastante competitivas no mercado atual, tanto com as máquinas síncronas convencionais como com as de indução. Estruturalmente, estas devem ser o mais simples possível para que, da sua construção, resulte um preço capaz de competir com outras máquinas de igual potência nominal.

Neste laboratório foi feita a caracterização de um Gerador Síncrono de ímanes permanentes, esta caracterização é mostrada mais a frente.

### 3.3.2. Gerador Assíncrono ou de indução

O Gerador Assíncrono é uma máquina elétrica de indução, os quais não são muito utilizados em grandes aproveitamentos hidroelétricos mas apresentam-se como bastante atrativos para pequenas aplicações como mini-centrais devido a suas já conhecidas robustez e simplicidade de utilização[8, 9].

Num motor de indução, a velocidade de rotação do rotor é diferente da velocidade do campo magnético (velocidade sincronismo) [21]. Esta diferença de velocidades é chamada de deslizamento  $s$  (%) e pode ser calculado por:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\% \quad (9)$$

onde,  $n_s$  é a velocidade de sincronismo e  $n$  é a velocidade de rotação do rotor.

A máquina assíncrona funciona como gerador quando a velocidade do rotor for superior à do campo girante, ou seja, à velocidade de sincronismo imposta pela frequência da rede. O deslizamento é então negativo. Nestas condições a máquina fornece potência ativa à rede, absorvendo desta a potência reativa necessária à criação do campo magnético e é sujeita a um binário eletromagnético resistente. O deslizamento negativo da máquina como gerador é igual em valor absoluto ao deslizamento da mesma máquina como motor à mesma potência. A uma certa tensão e frequência da rede, a potência debitada pelo gerador depende exclusivamente do deslizamento. A velocidade ajusta-se automaticamente à potência mecânica disponível no veio, desde que o binário motor não exceda o binário resistente.

O Gerador de Indução é normalmente acelerado em vazio até à velocidade de sincronismo. É então feito o paralelo com a rede, sem contudo necessitar de quaisquer medidas especiais de sincronização (nem de fase, nem de frequência).

Na Figura 22 é apresentado um esquema de um Gerador de Indução em Gaiola de esquilo, onde o seu rotor apresenta um núcleo ferromagnético laminado com ranhuras em que se encaixam as barras condutoras que o integram, sendo estas curto-circuitadas por anéis coletores nas extremidades. Assim o fluxo magnético, ao atravessar os condutores do enrolamento rotórico, vai gerar forças eletromotrizes. Como os condutores estão em curto-circuito, vão ser percorridos por correntes elétricas. A presença destas correntes no seio do campo magnético vai fazer com que apareçam forças mecânicas que, combinando-se, produzem o binário eletromotor da máquina. Este procura fazer girar o rotor à velocidade do campo magnético, que como foi dito anteriormente é imposto pela rede.

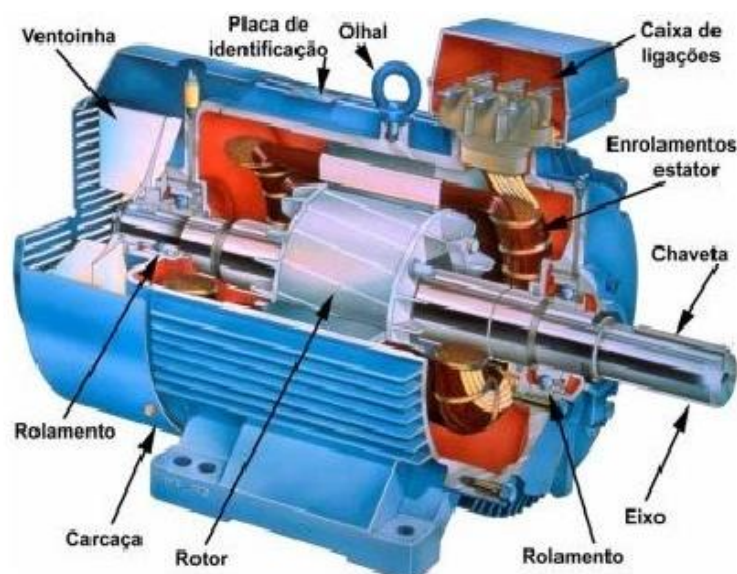


Figura 22- Esquema de um Gerador de Indução (<http://www.portaleletricista.com.br>)

Pela forma construtiva do rotor e os seus enrolamentos, o Gerador de Indução pode ser denominado em gaiola de esquilo, nome que é atribuído ao rotor devido a semelhança com as gaiolas em que os esquilos brincam, quando em cativeiro. Este gerador pode ser utilizado em sistemas de velocidade constante, ligado diretamente à rede elétrica recorrendo a um banco de condensadores ligados em paralelo com a rede, que realiza a tarefa de compensação da potência reativa. Este gerador também permite operar com velocidade variável, ligado indiretamente à rede, recorrendo a conversores de potência bidirecionais *back-to-back*, que impõem a frequência fixa [8].

Quando a ligação dos enrolamentos do rotor com o exterior é efetuada com recurso a anéis coletores e escovas o Gerador de Indução ganha o nome de rotor bobinado. O gerador é ligado diretamente à rede, em paralelo com um banco de condensadores, que realiza a tarefa de compensação da potência reativa. Por outro lado, permite operar ligando os enrolamentos do estator diretamente à rede, assim como os enrolamentos do rotor interligados com o conversor de potência bidirecional *back-to-back* ligado paralelamente a rede elétrica. Esta topologia é designada vulgarmente por duplamente alimentado, pelo facto da tensão no estator ser aplicada a partir da rede e a tensão no rotor ser induzida pelo conversor de potência [8].

Graças à maneira como é construído, o Gerador Assíncrono pode ser ligado diretamente à rede elétrica, aproveitando o efeito da corrente alternada para funcionar. Isto pode acontecer mesmo fazendo a ligação diretamente com a máquina rodando a uma velocidade próxima da nominal - que dá lugar a um pico de corrente resultante de o campo magnético no entreferro ser nulo - quer autoexcitando-a por meio de uma bateria de condensadores de valor adequado e fazendo o paralelo de forma semelhante ao de uma máquina síncrona - que não da origem a qualquer sobre-corrente [8].

### 3.3.3. Gerador Síncrono Vs Gerador Assíncrono

A comparação entre os geradores é feito aqui com o objetivo de analisar o uso do Gerador Síncrono de ímanes permanentes neste trabalho em alternativa ao Gerador de Indução.

O Gerador de Indução, para igual potência, é mais pequeno e simples (rotor em gaiola de esquilo) do que o Gerador Síncrono. Este último, se de ímanes permanentes, não necessita de excitatriz e não tem exigências particulares em relação ao momento de inércia (menores diâmetros para a mesma potência). A utilização do Gerador de Indução de rotor em gaiola de esquilo requer uma bateria de condensadores para criar o campo girante, de forma a minimizar o consumo de energia reativa da rede, se ligado a esta. Como não dispõe de excitatriz, o Gerador de Indução, não é influenciado do lado do rotor, deste modo o seu fator de potência decresce muito para pequenas frações de potência e daí a sua utilização preferencial deve ser para potências constantes, o que muitas vezes não acontece nas pequenas aplicações hídricas onde, devido à natureza do recurso hídrico, este apresenta variações sazonais que irão implicar maior ou menor potência [22].

Assim o Gerador Síncrono de ímanes permanentes apresenta-se como uma opção muito promissora, pois é passível de incorporar um elevado número de polos, o que permite excluir a caixa de velocidades, podendo este trabalhar em velocidade variável, quando desacoplado eletricamente da rede através de um inversor, opção que no contexto das Pico-hídricas apresenta um potencial muito elevado, que devido à natureza do recurso hídrico, não perde eficiência aquando das variações do caudal. O funcionamento em velocidade variável é apresentado a seguir a este subcapítulo.

Contrariamente ao Gerador de Indução, os pontos de funcionamento da máquina síncrona situam-se numa superfície limitada pelas características de estabilidade estática e dinâmica. Quer isto dizer que as máquinas síncronas podem funcionar economicamente em regime de cargas parciais sem qualquer dispositivo de compensação de fator de potência [22].

Assim uma pequena central hídrica equipada com um Gerador Síncrono a funcionar em velocidade variável é uma solução bastante atrativa, dispensando assim o uso de uma caixa de velocidades, acumulando as vantagens que isso implica em termos de robustez e simplicidade.

### 3.4. Velocidade Fixa vs Velocidade Variável

A introdução da eletrónica de potência nas últimas três a quatro décadas tem, de certo modo, auxiliado ao desenvolvimento dos sistemas das centrais hidroeléctricas. Inicialmente, apenas era usado as máquinas convencionais síncronas. Mais tarde, apesar de o seu custo ser elevado, algumas soluções de eletrónica de potência começaram a aparecer, tornando possível a velocidade variável em máquinas síncronas [23].

Em condições normais de funcionamento, as turbinas das centrais hídricas são otimizadas para um ponto de operação definido pela velocidade de rotação, pela queda e pela descarga. Quando a exploração é realizada a velocidade fixa, uma variação num destes parâmetros causa uma redução na eficiência da máquina, mas se a central trabalhar em velocidade variável, como é mostrado na Figura 23, há um aumento no rendimento [23].

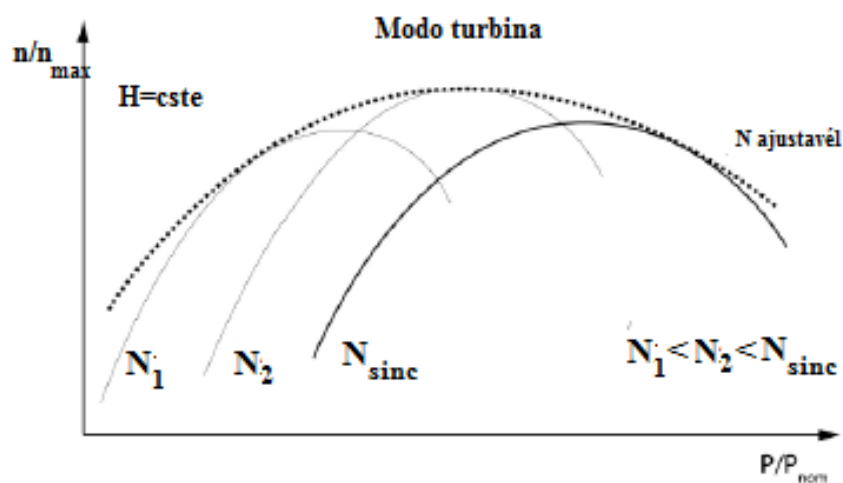


Figura 23- Vantagens das máquinas de velocidade variável comparando com as de velocidade fixa [21].

O objetivo é usar centrais Mini-Hídricas, equipadas com máquinas de velocidade variável para tentar equilibrar de uma forma mais eficiente o balanço entre a procura e oferta durante a noite. Deste modo a eficiência das centrais Mini-Hídricas pode aumentar muito se estivessem preparados para trabalhar em regime de velocidade variável, possibilitando um grande aumento na captura de energia.

Para poder otimizar a potência produzida, em função do caudal de um rio por exemplo, é desejável que se possa regular a velocidade do gerador. O objetivo é ter um gerador a frequência fixa e velocidade variável. O gerador a velocidade variável permite o funcionamento numa larga gama de caudais, extraíndo assim, o máximo da potência do recurso hídrico. No funcionamento

a velocidade variável, o sistema encontra-se regulado de forma que, para cada velocidade do caudal, o gerador encontre a potência máxima, desde que explorado num regime de seguimento do ponto de potência máxima [24, 25].

Considerando os recentes avanços nos geradores de baixa velocidade para sistemas de energia eólica de baixa potência com soluções “off-the-shelf”, por exemplo, as centrais Pico-hídricas podem ser objeto de estudo e aplicação dessas soluções não convencionais, de modo a torná-los mais eficientes.

Em funcionamento a velocidade variável, a frequência e a amplitude da tensão de saída do gerador são variáveis com a velocidade de rotação. Por forma a poder fazer a ligação à rede de distribuição eléctrica esta tensão é convertida através de conversores e filtros de potência intercalados entre a máquina (síncrona ou assíncrona) e a rede. Normalmente, este conjunto de electrónica de potência é constituído por um retificador da tensão de saída do gerador e por um ondulador cuja tensão de saída apresenta a amplitude e a frequência da rede [24].

No caso eólico, um gerador assim equipado pode suportar rajadas de vento e reduzir as solicitações mecânicas, sendo que no caso hídrico como dito anteriormente permite um aumento significativo na captação de energia.

Uma solução que apresenta grandes vantagens para resolver o problema da velocidade variável é o uso de inversores fotovoltaicos na gama dos 5 kW, para desacoplar o gerador da rede, e permitir que os geradores possam trabalhar em velocidade variável. Esta solução apresenta, tanto a vertente económica como a facilidade de montagem e manutenção como vantagens em relação as outras, bem como o facto da tecnologia fotovoltaica ser uma tecnologia bem madura e abundante no mercado.

Assim considerando todas as soluções no mercado atual, a integração dos inversores fotovoltaicos em aplicações Pico-hídricas de velocidade variável conectados a rede se apresenta como bastante atrativo [26].

Para que esta solução funcione de forma segura e confiável é só necessário garantir que os parâmetros de entrada do inversor sejam respeitados, para que este possa interagir de maneira apropriada com o gerador. Para tal é necessário fazer o estudo de integração de um inversor fotovoltaico e um determinado gerador de modo a combinar as suas áreas de funcionamento. De facto, o funcionamento de um gerador é bastante diferente do funcionamento de um painel fotovoltaico, mas em certas condições em termos de tensão e gama de potências, a solução pode ser bastante confiável e eficiente, beneficiando das vantagens anteriormente mencionadas. A análise destas condições de integração do gerador com um inversor fotovoltaico convencional é feita no trabalho “Compatibility Analysis of Grid-connected Pico-hydro Systems using Conventional Photovoltaic Inverters” [26]

## Capítulo 4

### 4. Plataforma experimental de emulação de turbinas Pico-hídricas

Neste capítulo é descrito como foi feito o processo de emulação da turbina e os ensaios em vazio e em carga que foram realizados de modo a caracterizar o gerador. Estes ensaios foram realizados em duas situações: com o gerador ligado em estrela e com o gerador ligado em triângulo, para que, no fim possa, ser obtida uma “chapa” de características do gerador. O facto de caracterizarmos o gerador ligado em estrela e em triângulo, é como se estivéssemos a emular dois geradores distintos com níveis de corrente e tensão distintos, e assim estudar a sua ligação com os inversores mais a frente neste trabalho.

#### 4.1. Emulação da turbina hídrica

A emulação de uma turbina hídrica é de grande valia, pois possibilita a pesquisa de um sistema de geração hídrica em bancada experimental, sem os custos da instalação de uma turbina real. Por isso, foi necessário desenvolver um emulador que represente, tão precisamente quanto possível, o comportamento dinâmico de uma turbina hídrica.

Em termos de implementação prática, a emulação de uma turbina hídrica pode ser realizada através de um motor de indução, devidamente controlado por um conversor de frequência convencional, parametrizado de forma adequada, como se pode ver na Figura 24. O motor de indução utilizado no laboratório é de 3 kW e o conversor de frequência é o ACS600 da ABB drives [27, 28].

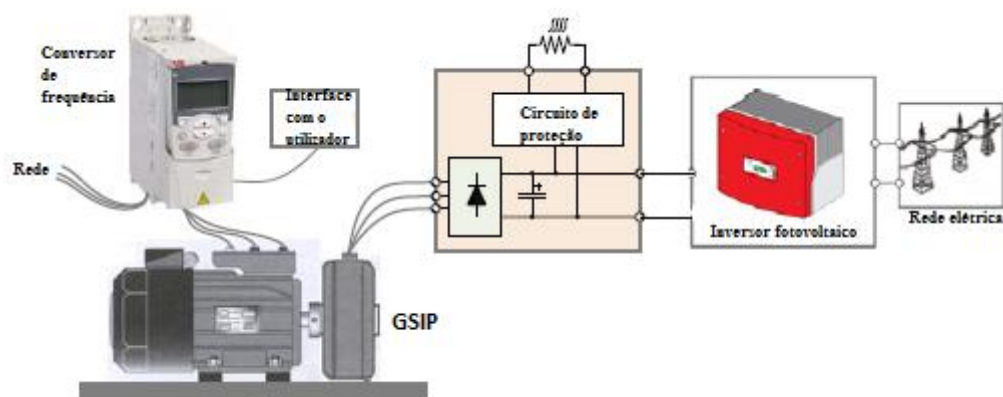


Figura 24- Diagrama da emulação.

O conversor de frequência e o motor de indução trifásico (no lado esquerdo da figura) realizam a emulação da turbina a qual é conectada ao Gerador Síncrono de ímãs permanentes. Este, por sua vez, é ligado a uma ponte retificadora para a conversão de CA para CC. À entrada do inversor, que faz a ligação à rede elétrica, introduzido um circuito de proteção, desenvolvido no laboratório, para evitar sobretensões destrutivas para o inversor e velocidades excessivas para o gerador, evitando o seu funcionamento em vazio.

A emulação da turbina hídrica é realizada através do controlo em potência do motor de indução, utilizando a macro PID do conversor de frequência que compara a potência do motor, estimada pelo próprio conversor de frequência, com o valor e referência introduzido pelo operador.

A aplicação prática disto é que, num aproveitamento hídrico, a cada valor de caudal vai corresponder uma potência elétrica a uma dada velocidade de rotação na turbina. Em laboratório é imposta ao motor de indução uma potência, da qual resultará uma velocidade de rotação e um binário do gerador.

Normalmente, as principais características de uma turbina hídrica são: binário vs. velocidade, potência vs. velocidade e eficiência vs. velocidade. Em termos de binário, além do facto de que tem uma característica linear decrescente com a velocidade, o seu valor é também influenciado pelo grau de admissão da turbina. Ao fundir as variações de binário e potência a com velocidade num gráfico, resulta a curva característica representada na Figura 25.

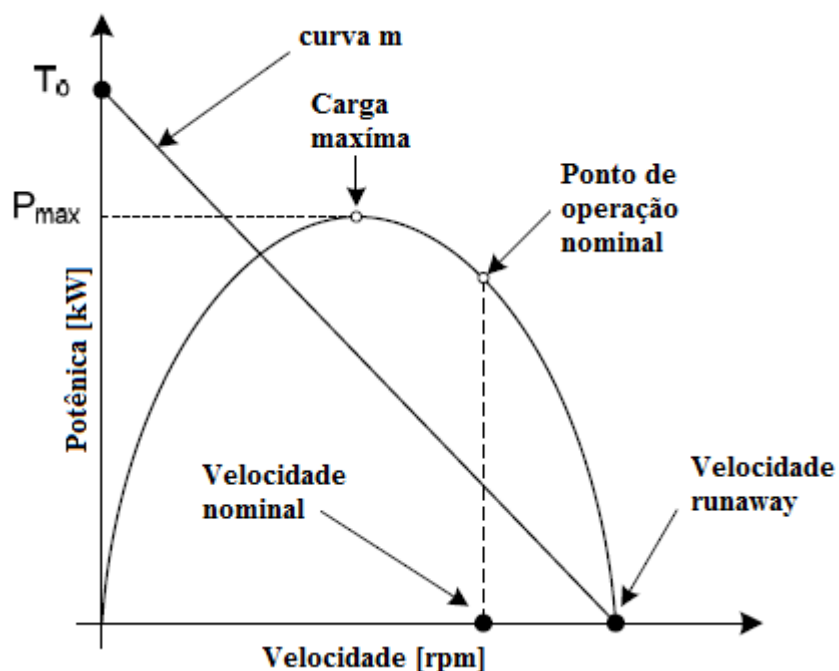


Figura 25- Característica de binário e potência em função da velocidade de uma turbina hídrica [25].

Ao assumir a potência da turbina constante, a característica velocidade vs. Binário de uma turbina de impulsão pode ser expressa através da seguinte relação linear [27]:

$$T = T_0 - m\omega \quad (10)$$

onde  $T$  é o binário no veio da turbina,  $m$  é o declive da característica de  $T(\omega)$ ,  $T_0$  é o binário a 0 rpm, e  $\omega$  é a velocidade angular.

A energia mecânica no veio da turbina pode ser obtida multiplicando a equação (10) pela velocidade angular,  $\omega$ :

$$P = \omega T = \omega T_0 - m\omega^2 \quad (11)$$

Assim feita a emulação já sabemos a partida como irá se comportar o gerador aquando das variações do caudal e conseqüentemente como isto irá afetar o inversor, pois este aceita um valor mínimo de tensão para poder se iniciar e começar a fazer a entrega de potência à rede. Isto é estudado no ato da caracterização do gerador, ponto que é tratado mais a frente.

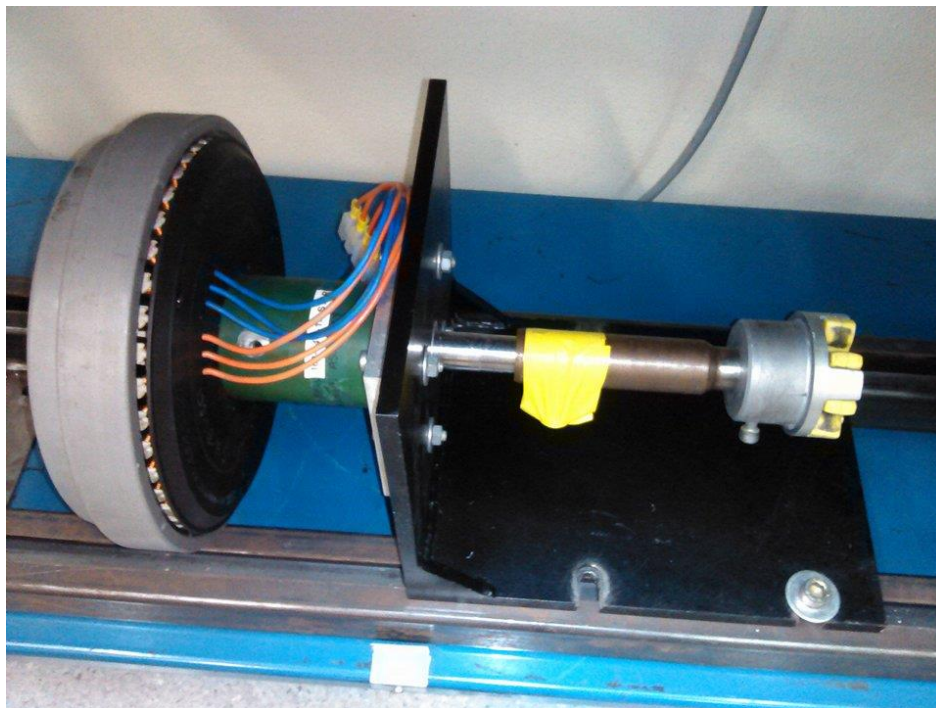
Como gerador, foi utilizado um “smart drive” da Eco Innovation, transformado num Gerador Síncrono de ímanes permanentes, com referência 100-14s-1p, capaz de produzir uma potência de 1.25 kW às 1500 rpm.

Com efeito, o gerador usado neste projeto era anteriormente usado como uma máquina de lavar industrial, o qual foi desmontado e adaptado para este tipo de aplicações. A caracterização do gerador é bastante importante, pois ficasse a saber as suas características e compreendemos melhor o seu modo de funcionamento, bem como alguns valores de tensão e corrente que geralmente não são fornecidos pelo fabricante ou em caso de perda da chapa de características. A Tabela 5 mostra a chapa de características do gerador obtida no ato da caracterização do mesmo, com os valores tanto da ligação em estrela como em triângulo.

*Tabela 5-Chapa de características do gerador.*

	1500 rpm							
	V/rpm	W/rpm	$V_{LL}$ [V]	$V_{DC,oc}$ [V]	$V_{DC}$ [V]	$I_{DC}$ [A]	$P$ [kW]	$I_g$ [A]
<b>100-14s-1p star</b>	0,17	até 1	209,9	379,69	259,57	4,8	1,25	3,5
<b>100-14s-1p delta</b>	0,1	até 1	120,6	223,4	148,2	8,4	1,24	6,2

Na Figura 26 é possível ver o Gerador Síncrono de ímanes permanentes usado no laboratório de Eletrotécnica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão para os diversos ensaios que vieram a culminar na sua caracterização, emulação e os diversos testes ligados à rede elétrica.



*Figura 26- Smart drive da eco innovation 100-14s-1p.*

## 4.2. Caracterização do Gerador Síncrono de ímanes permanentes

A caracterização do Gerador Síncrono de ímanes permanentes passa por realizar alguns ensaios prévios de modo a obter parâmetros do gerador, cujos procedimentos serão descritos a seguir.

Como parte integrante do circuito de testes, como mencionado anteriormente, foi também utilizado um circuito de proteção, pois este sistema requer uma proteção contra sobretensões, a fim de proteger a integridade do circuito contra estados especiais de funcionamento. Estes estados podem ser a saída de funcionamento do inversor devido à falha ou falta de sincronização com a rede, ou devido a ocorrências de baixa demanda de energia nos sistemas isolados, com produção de energia excessiva, ou também quando a turbina hídrica inicia (ou é reiniciada) e o inversor ainda não iniciou a injeção de energia na rede.

Para que o sistema seja uma solução economicamente vantajosa, fiável e robusta, o circuito de proteção contra sobretensões utiliza um circuito eletrônico para dissipar o excesso de potência numa resistência auxiliar, de potência, de modo a limitar a velocidade do gerador e, conseqüentemente, não deixar a tensão do gerador ultrapassar um dado valor.

O circuito de proteção é apresentado na Figura 27 e inclui um divisor de tensão com um potenciômetro ( $P = 10\text{ K}$ ) para definir o nível de tensão para o qual o IGBT vai ligar e colocar o gerador em carga, através da resistência auxiliar, ligada ao barramento DC e, assim, dissipar a potência, não deixando o gerador funcionar em vazio e, dessa forma, produzir tensões elevadas que podem danificar o sistema.

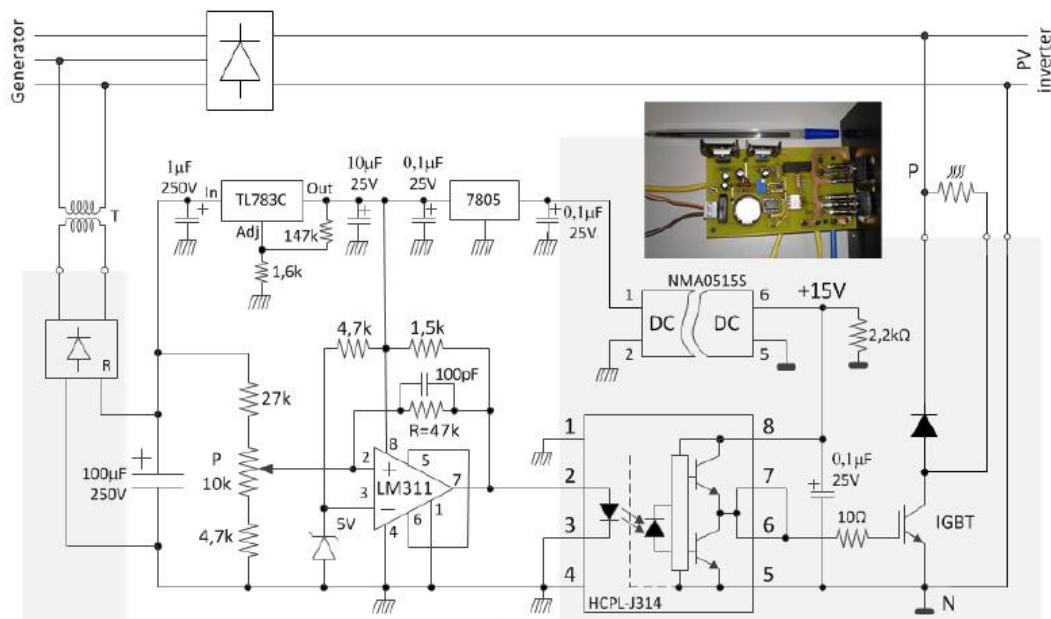


Figura 27- Circuito de proteção.

### 4.2.1. Ensaios em vazio

Como o próprio nome indica este ensaio é executado sem nenhuma carga acoplada ao veio do gerador, acionando o motor a velocidades crescentes, tendo-se registado os valores da tensão composta ( $V_{LL}$ ) e tensão retificada ( $V_{dc}$ ). O ensaio em vazio foi realizado em duas situações, a primeira com o gerador em estrela e a segunda com o gerador em triângulo. Com o gerador

ligado estrela e em triângulo é como se tivéssemos dois geradores distintos, com níveis de tensões e correntes diferentes obtendo diferentes resultados.

A configuração do circuito para estes ensaios é apresentada na Figura 28, sendo esta constituída pelo motor de indução, controlado pelo variador de frequência, uma ponte retificadora e um condensador. O variador de frequência neste ensaio faz um controlo em velocidade do motor, permitindo assim ir aumentando ou diminuindo a velocidade como é mostrado na Tabela 6.

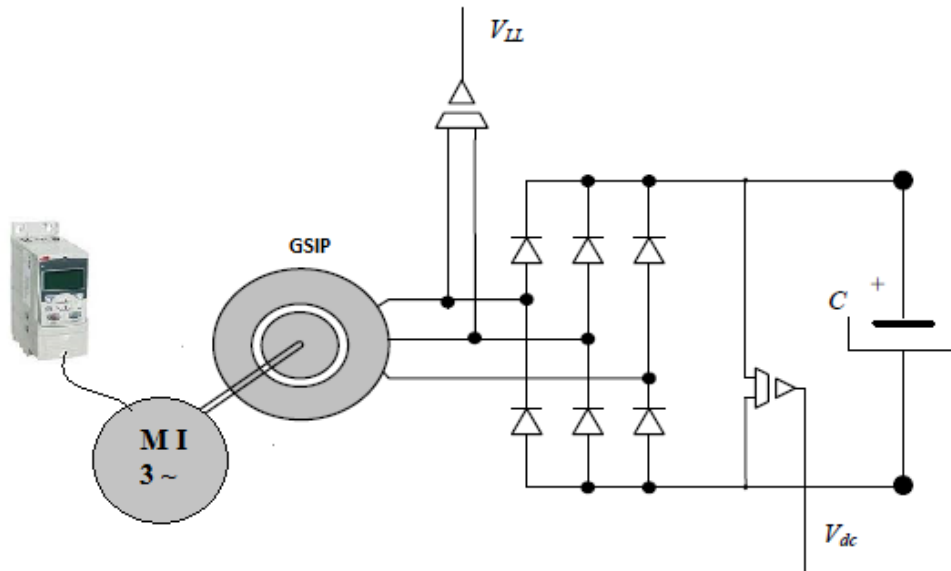


Figura 28-Circuito implementado para os ensaios em vazio.

A Figura 28 é apresentada com o intuito de mostrar como é feito a medição do  $V_{LL}$  e do  $V_{DC}$ , sendo que o  $V_{LL}$  é medido a saída do gerador e o  $V_{DC}$  é medido a saída da ponte retificadora. Os dados recolhidos do ensaio em vazio com o gerador ligado em estrela estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Resultados no ensaio em vazio.

Gerador em estrela		
$N$ [rpm]	$V_{LL}$ [V]	$V_{dc,oc}$ [V]
500	94,4	129,57
600	112,9	155,24
700	131,5	180,79
800	150,3	206,09
900	168,6	231,37
1000	187,1	256,49
1100	205,5	281,48
1200	223,8	306,3
1300	242,2	331
1400	260,3	355,29
1500	278,4	379,69

A tensão é diretamente proporcional a velocidade, como temos um aumento da velocidade vamos ter um aumento nas duas tensões medidas também, sendo assim a representação gráfica da tensão em função da velocidade é, como seria de esperar uma reta, de acordo com a Figura 29. Assim à velocidade nominal, a tensão circuito aberto é de 379.69 V.

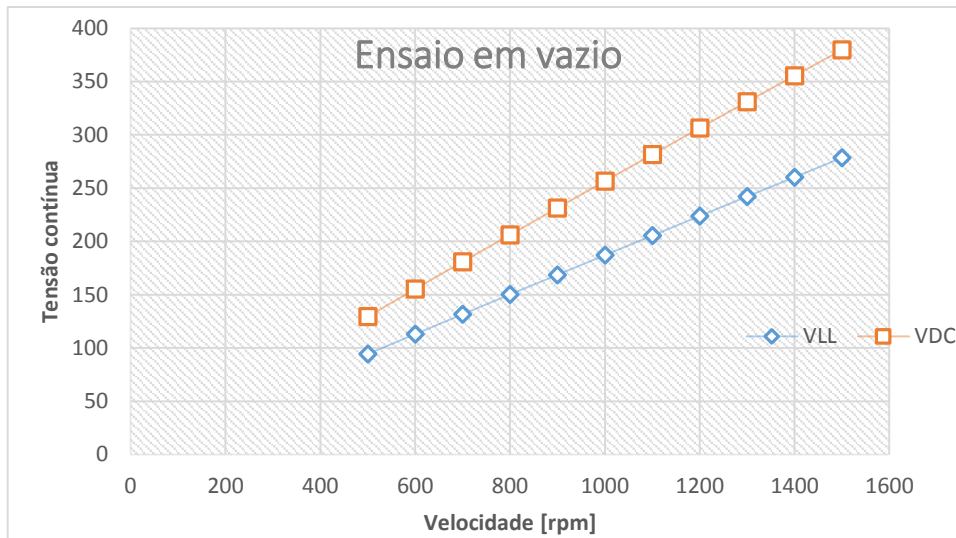


Figura 29- Ensaio em vazio gerador em estrela.

O ensaio em vazio com o gerador ligado em triângulo segue o mesmo procedimento do anterior, sendo refeita as ligações do gerador para a ligação em triângulo. Quando o gerador é ligado em triângulo espera-se que os valores da tensão diminuam e da corrente aumentem, como o ensaio é em vazio o valor da tensão continua nulo, apenas diminuindo as tensões.

Na Tabela 7 é apresentado os resultados obtidos para o ensaio em vazio com o gerador ligado em triângulo.

Tabela 7- Resultados no ensaio em vazio com gerador ligado em triângulo.

Gerador em triângulo		
<i>N</i> [rpm]	<i>VLL</i> [V]	<i>Vdc,oc</i> [V]
<b>500</b>	54,5	75,5
<b>600</b>	65,3	90,5
<b>700</b>	76	105,5
<b>800</b>	86,8	120,5
<b>900</b>	97,5	135,3
<b>1000</b>	108,1	150,17
<b>1100</b>	118,7	165
<b>1200</b>	129,4	179,6
<b>1300</b>	140	197,3
<b>1400</b>	150,6	208,9
<b>1500</b>	161,2	223,4

A representação gráfica da tensão em função da velocidade é, também como seria de esperar uma reta, pela mesma razão anterior sendo a tensão diretamente proporcional a tensão, isto é melhor visto na Figura 30. À velocidade nominal podemos ver que a tensão de circuito aberto é de 223,4 V.

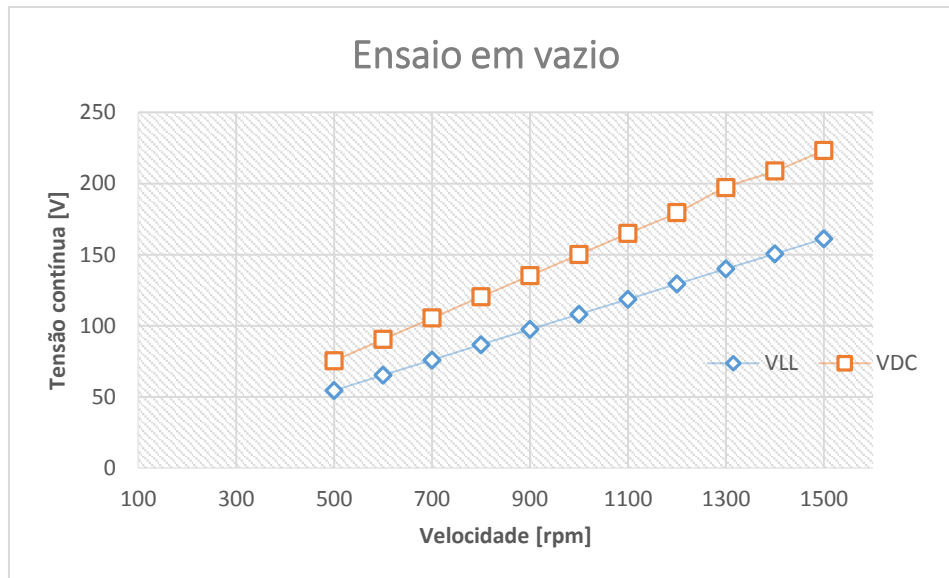


Figura 30- Ensaio em vazio com gerador ligado em triângulo.

Assim foi concluído os ensaios em vazio, onde ocorreu o que se esperava neste tipo de ensaios, que principalmente tinha como objetivo ver o aumento da tensão composta e da tensão DC com a velocidade.

#### 4.2.2. Ensaios em carga

Os ensaios em carga foram realizados numa primeira fase, impondo uma resistência com um valor fixo que é calculado através dos valores de corrente e tensão DC nominais da chapa de característica do gerador. Este procedimento é necessário para se poder estimar o valor da resistência que é utilizada como carga. Feito isso passamos aos ensaios medindo assim a evolução das diversas grandezas com o aumento da velocidade de acionamento.

Numa segunda fase, com o intuito de estudar o comportamento do sistema à plena carga, impomos uma resistência variável, que de uma medição para a outra é reajustada variando um reóstato, com o objetivo de este “puxar” sempre uma corrente constante igual à nominal do gerador com a ligação em estrela e em triângulo.

Na Figura 31 apresentam-se esquematizados os circuitos de potência e de medição para o ensaio com carga fixa, sendo que para a ligação em estrela de modo a “puxar” a corrente nominal do gerador precisaríamos de uma resistência  $R_Y=50 \Omega$ , e com a ligação em triângulo uma resistência  $R_D= 18.2\Omega$ . Este valor foi calculado segundo as formulas abaixo apresentadas, sendo que a resistência em estrela foi obtido através da lei de Ohm, com os parâmetros DC nominais do gerador, e os parâmetros da ligação em triângulo (corrente tensão e resistência) foram obtidos aplicando as leis de transformação de corrente e tensão em estrela para triângulo, como é mostrado a seguir.

$$\begin{aligned}
 R_y &= \frac{U_{y\text{nom}}}{I_y} & I_{\Delta} &= \sqrt{3} I_y & U_{\Delta} &= \frac{U_y}{\sqrt{3}} & R_{\Delta} &= \frac{U_{\Delta}}{I_{\Delta}} \\
 R_y &= \frac{261,8}{4,8} & I_{\Delta} &= \sqrt{3} \cdot 4,8 & U_{\Delta} &= \frac{261,8}{\sqrt{3}} & R_{\Delta} &= \frac{151,15}{8,31} \\
 R_y &= 50,1 \Omega & I_{\Delta} &= 8,31 \text{ A} & U_{\Delta} &= 151,5 \text{ V} & R_{\Delta} &= 18,2 \Omega
 \end{aligned}$$

Na Figura 31 é apresentado o esquema básico do ensaio, que difere do anterior nos circuitos de medição e também depois do condensador onde é inserido uma carga fixa. Carga esta, que no ensaio em estrela é conseguida através do paralelo de duas resistências de 42  $\Omega$  em série com uma resistência de 33  $\Omega$ . Já foi referido anteriormente que era preciso uma resistência mínima de 50  $\Omega$ , sendo que o total conseguido com as resistências neste laboratório foi de 54  $\Omega$ .

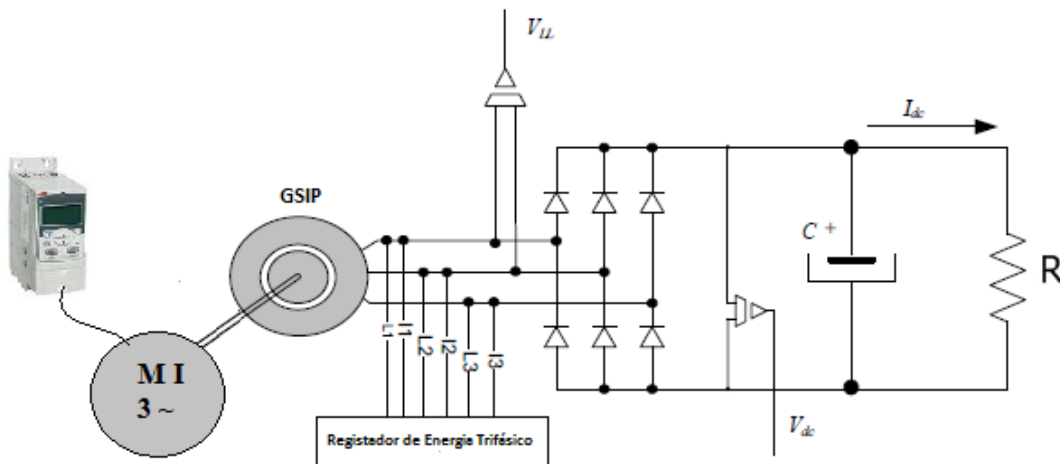


Figura 31- Circuito implementado para os ensaios em carga.

Os dados do ensaio em carga com o gerador em estrela são mostrados na Tabela 8, sendo que a trabalhar em regime nominal este gerador consegue fornecer uma potência DC de 1,26 kW, que é dissipada pela resistência.

Tabela 8- Resultados nos ensaios em carga com gerador em estrela.

Ensaio em Carga R=54 $\Omega$							
N [rpm]	$V_{LL}$ [V]	$I_g$ [A]	$P_g$ [kW]	PF	$V_{DC}$ [V]	$I_{DC}$ [A]	$P_{DC}$ [kW]
500	85,5	1,5	0,2	0,93	104,62	1,92	0,20
600	100,6	1,7	0,28	0,93	122,54	2,25	0,28
700	115,8	2	0,37	0,94	144,2	2,59	0,37
800	130,3	2,2	0,47	0,94	159,3	2,93	0,47
900	144,2	2,4	0,58	0,95	176,71	3,25	0,57
1000	157,5	2,6	0,69	0,96	193,11	3,55	0,69
1100	169,7	2,8	0,81	0,96	208,8	3,84	0,80
1200	181,3	3	0,93	0,96	223,4	4,11	0,92
1300	193,3	3,2	1,04	0,97	237,1	4,36	1,03
1400	202,2	3,4	1,16	0,97	250	4,6	1,15
1500	211,9	3,5	1,27	0,97	261,8	4,8	1,26

A Figura 32 descreve a evolução da potência DC relativamente à tensão DC, que, a menos da queda de tensão na impedância do gerador, é proporcional à velocidade de acionamento.

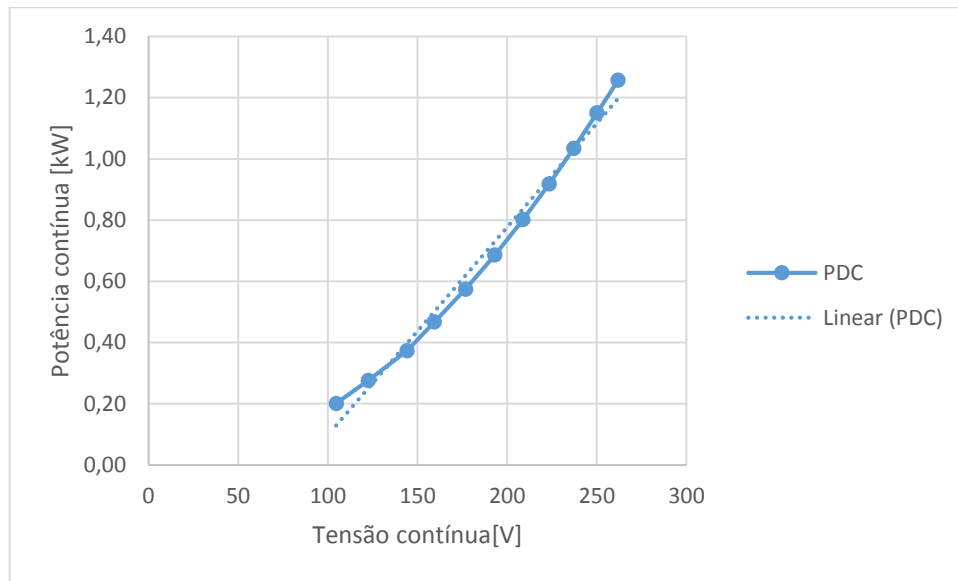


Figura 32- Ensaio em Carga (R fixa) com gerador em estrela.

O ensaio à plena carga, i.e., impondo na saída do gerador a corrente nominal (aproximadamente 3.5 A), é obtida para várias velocidades, fazendo um reajuste à carga, que neste ensaio é uma resistência variável (reóstato), onde para cada velocidade é definido um novo valor de resistência de modo a manter a corrente do gerador constante e igual a 3,5 A, conforme ilustrado na Figura 33.

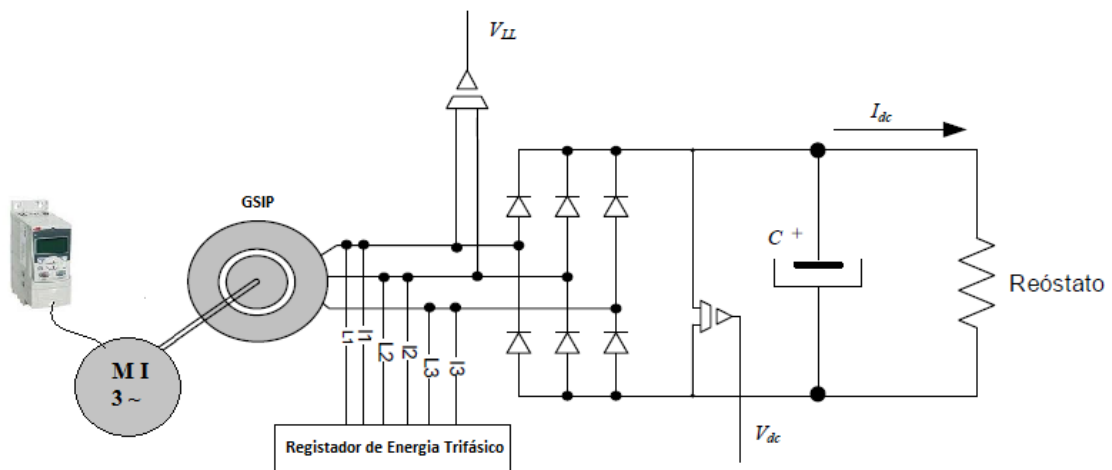


Figura 33- Circuito implementado para os ensaios em plena carga.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9- Resultados obtidos nos ensaios em plena carga com gerador ligado em estrela.

Ensaio em carga variável							
$N$ [rpm]	$V_{LL}$ [V]	$I_g$ [A]	$P_g$ [kW]	$PF$	$V_{DC}$ [V]	$I_{DC}$ [A]	$P_{DC}$ [kW]
500	64,4	3,5	0,38	0,96	77,53	4,8	0,37
600	79	3,5	0,47	0,96	95,65	4,8	0,46
700	93,5	3,5	0,55	0,96	113,63	4,8	0,55
800	108	3,5	0,64	0,96	131,8	4,8	0,63
900	122,5	3,5	0,73	0,96	149,9	4,8	0,72
1000	137,2	3,5	0,82	0,97	168,11	4,8	0,81
1100	151,5	3,5	0,91	0,97	186,16	4,8	0,89
1200	166,2	3,5	0,99	0,97	204,41	4,8	0,98
1300	181,1	3,5	1,08	0,97	223,18	4,8	1,07
1400	195,4	3,5	1,17	0,97	241,36	4,8	1,16
1500	209,9	3,5	1,26	0,97	259,57	4,8	1,25

Como foi dito anteriormente a corrente é mantida fixa através da variação do reóstato para que o sistema opere sempre à plena carga, conforme se verifica na Tabela 9, onde a corrente do gerador é sempre igual a 3.5 A. Assim obtemos o valor da tensão DC à plena carga que é de 259.57 V referente à ligação em estrela, sendo produzida uma potência DC de 1.25 KW que é novamente dissipada na resistência.

A Figura 34 descreve a evolução da potência DC relativamente à tensão DC.

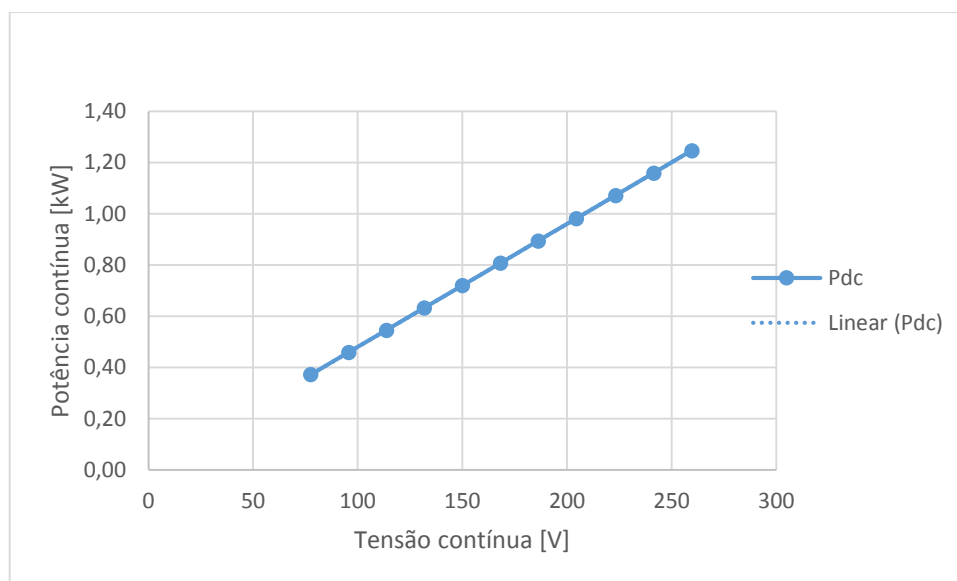


Figura 34- Ensaio em Carga (R variável) com o gerador ligado em estrela.

No ensaio à plena carga foi mantida fixa a corrente, o que faz com que a potência DC aqui seja diretamente proporcional à tensão, como é ilustrado na figura anterior. Assim, como a tensão é diretamente proporcional à velocidade de acionamento, a potência aumentará com o aumento da velocidade.

Nos ensaios com o gerador ligado em triângulo, o que muda em comparação ao anterior é o valor da resistência mínima, que com a ligação em triângulo passa a ser igual a  $18,2 \Omega$ , que é conseguido no circuito através da associação de duas resistências de  $42 \Omega$  em paralelo obtendo assim o valor de  $21 \Omega$ . Os dados deste ensaio são mostrados pela Tabela 10 onde é possível ver que à velocidade nominal do gerador, a corrente nominal do gerador é igual a  $6,2 \text{ A}$ .

Tabela 10- Resultados nos ensaios em carga com gerador em triângulo.

Ensaio com carga fixa $R=21 \Omega$							
$N$ [rpm]	$V_{LL}$ [V]	$I_g$ [A]	$P_g$ [kW]	$PF$	$V_{Dc}$ [V]	$I_{Dc}$ [A]	$P_{Dc}$ [kW]
500	49,2	2,5	0,2	0,93	59,6	3,29	0,20
600	58	3	0,28	0,93	70	3,9	0,27
700	66,6	3,4	0,37	0,94	80,4	4,46	0,36
800	75	3,8	0,47	0,95	90,8	5,04	0,46
900	82,8	4,2	0,57	0,95	100,6	5,59	0,56
1000	90,4	4,5	0,69	0,96	110	6,13	0,67
1100	97,5	4,9	0,8	0,96	119	6,63	0,79
1200	104	5,3	0,92	0,96	127,23	7,14	0,91
1300	110	5,6	1,04	0,97	135	7,59	1,02
1400	115,8	5,9	1,15	0,97	142,2	8	1,14
1500	120,9	6,2	1,26	0,97	148,8	8,4	1,25

A Figura 35 descreve a evolução da corrente contínua relativamente à tensão contínua, sendo que o aumento dos dois, à medida que a velocidade de rotação vai aumentando, é linear.

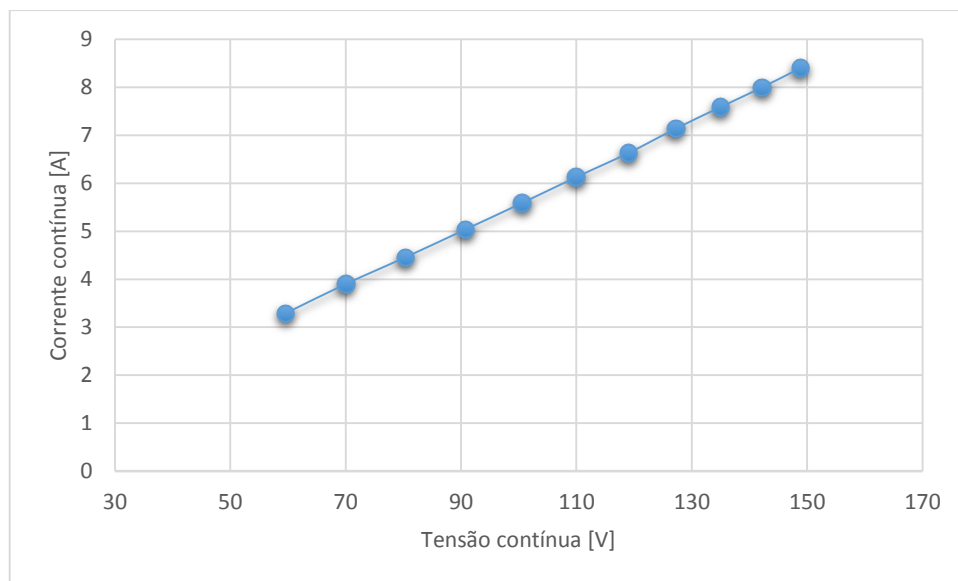


Figura 35- Ensaio em Carga ( $R$  fixa) com gerador em triângulo.

O ensaio à plena carga, i.e., impondo na saída do gerador a sua corrente nominal (aproximadamente 6,2 A), a semelhança do ensaio com a ligação em estrela este segue o mesmo procedimento, sendo que o reóstato é reajustado para manter a corrente igual a nominal para cada velocidade. Os dados retirados estão presentes na Tabela 11.

Tabela 11- Resultados obtidos nos ensaios em plena carga com gerador ligado em triângulo.

Ensaio em carga variável							
$N$ [rpm]	$V_{LL}$ [V]	$I_g$ [A]	$P_g$ [kW]	$PF$	$V_{DC}$ [V]	$I_{DC}$ [A]	$P_{DC}$ [kW]
500	36,2	6,2	0,37	0,96	42,9	8,4	0,36
600	44,5	6,2	0,46	0,96	53,18	8,4	0,45
700	52,8	6,2	0,55	0,96	63,4	8,4	0,53
800	61,1	6,2	0,63	0,96	73,75	8,4	0,62
900	69,5	6,2	0,72	0,96	84,25	8,4	0,71
1000	77,6	6,2	0,81	0,96	94,36	8,4	0,79
1100	86,3	6,2	0,9	0,97	105,25	8,4	0,88
1200	94,8	6,2	0,99	0,97	115,8	8,4	0,97
1300	103,2	6,2	1,08	0,97	126,5	8,4	1,06
1400	111,7	6,2	1,17	0,97	137,14	8,4	1,15
1500	120,6	6,2	1,25	0,97	148,2	8,4	1,24

Nesta tabela, nota-se que a corrente é mantida fixa à medida que a velocidade vai aumentando, sendo que à velocidade nominal o gerador temos uma potência DC de 1,24 kW que é dissipado pelo reóstato, conforme dito anteriormente.

A Figura 36 descreve a evolução da potência DC relativamente à tensão DC.

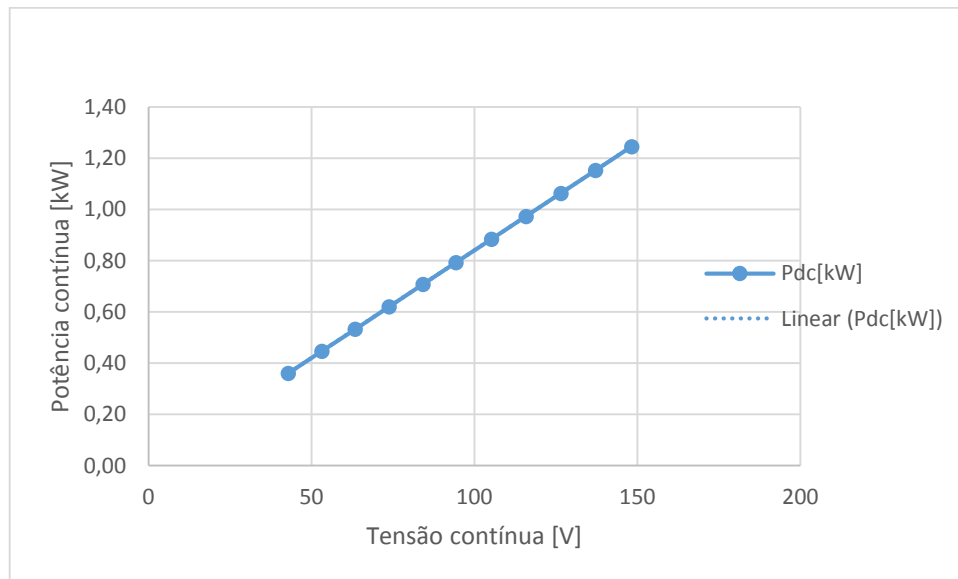


Figura 36- Ensaio à plena Carga (R variável) com o gerador ligado em triângulo.

À semelhança do ensaio à plena carga em estrela, como aqui também foi mantida constante a corrente, a potência será proporcional à tensão DC. Assim temos um aumento da potência à medida que vamos aumentando a velocidade.

Assim foi concluído os ensaios em carga, onde foi possível estudar o comportamento do gerador trabalhando com uma carga capaz de dissipar toda a potência associada a qualquer valor de rotação, e à plena carga, onde é possível ver o comportamento do gerador quando este trabalha sempre no seu regime nominal de corrente. Aqui foram obtidos todos os parâmetros necessários a elaboração da chapa de características do gerador mostrada anteriormente, bem como, o estudo do seu modo de funcionamento nesses estados. Assim a partida já sabemos como se irá comportar o gerador aquando da rotação da turbina e caso o inversor comece a “puxar” a sua corrente nominal, que implicações isso terá com a tensão, que irá aumentar com a velocidade da turbina.

## Capítulo 5

### 5. Aplicação prática - Parque Aquícola de Castrelos

#### 5.1. Introdução

O presente trabalho, como referido anteriormente, foi realizado no posto Aquícola de Castrelos localizado na estrada entre Bragança e Vinhais, numa levada do rio Baceiro.



*Figura 37- Tanques de tratamento de trutas, Castrelos.*

Atualmente, a instalação é utilizada para a criação e reprodução de trutas com o objetivo de repovoar os rios da região. A levada do rio, onde a instalação se situa, possui um relevo acentuado, com desníveis até 4.6 m, como é mostrado na Tabela 12. A água entra nos canais, fazendo um circuito com o objetivo de renovar a água nos tanques de tratamento das trutas fornecendo oxigénio com o seu movimento, até sair novamente para o rio. Isto faz com que o lugar seja bastante apelativo para a instalação de uma pequena unidade de produção de energia elétrica hídrica, com possibilidade de instalação de potência máxima na ordem dos 2kW, limitado pela pelas condições de desnível e caudal do rio.



Figura 38- Localização do Posto Aquícola de Castelos (Fonte: Google Maps).

Neste capítulo é apresentada a avaliação do potencial hídrico, onde são descritas as técnicas para fazer esta avaliação, bem como a estimativa da potência disponível, a seleção da turbina e os testes estáticos e dinâmicos que foram efetuados em laboratório, de modo a estudar a entrega de potência à rede.

Assim, concluído este capítulo ter-se-ão à disposição os dados necessários à implementação do sistema proposto em Castelos. Este sistema é mostrado na Figura 39.

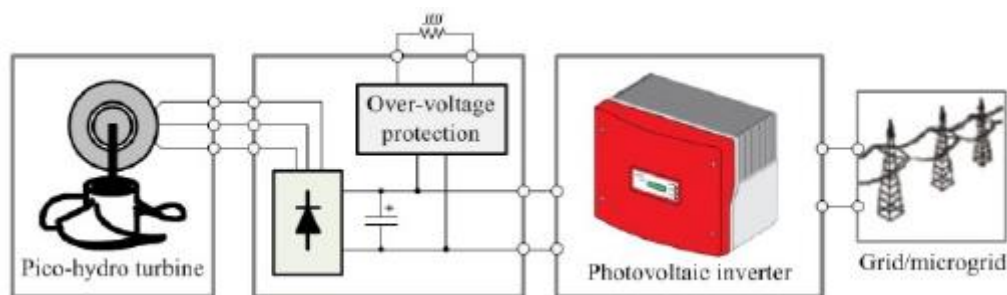


Figura 39- Projeto da topologia para sistemas Pico-hídricas conectadas à rede [24].

Com o uso do inversor fotovoltaico o gerador é desacoplado da rede, permitindo assim que o gerador rode a uma velocidade abaixo do valor nominal, sem comprometer a entrega de potência à rede. O inversor vai então garantir todas as condições de frequência e tensão para fazer essa entrega. Assim, o gerador é acionado diretamente pela turbina, descartando a utilização de uma caixa de velocidades, trazendo assim algumas vantagens como redução de custo, aumento da fiabilidade do sistema tendo assim um rendimento global mais elevado.

Este tipo de aproveitamento apresenta muitas vantagens na medida em que, com um grupo hídrico (turbina e gerador) de pequena potência, aliados a uma queda de água e caudal que não têm necessariamente de ser grandes, pode-se produzir energia ao longo do ano. Esta energia tem um grande interesse a nível de locais isolados, apresentando-se como uma alternativa viável e de baixo custo.

## 5.2. Avaliação do potencial hídrico

Este capítulo começa por apresentar algumas técnicas/métodos para a medição e obtenção de dados tendo em vista o cálculo da potência hídrica disponível para o sistema electroprodutor. É ainda apresentada uma análise detalhada dos vários equipamentos adquiridos para poder fazer esta avaliação, bem como as diversas técnicas utilizadas de modo a obter os dados necessários de caudal e velocidade, até termos uma estimativa da potência disponível no local.

## 5.3. Técnicas de Avaliação do Potencial Pico-hídrico

Neste subcapítulo apresenta-se o procedimento utilizado para conhecer o potencial energético do aproveitamento. A altura da queda de água e o caudal disponível são os parâmetros essenciais para a determinação da potência elétrica que é possível extrair do sistema eletroprodutor.

### 5.3.1. Medição da Altura da Queda

A altura da queda é a distância vertical entre o nível da água à entrada da conduta e o local onde vai ser instalada a turbina.

Para fazer o levantamento das alturas de quedas utilizou-se um nível (Figura 40) e os seus acessórios (Figura 41), que é um equipamento que permite definir com precisão um plano horizontal ortogonal à vertical definida pelo eixo principal do equipamento, neste caso foi utilizado um nível ótico mas também podem ser digitais ou a laser.



Figura 40- Nível ótico.

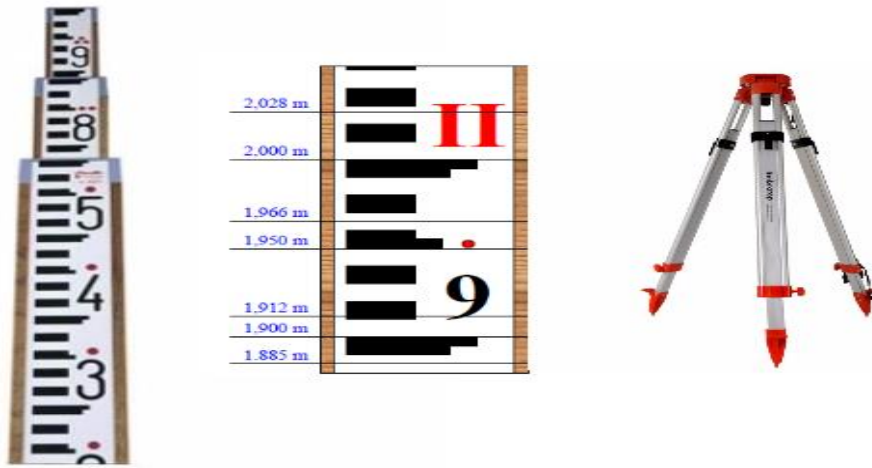


Figura 41- Acessórios do nível.

Utilizando o nível ótico, é possível marcar a altitude de alguns pontos de interesse. Para saber a sua queda bruta apenas temos que fazer o desnível entre eles. Os pontos de interesse e a sua altitude estão referenciados na Figura 42.



Figura 42 -Mapa topográfico do posto Agrícola.

Marcados os pontos de interesse com a sua referência podemos saber a queda, i.e., do ponto 2 para o 5, fazendo a diferença deles, obtemos a  $H_b = 3.47$  m.

Na tabela 12 são apresentadas as quedas brutas de cada par de pontos com interesse para este projeto.

Tabela 12- Alturas de queda bruta.

Posição	$H_b$ [m]
1_5	4,6
2_5	3,47
5_4	2,54
7_9	4,81
12_11	2

### 5.3.2. Estimativa do caudal

A determinação do caudal para o presente caso de estudo foi conseguido por via direta, através de um equipamento de hidrometria (molinete). Foi também usado o método flutuador (da garrafa) mas devido a incertezas no resultado (diferenças muito grandes no fluxo de entrada e de saída) não foram considerados.

O molinete é um equipamento de hidrometria usado para medir a velocidade da água. Este equipamento em cada medição apresenta uma média de 15 velocidades. Para se obter o caudal torna-se necessário medir a secção do canal.

Assim, com uma fita métrica é tirada a largura e altura do canal e é calculada a secção segundo o cálculo a seguir apresentado, onde a altura ( $h$ ) medida foi de 0.72 m e a largura ( $l$ ) de 0.4 m.

$$S = h l$$

$$S = 0.72 \times 0.4$$

$$S = 0.288 \text{ m}^2$$

Tendo a secção, é apenas necessário fazer a média das 3 velocidades dadas pelo molinete e aplicar um fator de correção, que neste caso é de 0.8 referente ao cimento de que é feito o canal. O cálculo do caudal é mostrado a seguir.

$$Q = C v S$$

$$Q = 0.8 \times 0.232 \times 0.288$$

$$Q = 0.053 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Na Tabela 13 são apresentados os valores das velocidades mostradas pelo molinete.

Tabela 13- Velocidades medidas pelo molinete numa dada secção.

Velocidades [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]			
$v1$	$v2$	$v3$	$V_{\text{médio}}$
0,229	0,237	0,229	0,232

### 5.3.3. Estimativa da Potência Disponível

A potência disponível de um aproveitamento hídrico, ou a potência hidráulica resultante da transformação da energia potencial da água em energia cinética, para as alturas de queda referenciadas na Tabela 12, é conhecida através da equação (12), onde a diferença relativamente à equação (2) aparece na queda útil, que de uma forma prática se obtém aplicando um fator de correção de 0.8 à queda bruta. Neste caso foi utilizado o  $H_b = 3.47$  m, referente ao par de posições 2\_5.

$$P_h = \rho g Q H_u \quad (12)$$

$$P_h = 1000 \times 9.81 \times 0.053 (3.47 \times 0.8)$$

$$P_h = 1443 \text{ W}$$

A energia retirada do aproveitamento hídrico é obtida pela transformação da energia potencial da água ( $P_h$ ) em energia cinética de rotação da turbina hidráulica ( $T_{Hid}$ ) e, conseqüentemente, em energia mecânica disponível no seu eixo ( $P_M$ ). A energia mecânica é finalmente convertida pela ação de um gerador elétrico ( $G_{Ele}$ ) em energia elétrica ( $P_{Eletrico}$ ) como se pode ver na Figura 4343.

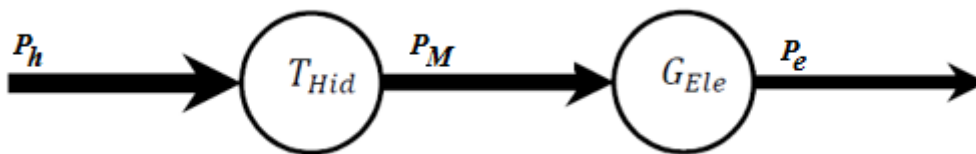


Figura 43- Representação esquemática da transformação de energia num aproveitamento hídrico.

Se for possível conhecer o rendimento global de todo o aproveitamento Pico-hídrico  $\eta = \frac{P_e}{P_M}$ , a potência elétrica é dada pela seguinte equação:

$$P_e = \rho g Q H \eta \quad (13)$$

O rendimento do grupo turbina-gerador depende do caudal turbinado e conseqüentemente da potência gerada, através de uma função quadrática [29]. Todavia a um método mais fácil de se encontrar a  $P_e$ . O rendimento típico de uma turbina para grandes unidades de produção situa-se entre 80 e 90 %. Contudo, em unidades hídricas cuja potência é inferior a 100 kW o rendimento pode situar-se entre 60 a 80 % [30, 31].

De acordo com toda a bibliografia consultada [29-31], é habitual, para efeito de anteprojeto estimar a potência elétrica aceitando um rendimento global típico de 70 % para este tipo de aproveitamento. Assim, neste caso a potência elétrica [W] é dada por:

$$P_e = 0.7 \rho g Q H_u$$

$$P_e = 0.7 \times 1000 \times 9.8 \times 0.053 (3.47 \times 0.8)$$

$$P_e = 1009 \text{ W}$$

## 5.4. Seleção da turbina

A seleção da turbina foi feita segundo as especificações do Gerador Síncrono de ímãs permanentes, utilizado no laboratório para os testes com vista à sua integração na instalação.

Como já foi dito anteriormente, o gerador será acionado diretamente pela turbina, não apresentando assim a necessidade de se fazer uso de uma caixa de velocidade.

Assim, segundo o exposto no subcapítulo 3.2.2., para a seleção de turbinas é necessário aplicar o cálculo da velocidade específica para se conseguir usar o ábaco e assim saber o tipo de turbina e o seu respetivo diâmetro.

A velocidade de rotação escolhida foi de 500 rpm, a uma potência de 1.03 kW e uma queda bruta de 3.46 m.

$$N_s = 1.2 N \frac{P^{\frac{1}{2}}}{H_u^{\frac{5}{4}}}$$

$$N_s = 129$$

Assim é possível saber o diâmetro da turbina que segundo o abaco da Figura 18 é de 0.2 m.

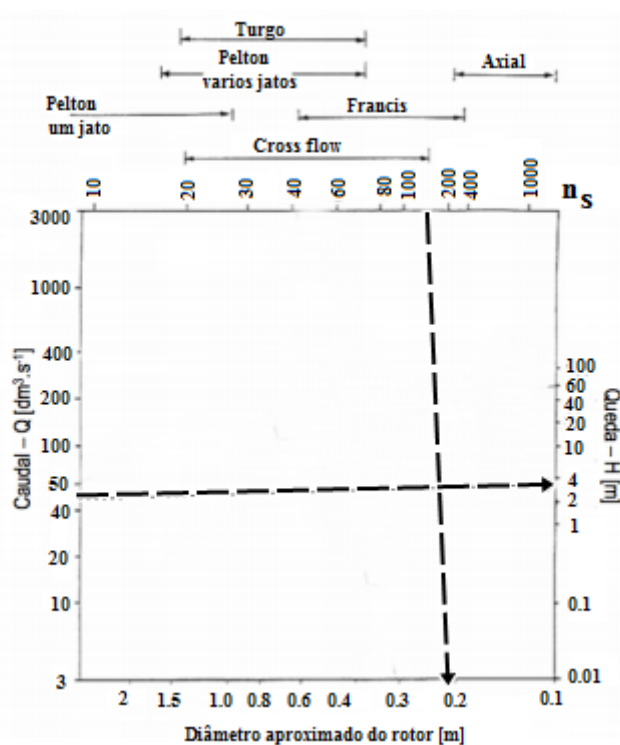


Figura 44- Seleção de turbinas.

De acordo com o ábaco a turbina a ser escolhida pode ser do tipo Crossflow ou Francis com um diâmetro aproximado do rotor de 0.2 m. Com base nestes parâmetros a turbina escolhida foi uma Crossflow de modelo GL760-LM-15 apresentado na figura a seguir. Como já foi dito, a Crossflow é a turbina mais usada na gama das baixas potências.



*Figura 45- Turbina Crossflow modelo GL760-LM-15 [32].*

Da seleção da turbina notamos que a gama de quedas desta turbina é de 5 a 10 m, não sendo a ideal, pois a maior queda bruta de Castrelos é da ordem de 4.5 m. Sendo assim, é expectável uma ligeira perda de rendimento para a instalação desta turbina.

Esta turbina apresenta assim como suas principais características uma gama de queda bruta dos 5 a 10 m, com um valor de caudal de 0.03 a 0.04 m<sup>3</sup>/s, potência instalada de 1kW, velocidade de rotação de 500 a 1500 rpm com um diâmetro de 0.16m.

Esta turbina é encontrada no site da empresa Electway com um preço de 424.38 €. A Electway é uma empresa com sede na China, fornecendo painéis fotovoltaicos, geradores a diesel, equipamentos hidroelétricos etc, para todo o mundo.

## 5.5. Testes Laboratoriais

Os testes apresentados a seguir também foram realizados no laboratório de Sistemas Eletromecatrónicos, com o objetivo de fazer o estudo da entrega da potência à rede através dos inversores fotovoltaicos. Foram realizados dois testes, o primeiro é um teste estático, onde é possível estudar a entrega de potência à rede elétrica e o comportamento do inversor. O segundo teste realizado é feito em estado dinâmico onde o principal objetivo é avaliar o desempenho do circuito de proteção e analisar alguns valores de tensão e corrente que irão influenciar o inversor.

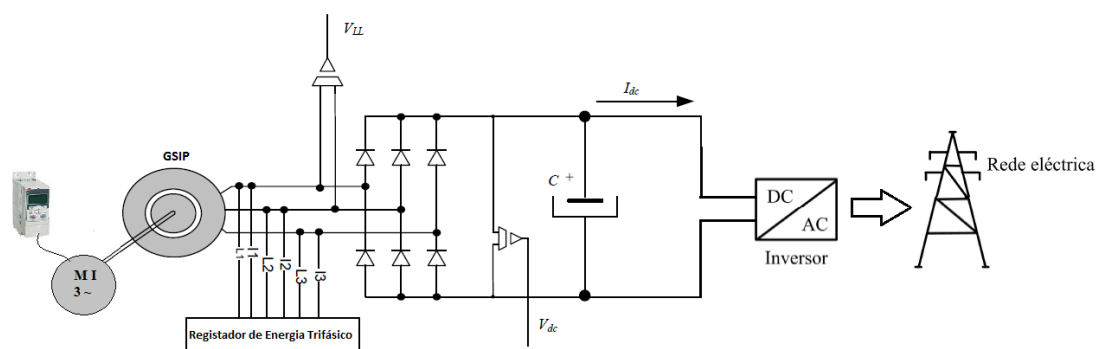


Figura 46- Circuito para os ensaios com inversor.

A diferença dos ensaios anteriores, aqui o inversor fotovoltaico é introduzido ao sistema e ligado ao circuito à saída do condensador, com a função de fazer a entrega da potência à rede.

### 5.5.1. Ensaios em Regime Permanente

Neste projeto, como alternativa aos inversores comuns para sistemas híbridos (inversores eólicos), foram testados inversores fotovoltaicos convencionais, cuja tecnologia é bastante madura e fiável, sendo encontrados com muita facilidade no mercado, tornando-se uma alternativa bastante económica e fiável neste tipo de aplicações.

Neste subcapítulo são apresentados os resultados dos ensaios com inversores, com a finalidade de estudar a interligação do inversor à rede elétrica, onde se vão obter dados da potência desde a saída do gerador até a que é efetivamente entregue à rede. São também estudado os pontos de funcionamento do inversor, sendo que foram usados dois inversores fotovoltaicos convencionais nestes ensaios, todos fabricados pela SMA. As características dos inversores fotovoltaicos são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14- Características dos inversores usados (SMA).

Inversor fotovoltaico			
SB1500		SB2100TL	
$P_{DCmáx}$ [W]	1600	$P_{DCmáx}$ [W]	2200
$I_{DCmáx}$ [A]	10	$I_{DCmáx}$ [A]	11
$V_{DCmáx}$ [V]	600	$V_{DCmáx}$ [V]	600
$V_{MPPmin}$ [V]	160	$V_{MPPmin}$ [V]	200
$V_{MPPmáx}$ [V]	500	$V_{MPPmáx}$ [V]	480
$V_{PVstart}$ [V]	50	$V_{PVstart}$ [V]	125

O parâmetro  $V_{PVstart}$ , presente nos dois inversores, refere-se ao valor mínimo da tensão para que o inversor possa entrar em funcionamento. O seu valor vem por defeito.

O inversor tem como função principal converter a corrente DC à saída do conversor elevador numa corrente AC, que pode ser entregue à rede pública.

Os ensaios consistem em programar o variador de frequência para que este possa controlar o motor de indução de modo a que este forneça uma determinada potência, e assim com a ajuda dos equipamentos de medição retirar esses valores de tensão, corrente e potência até à sua entrega na rede.

O variador de frequência foi configurado, para fazer um controlo em potência do motor, em que a *Pref* é a referencia de potência que queremos obter a saída do gerador, assim quando queremos uma *Pref* de 6% isto equivalerá a pedir ao gerador uma potência de 1800 W, originando uma rotação de 1547,13 rpm, sendo que é entregue à rede uma potência de 1.27 kW, como é mostrado na Tabela 15, onde são apresentados os dados obtidos com o inversor SB1500 e gerador ligado em estrela.

Tabela 15- Ensaio com inversor SB1500 e gerador em estrela.

SB1500Eco 100-14s-1p Y										
$P_{MI}$ [W]	<i>Pref</i> [%]	<i>N</i> [rpm]	$V_{LL}$ [V]	$I_g$ [A]	$P_g$ [kW]	<i>PF</i>	$V_{DC}$ [V]	$I_{DC}$ [A]	$P_{DC}$ [kW]	$P_{AC}$ [kW]
150	0,50	257,43	43,03	1,03	0,06	0,92	52,73	1,24	0,07	0,05
300	1,00	310,50	44,73	2,33	0,18	0,95	53,83	3,07	0,17	0,14
450	1,50	464,90	56,07	2,53	0,28	0,95	72,17	3,51	0,25	0,25
600	2,00	531,53	66,47	3,67	0,39	0,96	84,00	4,93	0,41	0,34
750	2,50	664,03	82,03	3,80	0,52	0,96	98,47	5,02	0,49	0,46
900	3,00	798,63	96,27	4,00	0,64	0,96	114,90	5,42	0,62	0,58
1050	3,50	957,17	126,73	3,57	0,76	0,96	145,70	5,43	0,79	0,70
1200	4,00	1064,27	136,43	3,80	0,88	0,97	166,33	5,19	0,86	0,81
1350	4,50	1190,37	146,93	4,10	1,00	0,97	179,70	5,53	0,99	0,93
1500	5,00	1313,93	159,20	4,13	1,11	0,97	195,00	5,81	1,13	1,04
1650	5,50	1426,97	176,67	4,07	1,23	0,97	219,46	5,59	1,23	1,15
1800	6,00	1547,13	183,90	4,33	1,35	0,97	229,60	5,90	1,35	1,27

O inversor na sua programação possui um algoritmo MPPT, ponto de seguimento de potência máxima. Por esta razão, ele vai tentar sempre puxar a máxima potência disponível para fazer a entrega desta à rede, jogando com os valores de tensão e corrente DC, de modo a tirar sempre o valor máximo da potência disponível.

A Figura 47 descreve a evolução da corrente relativamente à tensão DC.

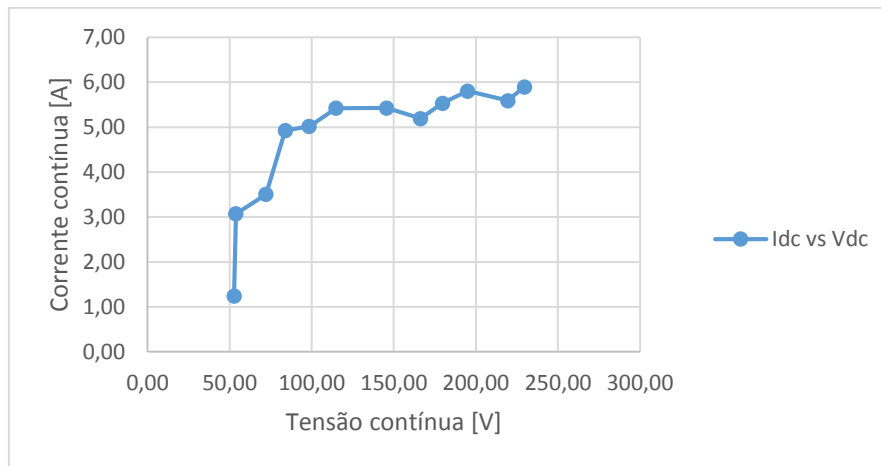


Figura 47- Idc vs Vdc ensaio com inversor SB1500.

Como o Inversor SB1500 só entra em funcionamento quando tiver disponível uma tensão DC de 50 V, o ensaio é feito sempre acima destes valores. Aqui também é possível estudar um pouco o comportamento do inversor, e a maneira como ele joga com a corrente e a tensão, saltando de par em par até se estabilizar, caso não haja nenhuma perturbação no sistema, ele irá encontrar um valor de tensão e corrente que correspondem à potência máxima e depois vai permanecer em torno dessa potência.

Aqui, tendo em conta os valores de tensão e corrente do gerador, e os pontos de funcionamento do inversor, podemos verificar que aquando da sua inicialização o inversor começa a puxar corrente até que a corrente do gerador atinge valores na ordem dos 4.375 A. Assim o gerador passa a estar em sobrecarga pois a sua corrente nominal é de 3.5 A para a ligação em estrela, facto que não oferece risco pois ele está preparado para trabalhar até 1,25 vezes a sua carga nominal. Assim quando o inversor não consegue puxar mais corrente, ele começa a elevar a tensão, caso a velocidade continue a aumentar. Devido às proteções, o circuito de proteção e o conversor de frequência limitam a tensão DC máxima e a rotação do motor.

A Tabela 16 apresenta os dados obtidos com o inversor SB1500 com o gerador ligado em triângulo.

Tabela 16- Ensaio cm inversor SB1500 com gerador em triângulo.

SB1500 Eco 100-14s-1p D										
$P_{MI}$ [W]	$P_{ref}$ [%]	$N$ [rpm]	$V_{LL}$ [V]	$I_g$ [A]	$P_g$ [kW]	$PF$	$V_{DC}$ [V]	$I_{DC}$ [A]	$P_{DC}$ [kW]	$P_{AC}$ [kW]
300	1,00	471,83	44,27	2,30	0,18	0,93	52,10	3,06	0,16	0,15
450	1,50	516,70	43,83	3,93	0,30	0,94	50,90	5,48	0,28	0,25
600	2,00	566,67	46,13	5,57	0,41	0,96	55,00	7,11	0,39	0,34
750	2,50	579,50	49,70	6,37	0,54	0,96	62,03	8,00	0,50	0,44
900	3,00	804,83	56,80	6,77	0,64	0,96	68,41	8,77	0,60	0,56
1050	3,50	938,37	66,10	6,73	0,76	0,97	83,55	9,07	0,76	0,67
1200	4,00	1085,07	79,57	6,63	0,88	0,96	95,90	9,26	0,89	0,79
1350	4,50	1236,17	97,00	6,27	1,01	0,97	112,53	9,33	1,05	0,91
1500	5,00	1327,93	96,43	6,87	1,12	0,97	118,28	9,50	1,12	1,01
1650	5,50	1451,77	104,47	7,00	1,23	0,97	126,77	9,79	1,24	1,13
1800	6,00	1583,90	114,70	6,93	1,36	0,97	140,13	9,71	1,36	1,25

A Figura 48 descreve a evolução da corrente contínua relativamente à tensão.

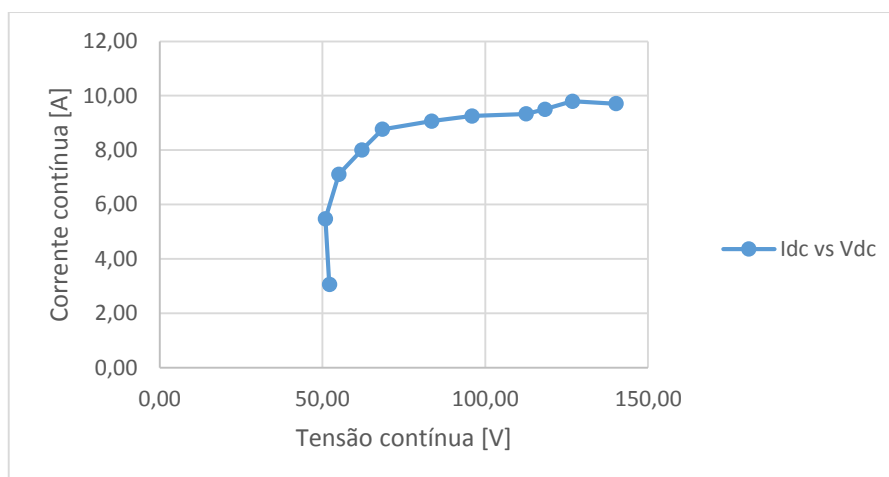


Figura 48-  $I_{dc}$  vs  $V_{dc}$  ensaio com inversor SB1500.

Aqui também é verificado como o inversor joga com a tensão e corrente à saída do gerador, sendo que nesta figura é possível ver melhor a curva que os pontos dos pares de tensão e corrente vão tomando no gráfico, até o inversor encontrar a potência máxima e se estabilizar. Tendo em conta a corrente nominal do gerador, vê-se que este está em sobrecarga produzindo uma corrente na ordem dos 6.93 A. Como foi dito anteriormente esta situação é comum pois o gerador está preparado para trabalhar nestas condições. Quando o inversor não consegue aumentar mais na corrente, tal como no ensaio anterior este vai continuar a subir a tensão caso a potência continue a aumentar.

Passando agora ao inversor SB2100TL, este apresenta diferenças quando comparado ao SB1500, tanto em termos dos parâmetros, como também em termos de algoritmo mppt, por isso tenta-se comparar o seu comportamento ao do inversor SB1500 a nível da interpretação dos valores das tabelas. A Tabela 17 apresenta os dados obtidos com o inversor SB2100TL com o gerador ligado em estrela.

Tabela 17- Ensaio com inversor SB2100 com gerador em estrela.

<b>SB2100 eco 100-14s-1p Y</b>											
$P_{MI}$	$P_{ref}$	$N$	$V_{LL}$	$I_g$	$P_g$	$PF$	$V_{DC}$	$I_{DC}$	$P_{DC}$	$P_{AC}$	
[W]	[%]	[rpm]	[V]	[A]	[kW]		[V]	[A]	[kW]	[kW]	
300	1,00	583,33	102,17	1,07	0,16	0,93	128,07	1,23	0,16	0,14	
450	1,50	636,70	75,50	1,60	0,29	0,93	130,00	2,08	0,27	0,27	
600	2,00	675,63	106,30	2,57	0,40	0,95	128,99	3,16	0,41	0,37	
750	2,50	740,53	107,03	2,87	0,52	0,96	128,35	4,17	0,54	0,48	
900	3,00	810,00	106,23	3,67	0,63	0,96	129,53	4,91	0,64	0,59	
1050	3,50	922,00	114,17	3,90	0,76	0,96	143,10	5,33	0,76	0,70	
1200	4,00	1057,10	133,63	3,93	0,88	0,97	163,75	5,39	0,88	0,81	
1350	4,50	1177,47	150,30	4,00	1,00	0,97	182,86	5,48	1,00	0,93	
1500	5,00	1300,17	166,90	4,00	1,11	0,97	203,89	5,51	1,12	1,04	
1650	5,50	1399,67	179,47	4,17	1,23	0,97	214,93	5,67	1,22	1,15	
1800	6,00	1516,87	188,80	4,20	1,35	0,97	232,50	5,81	1,35	1,26	

A Figura 49 descreve a evolução da corrente relativamente à tensão DC.

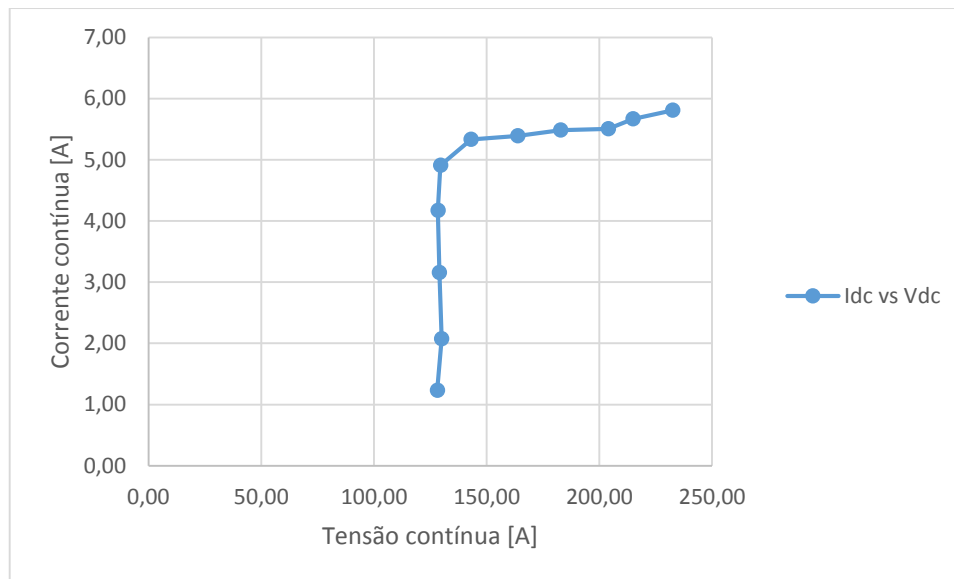


Figura 49- Idc vs Vdc ensaio com inversor SB2100TL.

O inversor SB2100TL, apenas interpretando a tabela e a figura, apresenta um comportamento similar ao do anterior na medida em que este apenas entra em funcionamento para uma tensão acima dos 125 V, e começa a puxar corrente ao gerador até cerca de 1,25 vezes o valor nominal. Quando isto acontece, o SB2100TL começa a elevar a tensão dentro dos limites do gerador.

A Tabela 18 apresenta os dados obtidos com o inversor SB2100TL com o gerador ligado em triângulo.

Tabela 18- Ensaio com inversor SB2100 com gerador em triângulo.

eco 100-14s-1p SB2100 D										
$P_{MI}$ [W]	$P_{ref}$ [%]	$N$ [rpm]	$V_{LL}$ [V]	$I_g$ [A]	$P_g$ [kW]	$PF$	$V_{DC}$ [V]	$I_{DC}$ [A]	$P_{DC}$ [kW]	$P_{AC}$ [kW]
300	1,00	946,90	98,73	0,60	0,09	0,92	126,53	0,76	0,10	0,07
450	1,50	985,50	102,73	1,47	0,23	0,93	128,10	1,77	0,23	0,18
600	2,00	1046,07	102,40	1,93	0,35	0,93	128,33	2,77	0,36	0,30
750	2,50	1104,30	106,60	2,83	0,51	0,94	128,40	4,03	0,52	0,42
900	3,00	1123,57	105,77	3,67	0,60	0,95	128,22	4,73	0,61	0,56
1050	3,50	1169,30	104,83	4,20	0,73	0,96	129,53	5,59	0,72	0,66
1200	4,00	1215,60	105,07	5,00	0,87	0,96	129,80	6,89	0,89	0,79
1350	4,50	1279,07	106,20	5,47	1,00	0,97	130,13	7,87	1,02	0,90
1500	5,00	1349,50	104,03	6,30	1,11	0,97	130,33	8,32	1,08	1,00
1650	5,50	1428,23	107,07	7,03	1,23	0,97	130,08	9,44	1,23	1,11
1800	6,00	1556,80	113,63	6,97	1,36	0,97	140,67	9,72	1,37	1,23

A Figura 50 descreve a evolução da corrente relativamente à tensão DC.

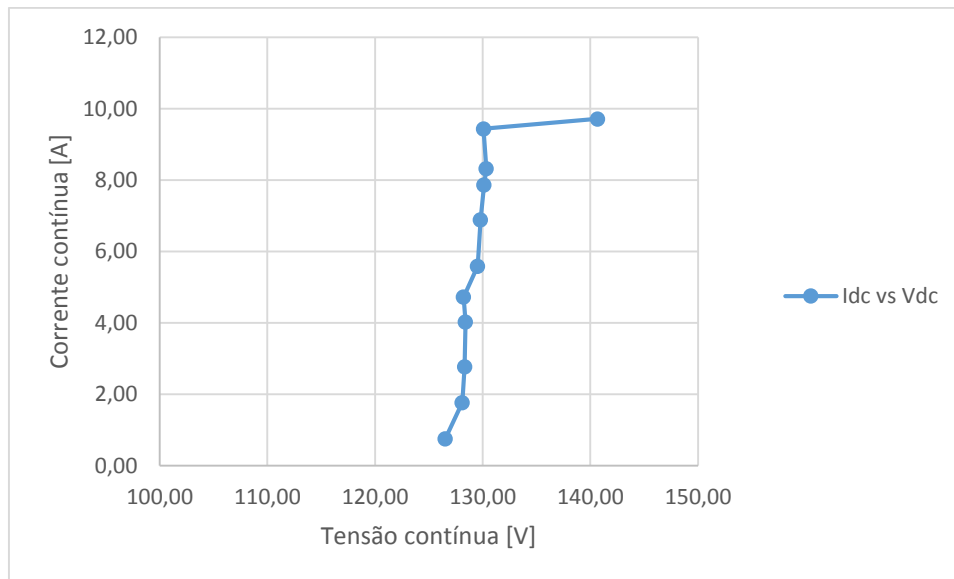


Figura 50- Idc vs Vdc ensaio com inversor SB2100TL.

A análise da figura, também indica, que o comportamento dos dois inversores é similar, visto que o SB2100TL também começa por puxar corrente até esta se situar nos limites do gerador para depois começar a elevar a tensão.

Assim foram concluídos os ensaios estáticos com os inversores da SMA que assim ajudam a melhor se entender o comportamento dos inversores e o gerador. Para uma melhor compreensão foi feito também um ensaio em estado dinâmico, no qual podemos ver o comportamento do sistema desde o acionamento do motor através do variador de frequência, passando pela iniciação do inversor até a entrega de energia à rede. Este estudo é feito no subcapítulo que se segue.

### 5.5.2. Ensaio dinâmico

O principal objetivo dos ensaios dinâmicos da estrutura proposta é avaliar o desempenho do circuito de proteção de sobretensão, quando o sistema de conversão de energia é sujeito a condições dinâmicas e estudar como se comporta o inversor aquando da entrega de potência à rede, bem como o comportamento do gerador.

Os testes foram realizados fazendo o controlo da potência dissipada no circuito de proteção, que limita o valor da tensão no barramento DC. Estes testes também permitem avaliar o tempo de atraso até que seja efetuada a sincronização entre o inversor e a rede elétrica.

A plataforma experimental para a aquisição de dados é baseado no MATLAB com Simulink e a carta de controlo dSPACE 1103. Para o limite da tensão máxima permitida no barramento DC, definida pelo circuito de proteção, foi adotado o valor de aproximadamente 180 V para a ligação em triângulo e de aproximadamente 240 V para a ligação em estrela. Assim, se a tensão no barramento DC ultrapassar estes valores, o circuito de proteção é ativado dissipando a potência em excesso.

Os dados recolhidos do ensaio dinâmico são mostrados nas figuras a seguir. A topologia dos ensaios dinâmicos é a mesma do ensaio anterior, sendo o controlo também feito em potência,

só que neste caso, é escolhida uma potência de referência que iremos estudar visto que o resultado será o mesmo para diferentes valores de potência. A potência de referência utilizada foi de 6%, onde, num primeiro ensaio é feita toda a aquisição do sinal sem nenhuma perturbação e num segundo ensaio é simulada uma falha na rede, desligando manualmente o inversor da rede, com o objetivo de ver como o sistema se comporta. Sendo assim, para cada ligação do gerador (em estrela e em triangulo) teremos ligados um inversor, que em seguida será objeto de estudo para se fazer duas aquisições de sinais.

Com o gerador em estrela, e usando o Inversor SB1500, pode-se ver a primeira aquisição de dados dos ensaios dinâmicos, mostrados nas Figura 51 Figura 52, sendo a última referente ao ensaio com a simulação da falha na rede.

Como foi dito anteriormente, aqui são estudados 3 grandezas: a corrente DC, a tensão DC e a corrente dissipada pelo circuito de proteção.

Sempre que temos corrente dissipada, isto quer dizer que ou o inversor ainda não entrou em funcionamento, ou a tensão no barramento DC ultrapassa o valor de referência e sendo assim a corrente tem que ser dissipada no circuito de proteção.

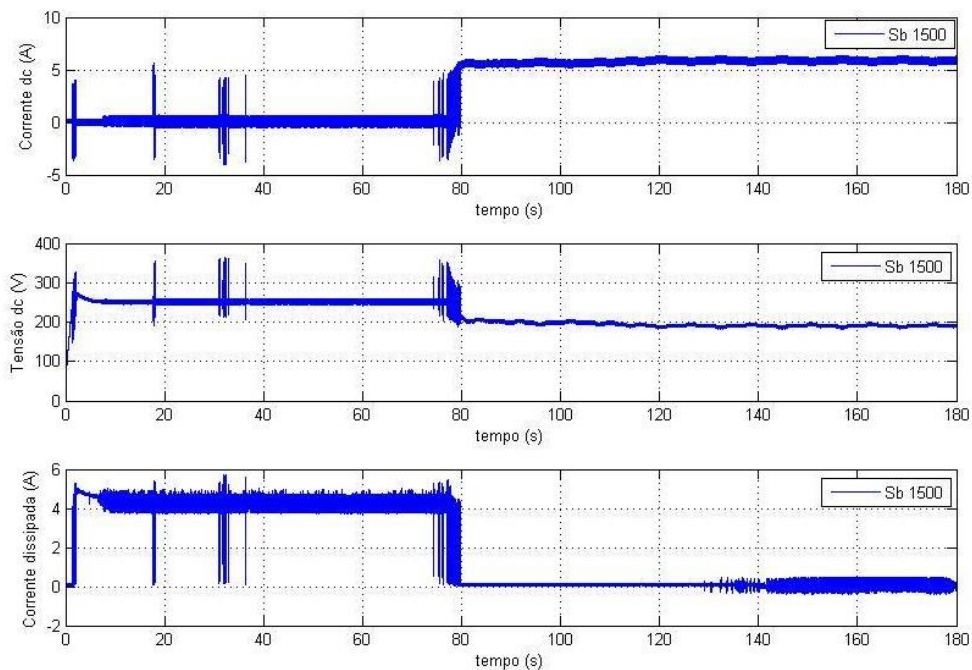


Figura 51- Ensaio dinâmico com Pref 6%.

Da análise da Figura 51 podemos ver alguns picos nas 3 grandezas registradas, antes da entrada em funcionamento do inversor e entrega de potência à rede, sendo que o valor da tensão DC mínima é sempre satisfeita nestes ensaios. Estes picos são consequência da iniciação das funções do inversor e também das tentativas de sincronização com a rede. A partir dos 75 segundos o inversor entra em funcionamento, anulando-se assim a corrente dissipada sendo que a tensão mantém-se estável nos 180 V. Acima deste valor o circuito de proteção entra em funcionamento dissipando o excedente de corrente como dito anteriormente.

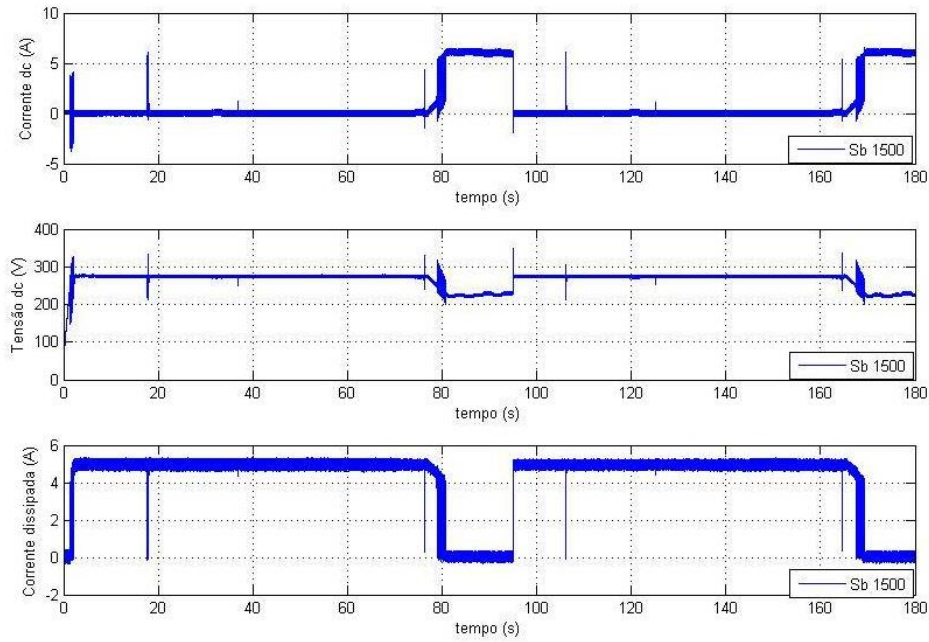


Figura 52- Ensaio dinâmico com Pref 6% simulando falha na rede.

Na Figura 52, referente ao ensaio com falha na rede, verifica-se um mesmo comportamento pois a potência de referência é a mesma, até que no instante  $t=87$  segundos o inversor é desligado da rede e ligado 5 segundos depois.

No momento em que o inversor sai de condução o circuito de proteção é ativado dissipando toda a corrente até que este volte a sincronizar com a rede e entre em funcionamento, a partir dos 170 segundos.

Com o gerador ligado em triângulo os parâmetros do circuito comportam-se de maneira semelhante como se pode ver nas Figura 53 e Figura 54.

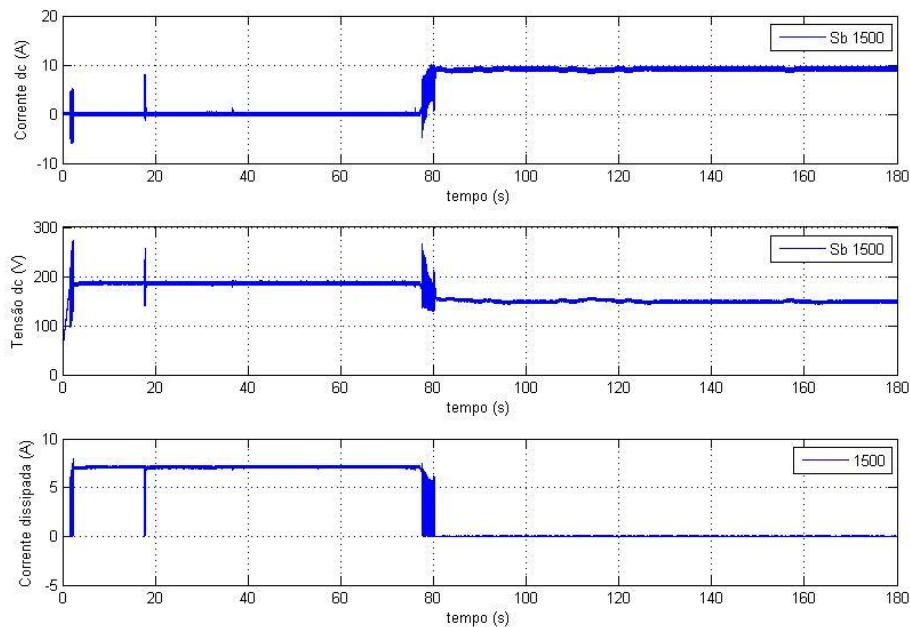


Figura 53- Ensaio dinâmico com Pref 6%.

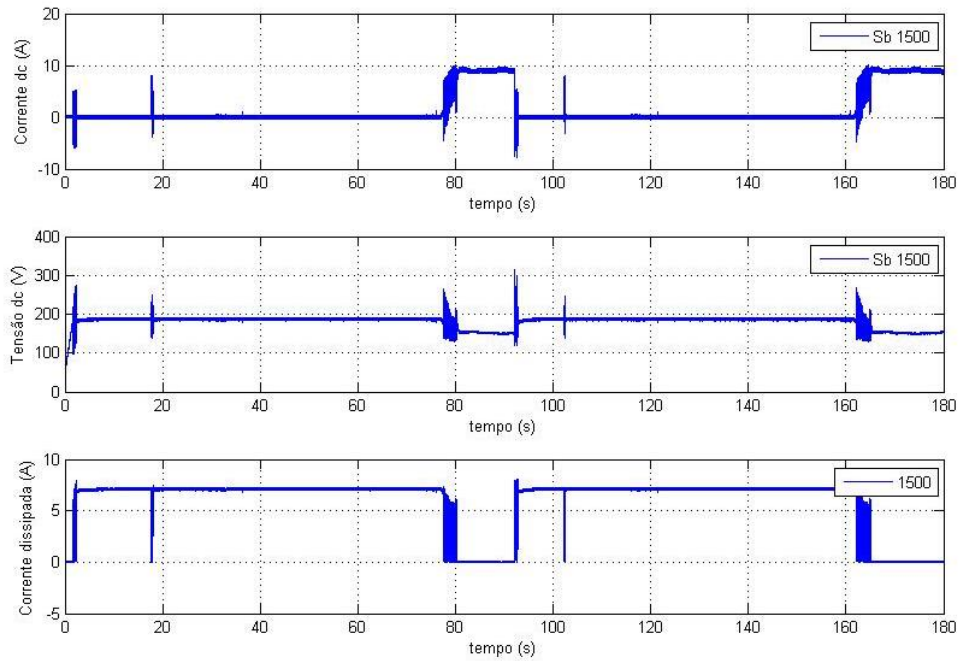


Figura 54- Ensaio dinâmico com Pref 6% simulando falha na rede.

Aqui também é possível ver que mudando as ligações do gerador de estrela para triângulo pouco se muda na aquisição, dando-se uma mudança mais a nível dos valores, pois como foi dito anteriormente a tensão em estrela é menor que a tensão em triângulo.

Com o gerador ligado em estrela, o Inversor SB2100, como seria de esperar, apresenta um comportamento semelhante ao do anterior, diferenciando-se no valor das grandezas. Exemplificando, é possível ver na Figura 55 que depois da entrada em funcionamento do inversor o valor da tensão mante-se à volta dos 240 V, acima deste valor o circuito de proteção começa a dissipar a corrente.

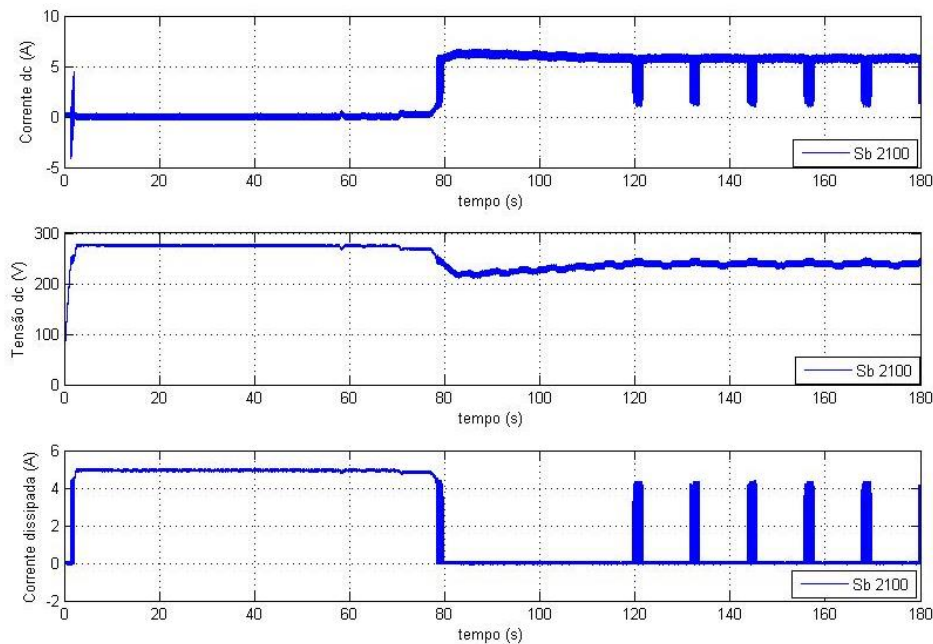


Figura 55-Ensaio dinâmico com Pref 6%.

Da análise da Figura 55, podemos ver que o circuito de proteção entra em funcionamento durante pequenos espaços de tempo, dissipando a corrente e voltando a sair de condução, o que origina alguns picos depois que o inversor entra em funcionamento. Isto podia ser corrigido aumentando ligeiramente o valor de referência para a entrada em funcionamento do circuito de proteção e assim começar a dissipar a corrente.

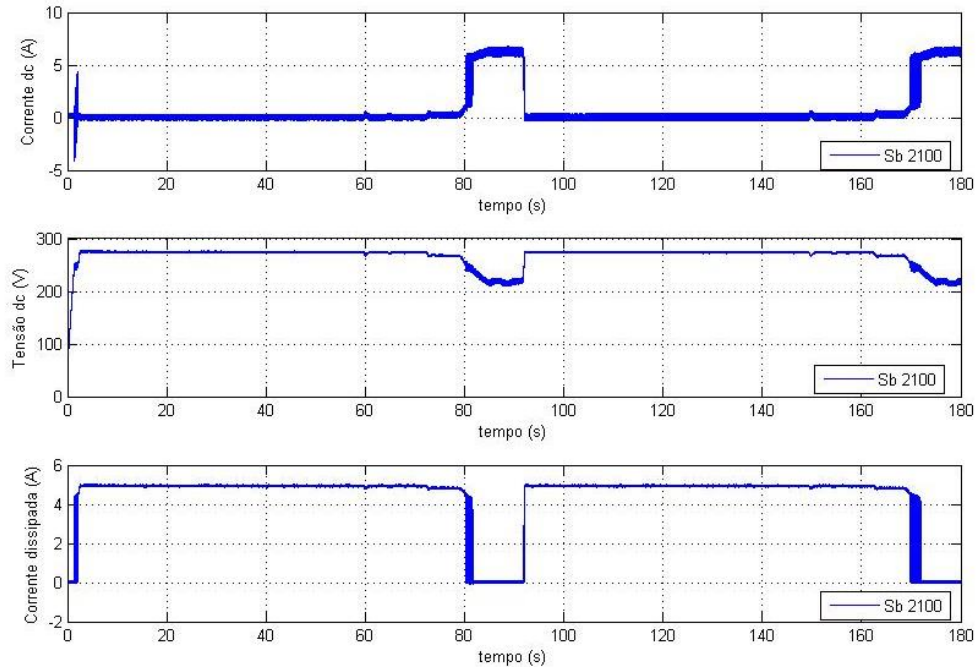


Figura 56- Ensaio dinâmico com Pref 6% simulando falha na rede.

Usando o inversor 2100TL, com o gerador ligado em triângulo, o comportamento das grandezas foi o esperado tendo em conta a análise das últimas figuras. Apenas é referenciada a Figura 57, onde se constata que o circuito de proteção foi ajustado para dissipar a partir dos 180 V. Como se pode ver, o circuito de proteção dissipa parte da potência do gerador quando o inversor está a injetar corrente na rede. Para isto não acontecer era necessário subir o valor de tensão que faz entrar em funcionamento o circuito de proteção, ou baixar o valor de referência da potência.

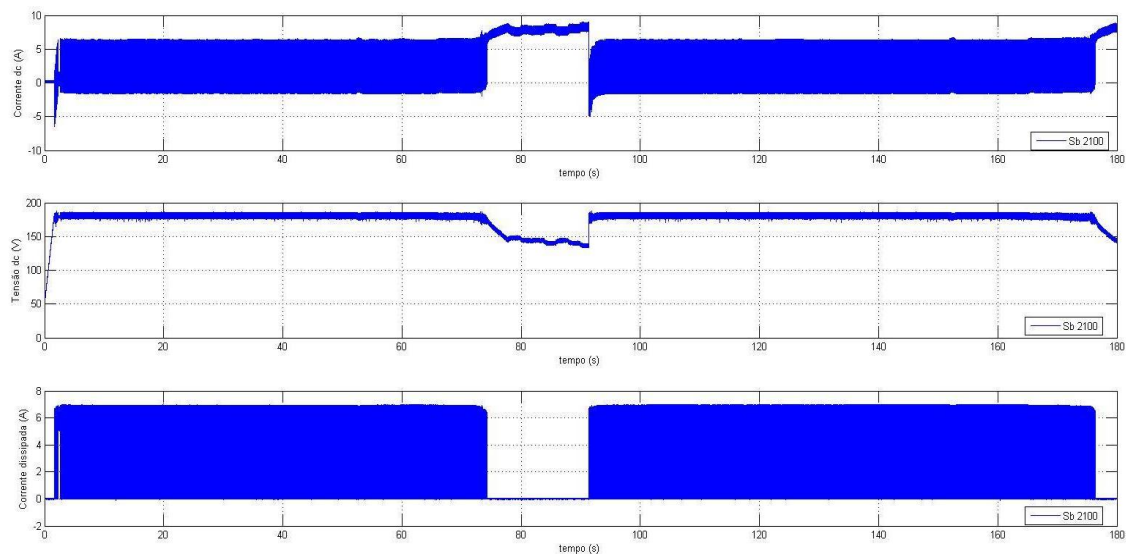


Figura 57- Ensaio dinâmico com Pref 6% simulando falha na rede.

Para melhor estudar a Figura 57 foi feito um zoom da mesma, no intervalo de tempo 40 a 40.2 segundos, apresentado na Figura 58. Assim é possível ver a oscilação da corrente e da tensão, que no exemplo da tensão sempre que esta atinge um valor de aproximadamente 184 V, esta desce para valores de tensão de 176 V. Esta oscilação é feita quase em tempo zero, sendo denominada de gama de histerese.

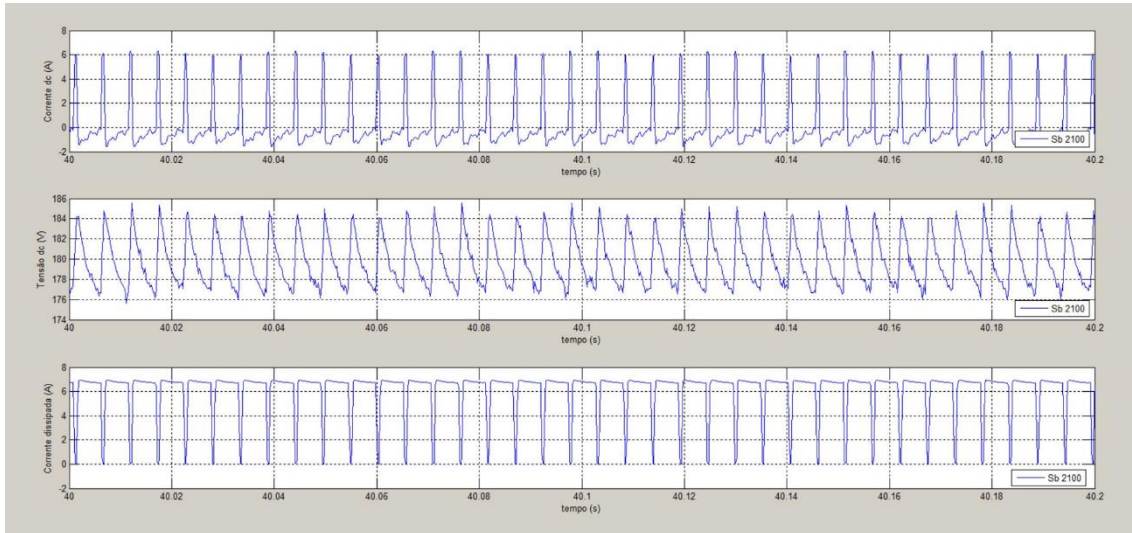


Figura 58- Zoom da Figura 57.

Assim concluídos os ensaios dinâmicos, foi possível entender um pouco mais o comportamento do gerador e a sua interligação com os inversores da SMA, interligação esta que dentro dos parâmetros de entrada do inversor apresenta-se como bastante segura. Foi também possível analisar o circuito de proteção sendo que este é bastante confiável na dissipação da potência excedente que poderia comprometer o sistema. Assim a proteção contra sobretensões, bem como os estados especiais como saída do inversor de condução e à falha ou falta de sincronização com a rede foi assegurada.

## Capítulo 6

### 6. Conclusão e Propostas de trabalhos futuros

#### 6.1. Conclusões gerais

Esta Dissertação assumiu como objetivo o desenvolvimento de uma plataforma para emulação de sistemas Pico-hídricos ligados à rede elétrica, utilizando inversores fotovoltaicos convencionais.

Para fazer a integração do gerador com o inversor fotovoltaico, foi feito um estudo dos pontos de funcionamento de cada um, de modo a garantir as condições de segurança para os dois trabalharem juntos. Para tal, foi feita a caracterização do Gerador Síncrono de ímanes permanentes usado neste trabalho, que culminou na melhor compreensão dos estados de funcionamento do gerador, bem como na elaboração experimental da sua chapa de características. Feito todos os ensaios laboratoriais ficou bem claro como este gerador funciona e como podemos beneficiar disso.

O inversor é configurado para trabalhar com painéis fotovoltaicos, mas este não é capaz de diferenciar o que está a montante, esperando apenas que lhe seja fornecida uma corrente e tensão dentro dos seus limites de funcionamento. Assim, com o estudo dos parâmetros de entrada do inversor, foi possível integrar os dois dispositivos de modo a funcionarem de maneira segura e eficiente, sem comprometer a qualidade da energia entregue à rede elétrica.

O inversor, introduzido agora neste tipo de aproveitamentos, foi de grande importância na elaboração deste projeto, pois ele permitiu evitar custos desnecessários com caixas de velocidades, sendo ele uma tecnologia bastante madura e abundante no mercado. Com o desacoplamento do gerador para a rede, tornou-se possível que este rode a uma velocidade abaixo da nominal sem perder eficiência e qualidade na entrega da energia à rede. Assim o sistema ganhou muito em termos de eficiência global e robustez, aliado a um baixo custo de investimento.

Da conclusão dos ensaios dinâmicos conseguimos analisar o desempenho do circuito de proteção e assegurar a sua confiabilidade na proteção do sistema contra sobretensões, bem como os estados especiais como saída do inversor de condução e à falha ou falta de sincronização com a rede. Também com os ensaios dinâmicos conseguiu-se fazer a análise do sistema de conversão de energia, vendo segundo a segundo o que acontece desde o acionamento do gerador por parte do motor de indução, até quando o inversor começa a injetar energia na rede.

A produção de energia renovável em Portugal e na Europa ainda não é o ideal, mas por conta dos problemas ambientais e os compromissos assumidos aquando do protocolo de Quioto, há sempre um aumento na utilização das energias renováveis. Neste contexto, as Pico-hídricas tem um grande papel a assumir, visto terem grande parte das vantagens dos grandes aproveitamentos hídricos excluindo as desvantagens ambientais que estes implicam. Para dar continuidade a este avanço é necessário dar continuidade à investigação, de modo a encontrar soluções cada vez mais flexíveis, eficientes e menos dispendiosas. Pelo exposto, com o objetivo de contribuir para este avanço, foi feito um estudo sobre a energia hídrica, bem como as suas tecnologias e elementos que o constituem.

Este estudo serviu de base para a elaboração em laboratório do sistema proposto, que *a posteriori* será implementando num caso prático, tendo sido selecionado uma turbina compatível com o sistema, sendo encontrado a Crossflow GL760-LM-15. O caso prático escolhido é um dos diversos pontos de interesse encontrados em Bragança, e certamente também dispersos um pouco por todo o país, sendo que em Portugal é pouco usual encontrar este tipo de aproveitamentos comparativamente com outros países da Europa.

A principal conclusão que se pode obter ao longo deste trabalho é que com a implementação deste tipo de aproveitamento, aproveitando o estudo feito aqui na integração de inversores fotovoltaicos convencionais, capaz de aproveitar um caudal de água com uma queda que podem ser baixos, pode-se obter energia elétrica, que apesar de ser de pequena dimensão terá uma produção regular durante todo o ano com um custo de investimento bastante reduzido.

## 6.2. Propostas de trabalhos Futuros

A implementação e o estudo do sistema proposto deve ser encarado como uma proposta de trabalho futuro, pois mesmo que feita a emulação e os ensaios em laboratório ainda não há melhor maneira de se adquirir experiência do que na prática. Assim quando o sistema for implementado, há que fazer um estudo da sua produção de energia, a necessidade de manutenção do sistema e o peso que esta pode ter numa solução de auto-consumo.

## Referências

- [1] C. Europeia, [http://ec.europa.eu/index\\_pt.htm](http://ec.europa.eu/index_pt.htm), Acessado em julho de 2016.
- [2] R. Castro, "Uma introdução às energias renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-hídrica," *Lisboa: Instituto Superior Técnico*, 2011.
- [3] A. T. Chandran, G. Anil, and J. Chandapillai, "Development and Testing of a Cross Flow Turbine," *IGHEM, Alternate Hydro Energy Centre, India*, p. 97, 2010.
- [4] J. Razak, Y. Ali, M. Alghoul, M. S. Zainol, A. Zaharim, and K. Sopian, "Application of crossflow turbine in off-grid pico hydro renewable energy system," in *Recent Advances in Applied Mathematics. American Conference on Applied Mathematics (AMERICAN-MATH 2010)*, Cambridge, MA, USA, 2010.
- [5] K. Sopian and J. Razak, "Pico hydro: clean power from small streams," in *Proceedings of the 3rd World Scientific and Engineering Academy and Society International Conference on Renewable Energy Sources, Tenerife, Spain*, 2009.
- [6] O. Paish, "Micro-hydropower: status and prospects," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 216, pp. 31-40, 2002.
- [7] T. Figueiredo, "Tecnologias Hídricas e eólica," 2010.
- [8] J. P. d. C. P. Rocha, "Metodologia de projecto de sistemas de produção de electricidade descentralizada baseados em energia hídrica," 2012.
- [9] F. M. O. Piqueiro, "Efeito da regulação e da forma e dimensões da câmara de carga na produtibilidade energética de um pequeno aproveitamento hidroeléctrico," 2013.
- [10] F. A. Farret and M. G. Simões, *Integration of alternative sources of energy*: Wiley Online Library, 2006.
- [11] J. Goldemberg and O. Lucon, "Energias renováveis: um futuro sustentável," *Revista USP*, pp. 6-15, 2007.
- [12] Apren, "Renováveis," *Estatísticas rápidas -nº 140- junho de 2016*, p. 21, 2016.
- [13] P. Kanakasabapathy and K. S. Swarup, "Pumped storage bidding and its impacts in combined pool-bilateral market," in *Power Systems, 2009. ICPS'09. International Conference on*, 2009, pp. 1-6.
- [14] S. De la Torre, J. M. Arroyo, A. J. Conejo, and J. Contreras, "Price maker self-scheduling in a pool-based electricity market: a mixed-integer LP approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, pp. 1037-1042, 2002.
- [15] A. Harvey, *Micro-Hydro Design Manual: a guide to small-scale water power schemes*: Intermediate Technology Publications, 1993.
- [16] C. E. Brennen, *Hydrodynamics of pumps*: Cambridge University Press, 2011.
- [17] A. G. de Mello Júnior, "A turbina de fluxo cruzado (Michell-Banki) como opção para centrais hidráulicas de pequeno porte," Programa Interunidades de Pós-graduação e energia da Universidade de São Paulo, 2000.
- [18] R. S. Gorla and A. A. Khan, *Turbomachinery: design and theory*: CRC Press, 2003.
- [19] M. Sinagra, V. Sammartano, C. Aricò, A. Collura, and T. Tucciarelli, "Cross-Flow turbine design for variable operating conditions," *Procedia Engineering*, vol. 70, pp. 1539-1548, 2014.
- [20] M. A. O. Amaral, "Estudo, desenvolvimento e controlo de grupo gerador pico-hídrico," Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2013.
- [21] M. F. Alves, "ABC das Máquinas Eléctricas," *D. d. E. Eletrotécnica, Ed*, 2003.
- [22] S. P. A. Lobo, "O gerador de indução em alternativa ao alternador síncrono nas mini-centrais hídricas," 1988.
- [23] V. N. P. Pinto, "Centrais hídricas com bombagem equipadas com geradores de velocidade variável," 2015.

- [24] F. Rüncos, R. Carlson, P. Kuo-Peng, H. Voltolini, and N. Batistela, "Geração de energia eólica–tecnologias atuais e futuras," *WEG Maquinas–GRUCAD-EEL-TET-UFSC*, 2000.
- [25] W. Mazgaj, Z. Szular, T. Węgiel, and T. Sobczyk, "Small Hydropower Plant with variable speed PM generator," *Przeł ad Elektrotechniczny*, vol. 87, 2011.
- [26] Â. F. Vicente Leite, José Batista, José Couto, "Compatibility Analysis of Grid-connected Pico-hydro Systems using Conventional Photovoltaic Inverters," p. 9, 2016.
- [27] I. Catalin Petrea and C. MARINESCU, "HYDRO TURBINE EMULATOR FOR MICRO HYDRO POWER PLANTS."
- [28] S. Breban, A. Ansel, M. Nasser, B. Robyns, and M. M. Radulescu, "Experimental results on a variable-speed small hydro power station feeding isolated loads or connected to power grid," in *Electrical Machines and Power Electronics, 2007. ACEMP'07. International Aegean Conference on*, 2007, pp. 760-765.
- [29] C. Camus and E. Eusébio, "Energia Mini-Hídrica," *Lisboa: sn*, 2006.
- [30] B. H. Association, "A guide to UK mini-hydro developments," *Available online: Britishhydro.org*, 2005.
- [31] S. H. P. I. Guide, "Power Quality and Utilisation Guide," 2006.
- [32] Electway, "Turbina Crosflow," [http://www.electway-store.com/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=201](http://www.electway-store.com/index.php?main_page=product_info&products_id=201), Acessado em Outubro de 2016.